



HAL
open science

L'innovation technologique comme processus d'apprentissage industriel : analyse de la Formation et de la diffusion des connaissances dans le cas des hauts fourneaux à injection en France et au Japon

Eric Jolivet

► **To cite this version:**

Eric Jolivet. L'innovation technologique comme processus d'apprentissage industriel : analyse de la Formation et de la diffusion des connaissances dans le cas des hauts fourneaux à injection en France et au Japon. Economies et finances. Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 1999. Français. NNT: . tel-00120897

HAL Id: tel-00120897

<https://theses.hal.science/tel-00120897v1>

Submitted on 18 Dec 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de la Méditerranée – Aix- Marseille II

Faculté des Sciences Economiques

Laboratoire d'Economie et de Sociologie du Travail

**L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE COMME PROCESSUS D'APPRENTISSAGE
INDUSTRIEL : ANALYSE DE LA FORMATION ET DE LA DIFFUSION DES CONNAISSANCES
DANS LE CAS DES HAUTS FOURNEAUX A INJECTION
EN FRANCE ET AU JAPON.**

THESE

Pour l'obtention du doctorat en Sciences Economiques

présentée et soutenue publiquement par

Eric Jolivet

le 27 mars 1999 à Aix en Provence

Directeur de Thèse :

Alain d'Iribarne, Directeur de Recherche au CNRS

JURY :

Monsieur Jean-Luc GAFFARD, Professeur d'Economie à l'université de Nice-Sophia Antipolis.

Monsieur Patrick COHENDET, Professeur d'Economie à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, rapporteur.

Monsieur Armand HATCHUEL, Professeur de Gestion à l'Ecole des Mines de Paris, rapporteur.

Monsieur Alain d'IRIBARNE, Directeur de recherche au CNRS.

Monsieur Marc MAURICE, Directeur de recherche honoraire au CNRS.

La faculté n'entend donner aucune approbation ni improbation aux idées émises dans cette thèse : ces opinions doivent être considérées comme propres à l'auteur.

Mes sincères remerciements...

Vont en priorité à l'équipe coopérative formée de Michel Callon, Philippe Laredo, Marc Maurice, Hiroatsu Nohara, initiateurs du projet dont cette thèse est issue, pour leur confiance et leurs incitations multiples. Cette thèse est tout bonnement, au delà de sa signature individuelle, le fruit de leurs efforts et de leur intérêt partagé pour l'innovation au Japon. C'est à eux que je souhaite dédier ce travail, en espérant qu'il sera à la hauteur de leurs attentes.

A Alain d'Iribarne pour avoir assuré avec efficacité et bienveillance la direction de cette thèse.

A Michel Callon pour nos échanges très stimulants.

A Marc Maurice pour avoir su me faire partager sa passion du Japon.

A Hiroatsu Nohara pour son implication généreuse et déterminante dans ce travail, pour sa présence, et nos discussions sur l'économie et la société japonaises.

A Michio Nitta pour son accueil à l'université de Tokyo de 1994 à 1996.

A Philippe Laredo pour ses conseils et son efficacité.

A Guy Roustang pour la confiance indéfectible qu'il a su m'accorder dès mon entrée en recherche.

A tous les interlocuteurs industriels, japonais et français qui ont accepté de parler longuement de leur activité innovante, et particulièrement à MM. Mudry, Steiler et Picard à l'Irsid, et à MM. Ohashi et Deno à Nippon Steel qui ont fait preuve d'une ouverture d'esprit exceptionnelle et d'une patience remarquable à l'égard des pratiques étranges des chercheurs en entreprise.

Je remercie les membres du LEST, et pas uniquement ses chercheurs, mais tous ceux, nombreux au sein du laboratoire, qui m'ont soutenu à maintes reprises, ont provoqué des échanges, et qui ont su conférer à cette expérience, une dimension humaine extrêmement enrichissante.

Mon travail a bénéficié de financements émanant du ministère de la Recherche et de la Technologie (Allocation de recherche), du ministère des Affaires Etrangères (bourse Lavoisier), et du Conseil Général des Bouches du Rhône.

Ma famille m'a toujours soutenu et encouragé. Ma femme, Agnès, et ma fille, Louise, ont eu à vivre des moments difficiles, faits de déplacements au bout du monde, et de séparations trop longues. Puissent-elles en tirer la force et l'énergie de croire, de vivre et d'aimer quelles que soient les circonstances.

RESUME

Une série de travaux en économie et en sciences de gestion ont montré que le développement technologique tend à suivre des cycles composés de deux étapes principales (Abernathy 1978, David 1992, Foray 1989, Utterback et Suarez 1993, Metcalfe et Miles 1994). Dans un premier temps, les acteurs de l'industrie tendent à explorer une diversité de pistes technologiques. Cette étape se traduit par la création d'une forte variété technologique selon une logique d'exploration du spectre des possibles (Foray 1996). Dans un second temps, le marché technologique tend à converger vers un ou quelques technologies et design dominants. Cela correspond à une logique de sélection et d'optimisation technologique visant à exploiter les effets cumulatifs liés aux rendements croissants.

Partant de ces modèles cycliques, la question centrale que nous nous posons dans cette thèse consiste alors à s'interroger sur les phénomènes cognitifs soutenant la dynamique d'apprentissage industriel qui les fonde. Les observations portées sur les cycles technologiques et les phénomènes de convergence supposent en effet, outre le fait que les firmes génèrent de nouvelles connaissances sur une famille de technologies en émergence, ce qui leur permet la création et l'approfondissement d'une série de voies technologiques possibles, mais de plus, que ces apprentissages manifestent une forte coordination, une capitalisation collective de connaissances, expliquant la convergence technologique. Comment, dans une situation de création de technologie nouvelle, caractérisée par un état d'ignorance et d'incertitude généralisé, les firmes parviennent-elles à produire les nouveaux savoirs et les nouvelles compétences nécessaires à leur maîtrise? Par quels mécanismes ces savoirs se transforment-ils en savoir commun, collectif, et se propagent dans l'ensemble de l'économie faisant du même coup basculer la technologie du domaine de l'inconnu, au domaine du sens commun? Quels sont, enfin, les mécanismes de coordination inter-firme permettant la capitalisation des connaissances et leur approfondissement, autorisant la mise en place d'étapes d'exploration puis d'exploitation collective des possibles technologiques? Autant de points qui font largement écho à des questions centrales et classiques de la dynamique industrielle, liées aux stratégies de coopération et de spécialisation des firmes autour de bases de connaissances technologiques collectives.

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à ces questions complexes, nous avons choisi de développer, dans l'esprit de l'étude menée par Abernathy sur l'automobile américaine, une étude qualitative, avec à la fois, un spectre suffisamment large pour intégrer l'ensemble du cycle de développement d'une technologie nouvelle, et un niveau de détail permettant d'observer les phénomènes cognitifs micro-économique au fondement de la formation et de la diffusion des connaissances. Le cas étudié a porté sur la technologie des hauts fourneaux à injection de charbon, dont les premiers pas hésitants ont vu le jour dans les années 1960, et devenue, au tournant des années 1990, une technologie dominante largement répandue sur la plupart des grands hauts fourneaux du monde. Ce cas s'est révélé être un bon support pour l'analyse de l'apprentissage industriel. En effet, si le développement technologique a bel et bien suivi une logique cyclique en deux étapes, celui-ci a été secoué de débats et de controverses facilitant le repérage de points de vue et de connaissances hétérogènes et en partie contradictoires détenues par les entreprises. Avant d'atteindre un certain consensus permettant la stabilisation de la technologie et la mise en place d'investissements cumulatifs, les firmes sont passées par l'élaboration progressive d'une théorisation collective leur permettant de nouer ensemble les savoirs fragmentés et parcellaires dont l'une ou l'autre étaient porteuses.

Les résultats de l'analyse montrent ainsi que dans des conditions où l'apprentissage doit s'effectuer sur la base d'une expérience limitée – ce que March a décrit comme 'learning from sample of one or fewer' (March et Alii 1991) – les firmes tendent à développer zones de connaissances fragmentées liées à leurs impératifs 'locaux' et à des exigences pratiques. Le rôle d'institutions intermédiaires privées, les associations techniques et professionnelles, apparaît alors fondamental dans la mise en ordre,

l'organisation, et l'élaboration d'un savoir commun dont dépend, en bonne part, la mise en place de rendements croissants et l'approfondissement de la division du travail au niveau industriel.

Table des matières

Résumé

Remerciements

Introduction générale 1

Première Partie **Innovation et standardisation, un couple inséparable?**

Introduction 8

Chapitre 1 : La question de la diffusion 13

IA. La diffusion, élément indispensable à la croissance 14

IB. Une approche en deux temps 16

Chapitre 2: Le concept charnière de trajectoire technologique 21

IIA. Un contexte théorique renouvelé 22

IIB. Reformulation de la question de la diffusion 24

IIC. Le concept de trajectoire technologique: cycle de vie des technologies 36

Conclusion: Trajectoire et espace technologiques 66

Chapitre 3: Etude de cas. L'exemple édifiant de la technologie PCI. 75

IIIA. L'espace technologique des injections au haut fourneau 77

IIIB. Trajectoires technologiques, compétition, standardisation 96

IIIC. Lock-out et obsolescence 114

Conclusion 124

Deuxième Partie **Au coeur de la trajectoire technologique (1): Espaces d'innovation, apprentissages localisés, investissements innovatifs et création technologique**

<i>Introduction</i>	137
Chapitre 1: <i>La continuité technologique en question</i>	142
IA Technologie vivante et apprentissage localisé	147
IB Penser la discontinuité: les limites de la trajectoire technologique	158
Chapitre 2: <i>Propositions pour une théorie de l'innovation</i>	162
IIA L'espace de l'innovation	166
IIB Investissement incertain et élaboration technologique	194
Chapitre 3: <i>Deux exemples d'élaboration de technologie d'injection de charbon</i>	212
IIIA: Continuité ou discontinuité de l'espace technologique	220
IIIB Investissements et discontinuité technologique	257
Conclusion	298

Troisième Partie

Au cœur de la trajectoire technologique (2): De la création à la diffusion, modalités de la généralisation

<i>Introduction</i>	314
Chapitre 1: <i>La généralité en question</i>	319
IA Hypothèses du modèle classique de diffusion	320
IB Technologies et apprentissages généralisés: les limites du modèle de diffusion	334
Chapitre 2: <i>Proposition pour une théorie de la généralisation</i>	354
IIA Innovations singulières et généralisation	361
IIB Modalités d'investissement et type de généralité	407
Chapitre 3: <i>Deux modalités de la généralisation de l'injection de charbon</i>	422
IIIA Innovations singulières et généralisation	424
IIIB Figures de l'investissement	478

CONCLUSION GENERALE

	573
<i>Bibliographie</i>	579

Introduction

1.1 Changement économique et innovation

S'il était possible, jusqu'à une période récente, de rendre compte de la logique économique en terme d'allocation de ressources, le pari sur lequel repose une telle position devient progressivement plus fort en regard de la réalité d'un monde en mouvement rapide.

Contrairement aux sociétés traditionnelles (Sahlins 1976¹), notre société semble bien s'être structurée autour d'une logique de changement, d'une course à la création de ressources et de biens toujours renouvelés. La croissance de l'économie des Etats Unis durant les années 1990 est ainsi généralement attribuée à la capacité des entreprises américaines “ à innover dans des secteurs clés et à s'approprier rapidement les percées technologiques pour les convertir en marchés nouveaux dans le monde entier ” (²), c'est à dire à générer et à maîtriser le changement.

Les calculs d'optimisation s'en trouvent inévitablement affectés : la capacité à apprendre, à créer de nouvelles ressources élargissant le spectre des options futures, à anticiper et à investir dans des capitaux porteurs, à adapter les modes de calculs aux nouveaux enjeux importe autant, dans un monde en mouvement rapide, que la rigueur et la précision de l'allocation de ressources existantes. Dans cette perspective, le processus de changement acquiert une importance analytique aussi fondamentale que son résultat. Si en réalité, une forme d'arbitrage doit nécessairement être recherchée entre ces deux tendances, les exigences analytique de la théorie impliquent à l'inverse, le choix d'un point de vue.

¹ Sahlins, M. (1976) *Age de Pierre, âge d'abondance. L'économie des sociétés primitives*. Gallimard.

² Boyer, R. et Didier, M. (1998) *Innovation et croissance*. La documentation Française, p. 11.

Comme l'a affirmé Langlois dans son ouvrage *Economics as a process* (Langlois 1986) deux modalités d'analyse (que l'auteur qualifie de mutuellement exclusives) s'offrent à l'économiste, suivant le traitement qu'il souhaite réserver au changement. L'une, largement dominante, s'intéresse prioritairement, à la suite des travaux de Walras sur l'équilibre général, aux situations d'équilibres, et aux mécanismes de stabilisation et de déstabilisation de cet équilibre. Le changement y est perçu, en rapport avec l'équilibre, comme une perturbation, ou une étape transitoire entre deux équilibres. Une autre tradition, trouvant sa source dans des travaux d'auteurs comme Hayek et Schumpeter, s'est attachée plus directement aux processus économiques sous-jacents au changement, et à la tendance des économies à se transformer, sous l'impulsion des apprentissages réalisés par les agents économiques, sans référence à une finalité ultime.

En fonction de l'angle retenu, l'innovation peut ainsi être considérée comme un processus ou comme un produit. Produit, elle rejoint la longue liste des ressources disponibles à la firme au sein de son environnement. Processus, elle correspond à une stratégie de la part d'une firme innovante visant à transformer sa fonction de production, et son environnement pour acquérir, ou préserver une position compétitive sur un marché.

Vu sous cet angle, l'innovation représente, conformément à la thèse de Schumpeter, le vecteur principal du changement économique. Le phénomène de destruction créatrice introduit une forme de compétition permettant à une firme de bousculer le jeu d'une concurrence plus classique fondée sur l'allocation optimale des offres et des demandes, en agissant sur leur structure même.

Dans la thèse que nous présentons ici, l'innovation sera considérée, selon une hypothèse largement partagée, comme le vecteur élémentaire du changement et du développement économique (Schumpeter 1934, Romer 1986, 1990, Lucas 1988³).

2. Innovation technologique, apprentissage et dynamique industrielle.

Dans la suite, nous prenons le parti de considérer l'innovation comme un processus d'investissement fondé sur des apprentissages mis en œuvre par les agents économiques (Atkinson et Stiglitz 1969⁴). L'activité innovatrice fait face à une incertitude radicale dans la mesure où la forme de

³ Romer, P. (1986) "Increasing Returns and long-run Growth" in : *Journal of Political Economy*, Vol 94, N°5, pp.1002-1037 ; Romer, P. (1990) "Endogeneous Technical Change" in : *Journal of Political Economy*, Vol 98, n°5, S. 71-102 ; Lucas, R. (1988) "on the mechanics of Economic Development" in : *Journal of Monetary Economics*, Vol.22, pp. 3-42.

⁴ Atkinson, A. ; Stiglitz, J. (1969) "A new view of Technological Change" in : *The Economic Journal*, Vol 79, pp.573-578.

l'objet technique, mais aussi sa viabilité technique et économique ne peuvent être connus *ex ante* (Dosi 1988⁵). Le processus d'innovation est par essence exploratoire. Les anticipations formées par les agents économiques sont dans ce cas nécessairement soumises à une forme d'imperfection, et peuvent fort bien aboutir à des échecs et à des erreurs. Les échecs ne tiennent pas nécessairement à des erreurs d'analyse en terme de bonne ou de mauvaise décision, car l'innovation implique, outre des anticipations, un rapport actif et créatif au monde – Nature et Economie- visant à soumettre ce monde aux finalités de la firme innovante. Il en résulte que le jeu engagé, et le fait que la décision se révèle bonne ou mauvaise *a posteriori* dépend en bonne part du déroulement du processus d'innovation, et des compétences engagées dans le rapport pratique au monde qu'elle suppose.

Cela nous conduira, d'une part, à chercher à saisir la **logique séquentielle des phénomènes économiques** par préférence à leur point d'arrivée (Amendola et Gaffard 1988⁶), et d'autre part à nous intéresser prioritairement aux **apprentissages** qui s'y déroulent et aux **ressources qui s'y créent**, plutôt qu'à celles qui préexiste. Deux lignes de questionnement en découlent logiquement : la question des lois régissant les dynamiques de **formation des ressources par la firme innovante**, et celle de la **reproduction, et de la généralisation de ces ressources à l'ensemble de l'économie**.

Selon une posture classique en économie du changement technique et de l'innovation, (Schumpeter 1934, Freeman 1994⁷), nous proposons de décomposer la dynamique séquentielle de l'innovation en deux étapes principales, en deux périodes, deux cadres d'apprentissage différents et complémentaires : la *création de technologie* par la firme innovante, dans un premier temps, et la *diffusion/adoption de cette technologie* aux firmes imitatrices/adoptrices, dans un second temps.

La première étape de l'innovation prend la forme d'un apprentissage localisé se déroulant dans la firme innovante. La firme innovante prend la décision, et le risque de s'engager dans un processus singulier et unique *de création de technologie* impliquant inextricablement une incertitude (Knight 1921⁸) et une latitude – la capacité créatrice- concernant la forme de l'objet technique qui en résultera, autant que ses performances économiques. La décision de la firme de s'engager dans un processus d'innovation implique l'acceptation de se confronter et d'explorer l'inconnu et la forte instabilité caractéristique de l'exploration de voies technologiques et économiques non balisées. Dans le même temps, l'objet de

⁵ Dosi, G. (1988) "The nature of the innovative process" in : Dosi et Alii (eds) *Technical change and economic theory*. Pinter, pp. 221-239.

⁶ Amendola, M. et Gaffard, JL (1988) *La dynamique économique de l'innovation*. Economica.

⁷ Freeman, C. (1994) "The economics of technical change" in : Cambridge Journal of Economics, Vol 18, pp. 463-514.

⁸ Knight, F. (1921) *Risk, Uncertainty and Profit*. Houghton Milfflin.

l'activité innovatrice consiste précisément à construire une voie technologique et économique viable, continue et stable de production d'un nouveau produit et/ou procédé, de façon à faire basculer celle-ci dans l'univers du connu, du stable, du prévisible et du calculable.

L'activité de conception permet à la firme de déterminer ou de modifier les caractéristiques d'un nouvel objet technique de manière à faire entrer celui-ci en correspondance plus étroite avec une finalité qu'elle lui définit. Ce faisant, la firme innovante met au point et modifie sa fonction de production (Atkinson et Stiglitz 1969, Gaffard 1990⁹). Ce détour de production, que nous nommons *investissement innovatif*, pour le distinguer d'un investissement au sens classique -correspondant à la simple acquisition d'un équipement productif constitué sur le marché-, présente à la fois pour la firme entreprenante une opportunité de modifier les règles du jeu de la concurrence et son environnement en sa faveur, et un risque majeur d'échec et d'impasse relatif à la mise au point, à la stabilisation, et à la viabilité de la technologie créée et au pari réalisé.

L'investissement innovatif forge en ce sens le cadre d'un apprentissage singulier. La firme innovatrice s'efforce de stabiliser une solution technologique en créant des ressources - compétences, outils et organisation- et en acquérant les connaissances sur les conditions nécessaires à la conception, à la production et à l'utilisation de la nouvelle technologie. L'investissement innovatif donne lieu à la mise en place d'un projet (Midler 1993¹⁰), à la formation d'un plan (Ponsard & Tanguy 1993¹¹) dont la mise en œuvre favorise l'accumulation de connaissances, de compétences et d'outils nouveaux orientées vers la stabilisation d'un design pour l'objet technique, et la mise en place de moyens propres à assurer sa reproduction et son exploitation.

Se pose alors, du point de vue de l'entreprise innovatrice, et du point de vue de l'analyse économique, la question des conditions de déclenchement, de stabilisation et de viabilité de l'investissement innovatif, tant du point de vue des capacités d'anticipation, d'engagement, que de la réalisation d'une technologie unique favorable à l'obtention d'un avantage compétitif.

Comme l'a souligné Schumpeter (Schumpeter 1934¹²), il s'agit d'un mécanisme majeur du développement économique, dans la mesure où le bénéfice social retiré de l'investissement innovatif

⁹ Gaffard, J.L. (1990) *Economie industrielle et de l'innovation*. Dalloz.

¹⁰ Midler, C. (1993) "Temps du produit, temps du projet, temps des métiers" in : Information sur les sciences sociales, Vol 33, n°1, pp. 25-39.

¹¹ Ponsard, J.P., Tanguy, H. (1993) "Planning in Firms as an Interactive Process" in : Theory and Decision, Vol 34, pp. 139-159.

¹² Schumpeter, J. (1934) *The Theory of Economic Development*. Harvard UP

dépasse la seule firme innovante, laquelle prend en charge la fonction d'exploration de voies nouvelles – en d'autres termes l'innovation représente une source essentielle de variété technologique – et la réduction de l'incertitude et de l'instabilité qui s'y rapportent au nom de l'ensemble de l'industrie.

La seconde étape du développement économique est liée à ce qu'il est usuel de nommer la diffusion technologique, correspondant à une extension de l'apprentissage réalisé par la firme innovante à un ensemble de firmes adoptrices (Mansfield 1961, Metcalfe 1988¹³). L'*investissement innovatif* possède la particularité d'avoir des effets positifs en matière d'apprentissage, au delà de la firme responsable de sa mise au point (spillovers). Ce phénomène, labelisé par Schumpeter comme un mécanisme d'*imitation*, produit des externalités positives au niveau de l'industrie des adopteurs potentiels toute entière (Mansfield 1961, Callon 1992¹⁴).

Lorsqu'une entreprise explore une voie nouvelle, stabilisant un objet technique pour elle-même, elle ouvre du même coup une option technologique nouvelle à d'autres entreprises qui peuvent alors l'inclure comme une option dans leurs calculs stratégiques. Dans cette perspective, les droits de propriété intellectuelle peuvent être compris, outre leur fonction incitative destinée à encourager les investissements innovatifs en favorisant leur appropriation, comme une véritable reconnaissance collective certifiée de domestication, de maîtrise d'une voie technologique donnée, si l'on admet que l'un des défis majeurs qui se pose aux firmes dans les situations d'innovation tient à l'incertitude et à l'instabilité qu'elle génère.

David Teece a montré que cette particularité de l'investissement innovatif peut aboutir à un effet paradoxal : la firme innovante n'est pas nécessairement celle qui se trouve en position de tirer le meilleur profit de l'innovation qu'elle a pourtant générée et stabilisée. Cela renvoie au problème classique de l'appropriation du retour sur investissement innovatif (Arrow 1962, Teece 1986¹⁵).

Le processus de diffusion relève également d'une logique d'investissement fondée sur les apprentissages des agents. Les théories récentes de l'adoption ont mis en lumière le réseau d'interdépendances tissées par la diffusion transversale d'une innovation. Les performances économiques de l'innovation, tant au niveau des firmes individuelles qu'au niveau de l'économie dans son ensemble,

¹³ Mansfield, E. (1961) "Technical Change and the Rate of Imitation" in : *Econometrica*, Vol 29, n°4, pp. 741-766 ; Metcalfe, J (1988) "The diffusion of innovation : an interpretative survey" in : Dosi et Alii (eds) *Technical Change and Economic Theory*. Pinter, pp. 560-589.

¹⁴ Callon, M. (1992) "Variété et irréversibilité dans les réseaux de conception et d'adoption des techniques" in : Foray, D. & Freeman, C. (eds) *Technologie et richesse des nations*. Economica, pp. 275-324.

dépendent étroitement de la dynamique d'adoption : de la compétition technologique à la fois synchronique ('compétition technologique' Arthur 1988, Foray 1989¹⁶) et diachronique (Substitution Mansfield 1961, Le Bas et Sylvestre-Baron 1995¹⁷) et de la dynamique collective d'apprentissage stimulée par le taux d'adoption de l'innovation ('rendements croissants d'adoption' Arthur 1988). C'est la dynamique d'adoption elle-même qui confère au bien ses qualités (Foray 1996¹⁸).

Progressivement, les firmes imitatrices ont la possibilité de s'engager dans des investissements plus classiques, limités à l'acquisition d'un équipement, et ne nécessitant de leur part qu'un apprentissage relatif aux conditions nécessaires à l'exploitation optimale de la technologie existante, sur laquelle elles peuvent forger des anticipations de mieux en mieux informées et de moins en moins risquées toutes choses égales par ailleurs. Dans ce cas, l'étendue des apprentissages à mener (Kogut et Zander 1992¹⁹), et la nature de l'incertitude rencontrée autorisent la mise en place de calculs d'allocation rationnelle de ressource.

La firme innovante et les firmes adoptrices d'une innovation technologique forment dès lors un club, un groupe d'intérêt, un réseau ad hoc dont le ticket d'entrée est l'investissement lié à l'adoption. Une *interdépendance*, un intérêt commun lie les adopteurs d'une même technologie, vis à vis de technologies alternatives menaçant leur investissement d'isolement ('angry orphans' David 1987²⁰) ou d'obsolescence. La dynamique d'adoption, dans un contexte de compétition technologique, crée *ex nihilo* un réseau transversal favorable à la mise en place d'apprentissages croisés interfirmes : "*la diffusion technologique est un processus dynamique, dont le moteur réside dans l'action même d'adopter*" (Foray 1989, p.17). Dans le même mouvement, cette dynamique collective assure les conditions d'une certaine proximité technologique favorable à la mise en concurrence de produits et de services 'substituables' par ses membres, tout en invitant ceux-ci à employer des stratégies de différenciation.

¹⁵ Arrow, K. (1962) "Economic Welfare and the Allocation of Resources to Invention" in : Nelson, R. (ed) *The Rate and Direction of Inventive Activity*, NBER. Teece, D. (1986) "Profiting from Technological Innovation : Implications for Integration, Collaboration, Licensing, and Public Policy" in : *Research Policy*, Vol 15, pp. 285-305.

¹⁶ Arthur, B. (1988) "Competing Technologies : an overview" in : Dosi et Ali (eds) op.cit ; Foray, D. (1989) "Les modèles de compétition technologique. Une revue de la littérature" in : *Revue d'Economie Industrielle*, n°48, pp.16-35.

¹⁷ Le Bas, C. et Sylvestre-Baron, P. (1995) "Diffusion technologique non binaire et schéma épidémiologique. Une reconsidération" in : *Economie Appliquée*, tome 48, n°3, pp.71-101.

¹⁸ Foray, D. (1996) "Standardisation et concurrence : des relations ambivalentes" in : *Revue d'Economie Industrielle*, pp.257-274.

¹⁹ Kogut, B., Zander, U. (1992) "Knowledge of the Firm, combinative Capabilities, and the Replication of Technology" in : *Organization Science*, Vol 3, n°3, pp.383-397.

²⁰ David, P. (1987) "Some new standards in the economics of standardisation in the information age in : Dasgupta, P. et Stoneman, P. (eds) *Economic Policy and Technology Performance*. Cambridge UP, pp.206-239.

La dynamique d'apprentissage collectif qui se noue autour de la formation, de la propagation et de l'accumulation de connaissances technologiques, indissociable de la question de la coordination des investissements forme dès lors la base de la structuration dynamique de l'industrie.

3. Objectif de la thèse : analyse de la dynamique de formation et d'accumulation des connaissances technologiques.

Nous considérons dans la suite que l'activité des agents économiques dans un contexte de changement vise en bonne part à stabiliser, à acquérir la maîtrise d'un environnement volontiers fluctuant et imprévisible. L'innovation peut dès lors être définie comme le processus permettant aux agents économiques de baliser et domestiquer une territoire technologique et économique à explorer puis à exploiter (Foray 1996). Notre thèse consiste à avancer que les connaissances formées et accumulées par ces agents constituent le pivot central de la domestication et de la maîtrise de leur environnement.

Dans le cadre du processus d'innovation, les connaissances formées et les compétences et outils créés pour les traduire en action transforment l'incertitude inhérentes à la création technologique, en certitude, en phénomène reproductible, prévisible et calculable de production. L'innovation constitue, en ce sens, un vecteur de changement fondé sur *une destruction créatrice*, selon l'expression de Schumpeter. L'accumulation des savoir, des compétences, des outils, et des éléments d'organisation correspondants, assurent la maîtrise des phénomènes et des forces naturelles et économiques sur lesquelles se fonde le procédé ou le produit nouveau. La répétition de ces investissements devient plus étroitement programmable, et moins risquée. Selon la formule de Marshall :

“Knowledge is our most powerful engine of production, it enables us to subdue Nature and force her to satisfy our wants” (Marshall 1920²¹)

Dès lors, la compréhension des phénomènes de formation, de transmission, d'accumulation et d'utilisation des connaissances technologiques constitue un enjeu économique d'importance. Nous posons qu'il ne peut pas être analysé séparément de la création et de la spécification de ressources – en particulier de compétence - permettant de les traduire en action. Le projet de la thèse consiste donc à repérer et à analyser cette dynamique de production, d'accumulation et d'utilisation de ressources et de connaissances

²¹ Cité dans Gaffard, J.L. (1995) “Information, coordination et organisation de l'industrie.” in : Rainelli, M. et Alii (eds) *Les nouvelles formes d'organisation*. Economica.

technologiques dans le cours d'un processus d'innovation, c'est à dire à l'occasion des deux principales étapes de l'innovation, la création et la dissémination technologique.

Quelles sont les connaissances effectivement mobilisées dans les processus d'innovation ? L'innovation est-elle une simple mobilisation de connaissances technologiques génériques préexistantes ? Quelle est la nature des apprentissages entourant la mise en place d'investissements innovatifs et la diffusion technologique ?

4.Méthodologie utilisée

Si la dynamique de production et de diffusion des connaissances technologiques est effectivement centrale dans les économies modernes, il semble utile de mieux saisir leurs conditions d'accumulation, de transmission et d'utilisation, d'une part, et d'autre part les mécanismes par lesquels elles prennent effet sur le développement industriel. Les travaux récents de l'économie de la standardisation ont ouvert une voie, à partir des phénomènes de lock-in, de création d'irréversibilité, et de rendements croissants d'adoption (David 1985, David 1987, Arthur 1988, Foray 1989, Foray 1996), mettant en exergue l'importance des phénomènes de convergence technologique et de standardisation. Les fondements cognitifs de ces modèles demeurent cependant largement implicites. Ils se placent dans l'hypothèse d'un apprentissage industriel en deux temps sans clarifier la nature et les phénomènes d'interactions inter-firme, au fondement de cet apprentissage. Il s'agit de la question centrale de cette thèse.

Quels sont les principaux problèmes et obstacles à l'analyse de cette question ?

Un tel objectif nous semble poser deux problèmes majeurs étroitement liés: l'utilisation d'un modèle pertinent d'analyse de la dynamique d'apprentissage et l'élaboration d'indicateurs et de méthodes permettant de mesurer cette dynamique (²²).

Un modèle pertinent d'analyse des dynamiques d'apprentissages doit éviter la confusion entre connaissance et information (Dosi 1988). Il a été montré que, si comme l'information, les connaissances technologiques possèdent un statut de bien public, contrairement à l'information, leur transmission n'est ni

²² Foray, D. (1998) "Comment mesurer l'économie de la connaissance ? Un cadre analytique" in : IMRI Working Papers, n° 98/10, novembre 1998.

automatique ni générale (Romer 1993, Callon 1994, David et Foray 1996²³). Ajoutons que les connaissances ne sont pas strictement cumulatives, mais souvent contradictoires, concurrentes, partielles. Cela ouvre par conséquent une série de questionnements et de perspectives de recherche sur les lois régissant les phénomènes de production, de transmission, d'accumulation et d'organisation des connaissances, dont un auteur comme Paul David (Dasgupta et David 1994²⁴) a souligné qu'elles dépendaient étroitement des conditions organisationnelles et institutionnelles de leur production et de leur utilisation. Quels sont les facteurs déterminant leur orientation et leur capitalisation ? Quels sont les relations entre connaissances partagées et connaissances spécifiques ?

Au delà du cadre d'analyse, les connaissances posent de réelles questions de mesure liées à leur caractère immatériel. Parce que les connaissances ne sont pas des informations, elles ne peuvent être analysées indépendamment des ressources et du cadre organisé, ou de l'infrastructure dans lesquels elles sont mobilisées, ce qui contribue à rendre leur étude plus complexe. Un problème exemplaire désormais bien identifié à la suite des travaux de Nelson et Winter (Nelson et Winter 1982) est la question de l'appréhension et de la mesure des connaissances dites 'tacites' : ces savoir-faire dont nombre de spécialistes reconnaissent qu'ils se trouvent au cœur de la performance (Cohendet et Al. 1992²⁵), et dont la codification est en partie impossible, et donc invisible à l'analyste, indépendamment des ressources humaines qui en sont porteurs.

Pour prendre en charge ces problèmes de mesure et d'appréhension des dynamiques cognitives, il nous est apparu essentiel d'ancrer la théorisation dans un travail empirique détaillé, mêlant des approches à la fois quantitatives et qualitatives. Nous voyons deux justifications principales à ce choix. D'abord, nous avançons que pour rendre compte du caractère processuel et séquentiel de l'innovation et restituer son caractère fondamentalement incertain, l'approche doit à la fois s'appuyer sur un matériau abondant, mais surtout, être suffisamment inductive pour ne pas contraindre *a-priori* la logique même du processus étudié. C'est en ce sens que la méthode peut traduire une réelle volonté de restituer la logique *séquentielle* du processus d'innovation. Deuxièmement, nous avons pu constater que seule une approche qualitative

²³ Romer, P. (1993) "Two Strategies for Economic Development : Using Ideas and Producing Ideas" in : Proceedings of the World Bank Annual Conference on Development Economics 1992, World Bank, pp.63-91, Callon, M. (1994) "Is Science a Public Good ?" in : Science, Technology and Human Values, Vol 19, n°4, pp. 395-424 ; David, P. et Foray, D. (1996) "Information Distribution and the Growth of Economically Valuable Knowledge : a Rationale for Technological Infrastructures Policies" : in : Teubal et Al. (eds) *Technological Infrastructure Policy. An International Perspective*. Kluwer , pp. 87-116.

²⁴ Dasgupta, P. et David, P. (1994) "Towards a New Economics of Science" in : *Research Policy*, Vol 23, pp.487-521.

²⁵ Cohendet, P., Heraud, J.A., Zuscovitch, E. (1992) "Apprentissage technologique, réseaux économiques et appropriabilité des innovations" : in Foray, D., Freeman, C. (eds) *Technologie et richesse des nations*, pp.63-78.

s'intéressant aux phénomènes micro-économiques permet de retrouver, sans les déduire spéculativement, les liens et cohérence tissés entre connaissances technologiques et ressources spécifiques permettant de les mettre en action. La richesse du matériau réuni pourra en contrepartie, paraître foisonnante. Mais ce risque nous a semblé acceptable au regard des risques de sur-interprétation lié à un objet complexe, auquel l'analyse économique s'est récemment intéressé.

L'option retenue dans cette thèse a consisté à mener une analyse 'longitudinale' de l'innovation. Cette approche longitudinale a consisté à suivre pas à pas le cheminement d'une innovation technologique de sa création au sein de la firme innovante à sa diffusion au sein d'un secteur industriel.

Analyse 'longitudinale' signifie d'abord que le passage et les échanges entre les niveaux micro et méso- économique de la réalité ont constitué le lieu privilégié de nos investigations. Nous nous sommes efforcés de cartographier, de repérer les connaissances technologiques produites dans le processus d'innovation, et de repérer la dynamique de leur formation, de leur accumulation et de leur transfert aux niveaux micro et méso-économiques. Selon la définition de Zuscovitch *“Une approche méso-économique signifie que ce sont les interactions qui constituent la clé de lecture suivant laquelle nous organisons l'analyse. Ce qui fait que l'on peut parler de la dynamique du progrès technique, ce sont les interactions entre innovations particulières d'une part, et agents économiques spécifiques d'autre part. Les véhicules essentiels de cette dynamique, c'est à dire d'une part, les mécanismes de diffusion de l'innovation et d'autre part, les mécanismes de l'apprentissage industriel de la nouveauté, reposent précisément sur ces interactions”* (Zuscovitch 1984, p. vii²⁶).

Analyse longitudinale signifie également que nous nous sommes efforcés de respecter les rythmes et les temps des processus observés, et que ceux-ci ont été inscrits dans la durée. Cela suppose comme l'ont souligné Amendola et Gaffard (Amendola et Gaffard 1988) de rendre compte de la nature séquentielle de l'innovation, considérant qu'elle procède fondamentalement de tâtonnements, d'expérimentation par essai-erreur, du fait de l'incertitude radicale qui les caractérise (Alchian 1950). Nous avons voulu privilégié une approche prenant en compte strictement la logique propre du changement, ses temporalités, ses cadres pertinents, approche dont la posture épistémologique tient en bonne part dans le concept de processus (Langlois 1986, Gaffard 1990, Strauss et Corbin 1991). Il s'agit de considérer le changement non pas à partir d'un cadre prédéfini, mais de prendre en considération les

²⁶ Zuscovitch, E. (1984) *Une approche méso-économique du progrès technique. Diffusion de l'innovation et apprentissage industriel*. Thèse de Doctorat d'Etat, ULP Strasbourg.

temporalités, les contextes, les détails qui se sont révélés significatifs du point de vue des acteurs impliqués plutôt que du point de vue de l'analyste, afin de saisir chaque processus dans sa singularité.

Enfin, 'longitudinale' signifie qu'une importance particulière a été accordée aux contextes localisés, à l'environnement local dans lequel s'est déroulé le processus observé. La dynamique d'apprentissage n'a pas été saisie comme la production isolée de connaissances, mais en relation avec les ressources complémentaires capables de les produire, de les mobiliser, de les utiliser, de leur donner sens, et en rapport avec les cadres organisés sur lesquels elles se sont appuyées et dans lesquels elles sont encastrées.

L'analyse singulière de processus pose le problème de la représentativité des observations, et par voie de conséquence, soulève la question de la **remontée en généralité**. L'analyse **comparée** de plusieurs processus similaires permet d'apporter une réponse à cet inconvénient, soit que le cas étudié soit ramené à d'autres cas publiés dans la littérature, soit qu'une analyse comparative soit mise en œuvre explicitement.

Du point de vue empirique, la thèse présentée se fonde sur l'analyse longitudinale et comparée de deux processus d'innovation, de la création technologique au sein de la firme innovante, à la diffusion au sein de l'industrie. La comparabilité des deux processus tient à ce que les deux entreprises innovantes, l'une au Japon, l'autre en France, ont mis en œuvre au même moment – au début des années 1980 – deux processus d'innovation visant à acquérir une technologie similaire : la technologie des hauts fourneaux à injection de charbon. Confrontées à un environnement instable lié à la crise du marché du pétrole dans les années 1970, les deux entreprises sidérurgiques ont fait le choix de s'engager dans un investissement innovatif, explorant une voie technologique soumise à de fortes incertitudes. La technologie d'injection au haut fourneau se situe en amont du procédé de fabrication de l'acier, vise à agir sur les coûts de production de la fonte sans en altérer la qualité, et peut être classé dans ce qu'il est d'usage de nommer les *innovations de procédé*.

Les deux technologies élaborées se sont trouvées mises en concurrence sur le marché mondial. Après près de 15 années de développement, la version européenne de cette technologie semble être en passe de s'imposer au Japon et dans le reste du monde. L'analyse quantitative de la dynamique de diffusion centrée autour du concept d'espace technologique confirme la validité des travaux de l'économie de la standardisation, et en particulier la thèse d'Arthur sur le caractère dépendant du sentier de l'élection d'un standard industriel, et sur la tendance du marché à converger vers une technologie dominante (Arthur 1988, Foray 1989). Nous montrons cependant que les irréversibilités et la stabilité créée autour de

l'innovation pour la rendre maîtrisable est sans doute plus fragile que ne le laisse supposer les théories de la standardisation.

L'analyse qualitative permet de nuancer et de préciser ce point de vue, et souligne le rôle éminent de la dynamique de formation et d'organisation des connaissances au niveau industriel dans la coordination des investissements, et la concurrence technologique. Le suivi et la comparaison pas à pas des processus d'innovation permet de rapporter la production de connaissances, analysée en particulier sur la base des publications, aux conditions particulières dans lesquelles celles-ci ont été formées et mobilisées. Dans le cas qui nous intéresse, cela nous permet de comprendre et d'éclairer l'ouverture d'une controverse entre l'entreprise française et l'entreprise japonaise, sur la forme et sur les performances à attendre des injections de charbon, controverse qui a joué un rôle essentiel dans la formation des anticipations des firmes adoptrices de la technologie, et dans l'élection finale du standard 'high pulverized coal injection' comme standard dominant du marché.

5. Plan de la thèse

La thèse est organisée en trois parties.

La première partie est l'occasion d'exposer les principaux traits des théories anciennes et modernes de la diffusion et de la compétition technologique et de montrer dans quelle mesure les théories dites du 'cycle du produit', les théories 'évolutionnistes' et les théories de la 'standardisation' prennent en charge, mieux que les précédentes, la question du changement et de la dynamique technologique. Ces différentes théories, développées dans les années 1980, partagent une vision trajectorielle, cumulative et dépendante du sentier du développement technologique. Cette présentation nous permet de situer le cadre technologique global dans lequel les processus d'innovation se sont inscrits.

L'application de ce cadre théorique au cas des technologies de haut fourneau à injection permet de rendre compte assez fidèlement de la logique globale de changement, et des structures économiques agrégées auxquelles ont été confrontées les entreprises étudiées. Les travaux de l'économie de la standardisation, auxquels il a été reproché la faiblesse de leur ancrage empirique, se sont révélés particulièrement pertinents dans le cas qui nous intéresse. La dynamique technologique s'est ainsi structurée autour de deux étapes centrales, une étape d'apprentissage exploratoire, ouvrant une série de voies et d'alternatives en les rendant *disponibles*, et une étape d'approfondissement, dépendante du chemin, dans laquelle se sont mises en place les irréversibilités, aboutissant progressivement à la sélection

d'une alternative technologique, le "lock-in" (Arthur 1988, Foray 1989, 1996). Le suivi des trajectoires technologiques sur une quarantaine d'années a permis d'illustrer, et d'expliquer la dynamique de construction de *l'espace technologique* du haut fourneau à injection, conçu comme la description dynamique des options technologiques offertes à l'adoption (Foray et Grübler 1990). L'analyse nous a cependant également amené à relativiser la stabilité et le caractère irréversible de la standardisation, et que parallèlement aux conditions du lock-in, il semble utile de formuler les conditions du lock-out (Foray et Grübler 1990²⁷).

Aussi éclairantes soient-elles sur la dynamique technologique, les théories de la diffusion mobilisées ne permettent pas d'étudier les apprentissages sous-jacents aux trajectoires technologiques de manière satisfaisante, car elles n'offrent pas d'outils d'observation directe des processus d'innovation et de leurs contextes. Les seconde et troisième parties de la thèse se sont donc attachées à mener une approche longitudinale de l'innovation, de sa création à sa diffusion au sein de l'industrie, de manière à fournir des éléments d'analyse des phénomènes de formation, de transmission, d'accumulation et d'utilisation des connaissances technologiques. Dans ce but, nous avons adopté une perspective différente, un changement de point de vue, 'zoomant', détaillant les processus micro et méso-économiques d'apprentissage. Nous avons comparé deux processus d'innovation singuliers. L'analyse a été organisée autour des deux étapes principales de la création technologique au sein de la firme innovante (partie 2), et de la diffusion technologique au sein de l'industrie (partie 3).

La seconde partie s'est intéressée aux connaissances mobilisées et aux apprentissages réalisés dans le cadre de processus d'innovation singuliers. Nous y étudions en détail le moment de la création technologique au sein de la firme innovante. Du point de vue théorique, un débat fondamental s'est organisé entre deux approches de la firme innovante, un courant, dont l'approche 'évolutionniste' est emblématique, insistant sur la continuité technologique ('paradigme technologique' Dosi 1982) et organisationnelle ('coherence' Teece 1988), et une approche 'créatrice' (Amendola et Gaffard 1988) insistant sur le caractère séquentiel et indéterminé des processus d'innovation. Cela nous a amené à considérer le débat entre continuité et discontinuité technologique comme un élément central des processus d'innovation auquel sont confrontées les firmes innovantes.

Sur la base de ces réflexions nous proposons deux dimensions d'analyse des processus d'innovation. Une première dimension, présentée sous le terme d'*espace d'innovation* vise à prendre la

²⁷ Foray, D. , Grübler, A. (1990) "Morphological analysis, diffusion, and lock-out of technologies : ferrous casting in France and the FRG" in : Research Policy, Vol 19, pp.535-550.

mesure du cadre organisationnel et de la nature des jeux tissés entre acteurs autour de la formation d'un contrat ad hoc formant le cadre dans lequel se déroule le processus. Une seconde dimension, traduite par le terme *investissement innovatif*, rend compte des efforts de formation et d'organisation de ressources destinées à stabiliser une voie technologique. Cet investissement conjugue la mise en cohérence de ressources spécifiques permettant de maîtriser un objet technique et la formation de connaissances soutenant et orientant le processus d'innovation.

La confrontation de ces éléments théoriques à l'analyse empirique comparée des deux processus d'innovation nous a amené à constater l'importance de 'modèles d'apprentissage' dont sont porteuses les firmes innovantes : les firmes semblent portées à construire leurs connaissances et les ressources spécifiques de façon routinière, d'un processus d'innovation à l'autre ('pattern of innovation'). Cette régularité de gestion, ou d'organisation remplit une fonction essentielle dans la formation d'un accord contractuel et d'un plan d'allocation des ressources. L'intérêt du cas présenté tient, de ce point de vue, à ce que les firmes ont incarnées deux modèles d'apprentissage distincts, l'un fondé sur la continuité vis à vis des technologies existantes, l'autre positionné en rupture avec le patrimoine technologique existant, illustrant les arguments du débat théorique entre visions créative et trajectorielle de l'innovation.

Dans le cas étudié, la firme japonaise a parfaitement incarné la théorie évolutionniste de la firme innovante (Nelson et Winter 1982). Confrontée à une opportunité commune aux firmes sidérurgiques, la firme japonaise a mobilisé les technologies génériques disponibles dans l'espace technologique mondial (Pavitt 1984, Zuscovitch 1984, Dosi 1988) –veille technologique-, tout en les assimilant d'une façon singulière, liée à son expérience et à ses finalités (Patel et Pavitt 1997, Iansiti et Clark 1994, Miyazaki 1994, Teece 1996²⁸, Pavitt 1998²⁹). Le processus d'innovation a été inscrit dans la continuité des technologies existantes, prises comme point de départ. De même, le cadre organisationnel a respecté les règles et routines habituelles de la prise de décision, de la mise en forme des projets, de la répartition des tâches et des responsabilités et l'ensemble du processus a été internalisé dans la firme ('path dépendance' et 'coherence' Teece 1988³⁰) : en ce sens, la créativité a été fortement organisée (Lanciano et Alii 1993³¹).

²⁸ Iansiti, M., Clark KB (1994) "Integration and dynamic Capability : Evidence from Product Development in Automobiles and Mainframe Computers" in : *Industrial and Corporate Change*, Vol. 3, n°3, pp. 557-605 ; Miyazaki, K. (1994) "Search, Learning and Accumulation of Technological Competences ; the Case of optoelectronics" in : *Industrial and Corporate Change*, Vol. 3, n°3, ; Teece, D. (1996) "Firm Organization, Industrial Structure and Technological Innovation" in : *Journal of Economic Behaviour and Organisation*, Vol 31, pp. 193-224.

²⁹ Patel, P. et Pavitt, K. (1997) "The Technological Competencies of the World Largest Firms : Complex and Path-Dependent, but not much Variety" in : *Research Policy*, Vol 26, pp. 141-156. Pavitt, K. (1998) "Technologies, Products and Organization in the Innovating Firm : What Adam Smith Tells Us and Joseph Schumpeter Doesn't" in : *Industrial and Corporate Change*, Vol 7, n°3, pp.433-453

³⁰ Teece, D. (1988) "Technological Change and the Nature of the Firm" in : Dosi et Alii (eds) *Technical Change and Economic Theory*. Pinter, pp. 256-281.

L'innovation a par conséquent contribué à la constitution de fortes irréversibilités des trajectoires organisationnelles et technologiques.

L'inscription de l'innovation dans la continuité des technologies génériques traduit bien la dynamique paradigmatique (Dosi 1982, Dosi 1988 Dosi 1982³²) de la technologie, dynamique dans laquelle les innovations singulières se nourrissent et tout à la fois alimentent une base de connaissances technologique partagée par la communauté des ingénieurs et chercheurs d'un secteur industriel (Pavitt 1984, Dosi 1988).

Par contraste, la firme française a déployé un processus d'innovation en rupture avec les connaissances communes. Dans ce cas, le processus d'innovation et ses aléas ont constitué un cadre aussi déterminant que les technologies génériques ou les routines organisationnelles. Les personnes individuelles ont joué un rôle déterminant dans la signature d'un contrat ad hoc d'allocation de ressources, lequel a donné lieu à la mise en place d'un projet et d'une structure ad hoc, une forme d'intra-entreprise. Les savoirs génériques mobilisés, n'ont été mobilisés que dans la mesure où ils s'inscrivaient dans la logique séquentielle propre à l'innovation : le contexte économique, organisationnel, et historique local dans lequel s'est déroulé le processus d'innovation a fortement coloré la forme de la technologie créée. De plus, les savoirs mobilisés n'ont pas été imités ou mobilisés tels quels, mais au moins en partie spécifiés, appropriés, retravaillés, transformés en fonction des orientations retenues et des compétences mises en œuvre localement, et en particulier de la compétence progressivement formée du chef de projet. Les connaissances qui en ont résulté ont partiellement contrarié les connaissances partagées par la communauté des ingénieurs et chercheurs.

En ce sens, le processus d'innovation français a représenté un processus fortement orienté vers la création technologique, c'est à dire la création de ressources nouvelles, de connaissances nouvelles, d'organisation nouvelle au fil du déroulement du projet, de façon à permettre à la firme de produire un objet technique nouveau adapté aux besoins spécifiques de l'usine pilote, au prix d'une forte obsolescence des ressources existantes. Cette posture, privilégiant la création a porté l'entreprise à externaliser une partie de son activité innovatrice, du fait des limites ressenties en terme de compétence interne de la firme.

³¹ Lanciano, C., Maurice, M., Nohara, H., Silvestre, JJ. (1999) *Les acteurs de l'innovation et l'entreprise*. L'Harmattan.

³² Dosi, G. (1982) "Technological paradigms and technological trajectories – a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change" in : *Research Policy*, Vol 11, pp. 147-162.

La troisième partie appréhende ce que nous appelons la généralisation, c'est à dire les apprentissages générés par les innovations lors de leur diffusion à l'industrie toute entière. Dans cette dernière partie, nous nous sommes intéressés à ce que sont devenues les innovations créées dans le cadre restreint des firmes innovantes. Cela nous a donné l'occasion de revenir, à partir d'un angle différent, centré sur le lien entre innovation et technologie, sur les théories de la diffusion technologique. Nous nous sommes plus particulièrement concentrés sur la question de la formation, de l'accumulation et de l'organisation collective des connaissances, en relation étroite avec la coordination des investissements des firmes, et dans la perspective de l'organisation de l'industrie autour de la spécialisation entre producteur et utilisateur de technologie.

Les théories récentes de l'économie de la connaissance proposent de considérer l'apprentissage comme un processus de codification de savoir tacites en savoir explicites, proches de l'information, et doté d'attributs à validité universelle (Cowan et Foray 1997, Nonaka, 1991³³). L'étude de la diffusion des deux innovations, française et japonaise, éclaire l'importance de l'*appropriation* : la mise en œuvre, l'utilisation de la technologie ne découle pas logiquement et automatiquement de l'application des technologies génériques, de connaissances codifiées, mais suppose, à son tour, la formation de connaissances, de compétences, de ressources spécifiques propres à traduire celles-ci en actions efficaces (Eyraud et Al. 1988³⁴). Notre avons pu mettre en évidence que les savoirs 'dits codifiés' et les savoirs pratiques mis en œuvre effectivement dans les processus d'innovation ne se correspondent pas strictement et répondent à deux fonctions distinctes. Cela nous a amené à proposer l'établissement d'une distinction entre rapport pratique, tourné vers l'action, et rapport théorique au monde, orienté vers la représentation.

Les technologies génériques apparaissent dès lors comme le fruit d'une dynamique de représentation, de rationalisation, de théorisation, destinée à éclairer les pratiques à organiser la complexité des investissements singuliers en catégories génériques. Cette activité de théorisation se trouve au coeur de la formation d'une connaissance partagée, favorables à la coordination des investissements et à l'organisation de l'industrie autour de relations entre producteurs et utilisateurs de la technologie. La théorisation, en établissant un code commun, permet la confrontation d' expériences diverses, leur classement, leur accumulation. Elle facilite dès lors la formation d'anticipations, de calculs, de plans et de

³³ Cowan, R., Foray, D. (1997) The Economics of Codification and Diffusion of Knowledge in : Industrial and Corporate Change, Vol. 6, n°3, pp. ; Nonaka, I. (1991) The Knowledge-Creating Company in : Harvard Business Review, nov-déc 1991, pp. 96-104.

³⁴ Eyraud, F., Iribarne (d') A., Maurice, M., Rychener, F. (1988) "L'apprentissage par les entreprises des technologies flexibles : une recomposition d'acteurs et l'émergence de nouvelles professionnalités" in : Cohendet, P. et Al. (eds) *L'après Taylorisme. Nouvelles formes de rationalisation dans l'entreprise en France et en Allemagne*. Economica.

prévisions par les adopteurs de l'innovation. Elle ne peut pourtant être considérée indépendamment de la mise en place de ressources collectives, liés à l'approfondissement de la division du travail, le rôle des fournisseurs d'équipements 'clé en main' étant ici particulièrement essentiel (Rosenberg 1963, Pavitt 1998).

La confrontation de ce cadre d'analyse au cas de la diffusion des hauts fourneaux à injection de charbon met en lumière deux modèles d'apprentissage, le modèle de la standardisation mis en œuvre par la firme japonaise, et le modèle de la flexibilité par la firme française. Comme l'ont montré David et Rothwell (David et Rothwell 1996³⁵), ces deux modes d'apprentissage reposent sur l'exploitation de deux types d'économies, l'un fondé sur l'optimisation et la répétition, et le second sur l'exploration, la création, et la diversité. Nous montrons que ces apprentissages dépendent largement des mécanismes de coordination des investissements mis en place et du type de savoir dont ceux-ci sont porteurs.

Dans le cas japonais, conformément à la thèse de Freeman (Freeman 1988), le département central d'ingénierie s'est vu confié le rôle essentiel de coordination des investissements et des apprentissages : dans l'entreprise japonaise que nous avons étudié, ce département est nommé l'acteur du 'déplacement horizontal'. Ce département s'est attaché à optimiser et à diffuser un design standard tant à l'intérieur, qu'à l'extérieur de l'entreprise. Les calculs d'investissement des adopteurs de ce design ont été en bonne part incorporés et simplifiés, puisque les sites intéressés ont alors disposés de règles de calculs de coût-bénéfice leur permettant de se concentrer sur la seule question de la capacité à installer.

Dans le cas français le centre de recherche et développement a été le principal acteur de la coordination des investissements. L'apprentissage s'est organisé autour de la formulation d'une théorisation, d'un modèle théorique de la technologie représentant les lois de fonctionnement de l'installation, et facilitant la mise en œuvre de calculs d'investissements adaptés sur chaque site, en fonction des besoins spécifiques. Pour autant, les détails du design sont restés ouverts, permettant en particulier des combinaisons originales de technologies favorables à l'incorporation des derniers développements du marché.

L'un des principaux résultats de cette recherche, néanmoins, réside dans l'analyse de la confrontation de ces différents points de vue sur la technologie. Cela nous a permis de mettre en évidence le rôle crucial joué dans la généralisation par les institutions intermédiaires à caractère privé que sont les

³⁵ David, P., Rothwell, G. (1996) "Standardization, diversity and learning : Strategies for the coevolution of technology and industrial capacity" in : International Journal of Industrial Organization, Vol. 14, pp. 181-201

associations professionnelles et techniques. A travers l'organisation d'espaces de rencontre et de confrontation, tels que les congrès et les journaux spécialisés, celles-ci favorisent l'échange de connaissance entre firme, et contribuent à élaborer le cadre cognitif et les modèles généraux à partir desquels les connaissances et expériences variées sont articulées les unes aux autres.

L'ensemble de ces réflexions nous amènerons donc à formuler quelques propositions et réflexions relatives aux dynamiques d'apprentissages tels qu'elles se mettent en place autour des processus d'innovation, et en particulier à avancer quelques hypothèses concernant l'existence de modèles d'apprentissage aboutissant à une variété de point de vue technologique, et d'autre part, du rôle essentiel joué par le cadre institutionnel dans la confrontation et la mise en cohérence des connaissances hétérogènes et fragmentées détenues par les firmes, ce que nous avons appelé la généralisation.

Première Partie: Innovation et standardisation, un couple inséparable?

“The economics of standards and the economics of technological change seem in fact to be so intertwined that they cannot be separated” (Antonelli C. 1994 p. 205³⁶)

Une poignée de main entre Schumpeter et Taylor?

Quelle relation lie deux concepts apparemment aussi étrangers que ceux de *standardisation* et d'*innovation*? La standardisation évoque les postures routinières du travail à la chaîne, les rouages mécaniques des “temps modernes”. L’innovation s’associe plus volontiers à l’imprévu et à la création. L’association de ces deux mots peut donc paraître saugrenue à première vue. L’objectif de notre première partie consiste à introduire le cadre analytique dans lequel une telle alliance prend son sens. Nous arriverons ainsi à la conclusion que la *standardisation* est un mécanisme intimement lié à la production et au développement des technologies.

Cette partie inscrit notre propos dans le cadre de l’économie du changement technique et de l’innovation. Ce courant de recherche, né dans le sillage des travaux de Schumpeter, s’est depuis un demi siècle, intéressé à la technologie, comme facteur fondamental du développement économique. A une revue classique et générale d’une littérature abondante et variée, nous avons préféré une présentation agencée autour d’un concept clé, celui de “*trajectoire technologique*”.

Cela nous paraît justifié, dans la mesure où mettant en évidence des transversalités entre les écoles, une telle démarche permet de rendre compte fidèlement des relations entre innovation et standardisation.

L’élaboration du concept de *trajectoire technologique* (³⁷), progressive au cours des années 1980, a marqué une rupture radicale dans la théorie économique de la technologie, et dans la compréhension des relations existant entre progrès technique et croissance économique, en restituant à la technologie une épaisseur temporelle et spatiale. De nouveaux types de questionnement ont été autorisés par cette évolution: Pourquoi une technologie prend elle une forme plutôt qu’une autre? Comment les technologies entre t-elles en compétition?

Cette rupture, comme le note Zuscovitch (³⁸) a permis à l’économie du changement technique de sortir d’une vision monolithique et indifférenciée de *la technologie*, caractéristique des premières théories

³⁶ Antonelli C. (1994) “Localised technological change and the evolution of standards as economic institutions” in: Information Economics and Policy, Vol 6, pp. 195-216.

³⁷ Nelson et Winter ont élaboré ce concept à l’occasion de la formulation de leur théorie évolutionniste. Voir Nelson, R., Winter, S. (1977) “In Search of a Useful Theory of Innovation” in: Research Policy, Vol 6, n°1, pp. 36-76; Nelson, R., Winter, S. (1982) *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Belknap Press of Harvard UP. Pour approche très similaire en gestion, Abernathy, W. et Utterback, J. (1978) “Patterns of Industrial Innovation” in: Technology Review, Vol 80, n°7, June 1978, pp.40-47.

³⁸ Zuscovitch, E. (1985) “La dynamique du développement des technologies. Eléments d’un cadre conceptuel” in: Revue Economique, n°5, septembre 1985, pp. 897-915

de la diffusion. Les nouvelles théorisations ont introduit une analyse “*dynamique du développement des technologies*”.

Trajectoire technologique

Le concept de *trajectoire* cherche à rendre compte de la continuité temporelle et spatiale des technologies. Il tisse un lien invisible entre une multitude d’objets d’apparences diverses. Ainsi, à l’énoncé du terme “automobile”, nous savons avec certitude qu’il s’agit d’un véhicule doté d’un moteur à explosion, de quatre roues, d’un châssis, de portières latérales, de phares etc. En d’autres termes, l’idée d’“automobile” met en relation une série d’objets destinés au transport personnel, indépendamment des pays, et des années. La carrosserie peut bien être plus arrondie, ou d’une autre couleur, les techniques de production peuvent évoluer, reste qu’il nous est aisé de reconnaître les points communs constituant “l’automobile”. Cette stabilité, dans le temps et l’espace, illustre le caractère cumulatif de la technologie, sous-tendu par l’existence de ce qu’il est convenu d’appeler des *interdépendances technologiques* ⁽³⁹⁾. Le concept de *trajectoire* propose donc de passer outre les différences individuelles, et de reconnaître des familles et des générations de technologies, évoluant solidairement les unes par rapport aux autres. Les changements et les différences ne sont donc pas considérés comme le fruit du hasard. Ils correspondent à une logique d’évolution et de développement, traçant une voie, un chemin technologique dont les différentes étapes sont interdépendantes et cumulatives.

L’introduction du concept de trajectoire technologique a donc logiquement entraîné la mise en évidence de phénomènes d’apprentissage correspondant à la progressive accumulation de connaissances permettant la production d’une succession de biens ou de procédés et expliquant leur proximité. Il a également permis la mise en évidence de créations concomitantes d’irréversibilités, c’est à dire la progressive restriction de l’univers des choix technologiques possibles, conjointement à l’accumulation technologique.

L’analyse dynamique de la technologie révèle un premier paradoxe: *pour profiter du caractère cumulatif de la technologie, il faut concentrer les investissements sur quelques alternatives, en abandonnant une multitude de pistes potentielles.*

³⁹ Frankel, M. (1955) “Obsolescence and Technological Change in a Maturing Economy” in: *American Economic Review*, Vol 45, pp. 296-319. Foray, D. (1992) “Introduction générale” in: Foray, D., Freeman, C. (eds) *Technologie et richesse des nations*. Economica. Pp.1-38.

Création et destruction de variété

Cette proposition, largement admise aujourd'hui par les spécialistes de l'innovation, met l'accent sur l'importance des *dispositifs de création et de maintien de la variété technologique*, ainsi qu'inversement, sur les *dispositifs de sélection* permettant de limiter cette variété. Ces deux types de dispositifs constituent les deux faces d'une même médaille. Il existe une tension entre, d'une part, la création et le maintien d'une variété d'alternatives technologiques au prix d'une faible cumulativité, et d'autre part, la concentration des efforts sur un petit nombre d'options technologiques qu'il va être possible d'approfondir.

En conservant cette vision du développement technologique à l'esprit, la relation existant entre innovation et standardisation s'éclaire en partie: la standardisation constitue l'un des principaux dispositifs de sélection technologique. La standardisation assume une fonction de réduction de la variété technologique, essentielle au développement cumulatif de la technologie. En fixant, en stabilisant certaines décisions techniques, en poussant à choisir une alternative parmi des technologies en concurrence, la standardisation permet à l'accumulation technologique de se produire.

Les deux paragraphes précédents permettent de saisir pourquoi la standardisation intéresse tant les économistes de l'innovation. Il est possible également de saisir la pertinence des réflexions de David en matière de standardisation lorsqu'il lance son étonnante proposition:

“The kernel of the problem posed for private and public decision-making with regard to the setting of technology standards may be construed to be nothing more and nothing less than the fundamental issue with which all social organizations are confronted: where to position themselves on the terrain between the poles of ‘order’ and ‘freedom’” (David, 1995, p. 18).

Le management de l'innovation et les politiques technologiques doivent s'affronter à cette tension paradoxale et arbitrer entre variété et standardisation technologique. Nous allons présenter la validité de ces propositions et leurs enjeux dans le chapitre qui suit.

Présentation de la première partie

Dans une première partie nous serons amenés à évoquer la dynamique de l'économie du changement technique, progressivement devenue économie de l'innovation. C'est en effet à partir de ce cadre historique d'ensemble que nous souhaitons rendre compte de l'émergence et de l'intérêt des théories de la standardisation. Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, un intérêt croissant s'est manifesté pour comprendre par quels moyens le progrès technique irradie au coeur du tissu industriel, et génère une croissance de l'économie. Depuis les années 1950, les théories de la croissance, sous l'impulsion de Solow, ont repéré le progrès technique comme la variable essentielle permettant à une économie de croître durablement. Cette question rejoint les questions centrales de l'économie depuis son origine, d'Adam Smith et sa théorie de la division du travail comme source de la richesse des nations, à Schumpeter et son analyse entrepreneuriale de l'innovation comme source des cycles et de la croissance économiques. Dans ce paysage d'ensemble, la question de la diffusion, dont l'un des auteurs emblématique est E. Mansfield⁽⁴⁰⁾, a représenté un progrès important dans l'identification des mécanismes microéconomiques par lesquels la technologie se transforme effectivement en croissance. Ces travaux, malgré les limites qui leurs sont reconnues aujourd'hui, ont grandement contribué à spécifier les mécanismes par lesquels le progrès technique se répand effectivement dans le tissu économique. Ils ont stimulé un nombre important de recherches, critiques ou non, contribuant ainsi à structurer en profondeur le champ de ce qui allait devenir l'économie du changement technique de l'après guerre.

Notre second chapitre sera l'occasion de présenter le concept de trajectoire technologique. Nous nous efforcerons de présenter les formulations données de ce concept au sein de différentes traditions de recherche, et de montrer, qu'au delà des écoles, l'existence de trajectoires technologiques fait l'objet d'un large accord et trace une frontière entre 'anciens et modernes'. Les débats constitutifs de l'économie du changement technique mettent en évidence un profond désaccord sur ce qu'est la technologie. Pour les uns, la technologie s'identifie à un objet matériel qui parcourt la société en la transformant. Pour les autres, elle est un élément immatériel, une base de savoir, une série de principes, dont les facettes multiples se révèle sous la forme de familles d'objets techniques. L'idée de trajectoire technologique a permis de mettre en évidence l'existence de cycles de développement des technologies, composées de deux phases principales: une phase exploratoire, durant laquelle un véritable *espace technologique* voit le jour; suivie d'une phase de standardisation, durant laquelle la compétition débouche sur l'approfondissement de quelques voies technologiques singulières.

⁴⁰ Mansfield, E. (1961) "Technical Change and the Rate of Imitation" in: *Economica*, Vol 29, n°4, pp. 741-766.

Notre troisième chapitre sera consacré à l'exposé d'une étude de cas, celle du développement des technologies *du haut fourneau à injection*. Cette étude autorise la confrontation entre l'état des connaissances théoriques sur le développement technologique et les données empiriques. Une attention toute particulière sera accordée au repérage du développement de ces technologies formant une famille, un espace, dont la dynamique, composée de différentes phases, a pris la forme d'une compétition technologique entre différentes alternatives. La présentation de cette étude de cas permettra d'exposer des arguments sur l'existence, l'étendue et les enjeux représentés par les phénomènes de standardisation dans le développement technologique. Deux points principaux seront soulignés. On verra que les théories de la standardisation, au prix d'un certain recentrage, offrent l'opportunité d'un profond renouvellement des théories économiques de la diffusion et proposent de ces phénomènes une analyse pertinente. De plus, conformément aux enseignements de Nathan Rosenberg, nous montrerons que les analyses de la standardisation prennent véritablement toute leur dimension lorsque l'analyse économique s'intéresse au contenus technico-économiques.

Nous concluons ce chapitre par un retour à la théorie, et singulièrement par une présentation de ce qui constitue, à notre sens, les principales limites rencontrées par l'économie de la standardisation, dans l'analyse des relations entre standardisation et innovation.

Chapitre 1: La question de la diffusion

“If anyone has in him all that pertains to success under these circumstances, and if he can obtain the necessary credit, then he can put a unit of product on the market more cheaply, and, if our three conditions are realised, make a profit which remains in his pocket. But he has also triumphed for others, blazed the trail and created a model for them which they can copy. They can and will follow him, first individuals and then the crowds” (Schumpeter, J. (1934), p. 133).

Quels sont les mécanismes fondamentaux qui permettent aux innovations de se diffuser? Comment les idées marquantes, les inventions géniales, sont-elles repérées, reproduites et distribuées dans nos sociétés? Etant donné la cascade d'inventions géniales qui naissent à chaque instant sur la planète, comment expliquer que certaines tombent irrémédiablement dans les limbes de l'oubli collectif alors que d'autres connaissent le succès et la gloire et peuplent la vie quotidienne de millions d'êtres humains? Voilà des questions qui touchent au fondement de l'économie et de sa dynamique, et qui ont fait couler beaucoup d'encre chez les économistes. C'est à cette question de la diffusion que nous consacrerons notre premier paragraphe: il présente brièvement l'état des connaissances acquises en la matière depuis que Schumpeter en a fixé le cadre, à partir de sa théorie du profit de l'innovateur. Nous verrons que les théories de la diffusion avaient posé les bases d'une analyse trajectorielle de la technologie, sans pour autant réussir à les exploiter réellement.

La question de la diffusion fait précisément partie des thèmes sur lesquels l'accumulation de recherches et de réflexions a été particulièrement forte et fructueuse ⁽⁴¹⁾. Les premiers travaux sur cette question ont débuté dans l'immédiat après-guerre, et presque essentiellement aux Etats Unis, dans la mouvance des travaux macro-économiques sur la croissance ⁽⁴²⁾.

I.A La diffusion, élément indispensable à la croissance

“An economy is not affected in any material way by new technology until the use or ownership of that technology is widespread” (Stoneman, 1983, p.65 ⁽⁴³⁾)

Les avancées réalisées dans la compréhension des fondements macro-économiques de la croissance ont mis en valeur le rôle essentiel de la technologie. Les travaux menés dans la période d'après guerre ont ainsi indiqué que plus les innovations étaient diffusées, plus le 'progrès technique' était soutenu au niveau agrégé, plus les gains de productivité étaient élevés dans l'économie nationale et plus la croissance et le développement étaient forts ⁽⁴⁴⁾.

Comme l'a souligné Mansfield, ⁽⁴⁵⁾, si l'influence bénéfique de ce qui était couramment nommé le 'progrès technique' était largement admise parmi les économistes, la nature de celui-ci est demeurée

⁴¹ Freeman, C. (1994) “The economics of technical change” in: *Cambridge Journal of Economics*, Vol 18, pp. 463-514.

⁴² Solow, R. (1956) “A Contribution to the Theory of Economic Growth” in: *The Quarterly Journal of Economics*, Vol 70, n°1.,

⁴³ Stoneman, P. (1983) *The Economic Analysis of Technological Change*. Oxford UP.

⁴⁴ Pour une présentation, JJ Salomon, G. Schméder (1986) *Les enjeux du changement technologique*. Economica.

⁴⁵ Mansfield, E. (1968) *Industrial Research and Technological Innovation*. Norton & Co.

largement mystérieuse, et se limitait à un facteur résiduel et exogène ⁽⁴⁶⁾: “*Les théories de la croissance et les analyses du progrès technique (étaient) relativement déconnectées*” ⁽⁴⁷⁾.

Ce n'est qu'au milieu des années 1980, avec les théories de la croissance endogènes, que la technologie a gagné ses lettres de noblesse, et qu'elle a été intégrée comme variable à part entière des modèles de croissance ⁽⁴⁸⁾. Désormais, comme le notent Silverberg et Alii: “*The diffusion of new products and new processes of production within and between business enterprises is clearly one of the fundamental aspects of the process of growth and transformation of contemporary economies*” ⁽⁴⁹⁾. L'histoire semble rendre justice à la théorie schumpétérienne du développement économique, fondée sur l'innovation et sa diffusion au coeur de l'économie.

L'idée fondamentale du thème de la diffusion est simple: l'innovation n'a de poids économique que si elle se diffuse largement - “*Because an innovation will not have its full economic impact until the imitation process is well under way, the rate of imitation is of considerable importance*” (Mansfield, 1961, p. 762)-. A ce titre, la question de la diffusion fait le lien entre l'innovation et la croissance, entre les décisions micro-économiques et leurs conséquences macroéconomiques: “*Indeed, any economic study which relates economic growth and development to technological change involves implicit or explicit assumptions about the way innovations, once originated in some points of the economic system, spread over the system itself.*” ⁽⁵⁰⁾. Une invention n'a aucun impact sur l'économie tant qu'elle n'est pas largement utilisée sous forme de produits ou de procédés - ou selon la formule de Schumpeter “*as long as they are not carried into practice, inventions are economically irrelevant*” (Schumpeter, 1934, p.88). Mansfield et ses collègues se sont donc efforcés de comprendre les phénomènes de généralisation des technologies, la mécanismes de transformation des innovations en “progrès technique”.

IB. Une approche en deux temps

⁴⁶ En utilisant le cadre néo-classique, Solow et Abramovitz sont arrivés au même résultat, un résidu qu'ils ont attribué au progrès technique. Selon la phrase d'Abramovitz, le progrès technique mesuré sous cette forme était surtout une mesure du décalage entre la cadre théorique utilisé et celui qui aurait été nécessaire à la compréhension de la croissance, “*measure of our ignorance*” Abramovitz, M. (1956) “Resource and Output Trends in the United States since 1870” in: American Economic Review, May 1956.

⁴⁷ Boyer, R. (1992) “La révolution des modèles. Introduction” in: Foray, D., Freeman, C. (eds) Technologie et richesse des nations. Economica. Pp. 103-119.

⁴⁸ Romer, P. (1986) “Increasing Returns and Long Run Growth” in: Journal of Political Economy, Vol. 94, n°5, p. 1102-1037.

⁴⁹ Silverberg G., Dosi G., Orsenigo L. (1988) “Innovation, Diversity and Diffusion: A Self-organisation Model” in: The Economic Journal, Vol 98, December 1988, pp. 1032-1054.

⁵⁰ Lissoni F, Metcalfe J. (1994) “Diffusion of Innovation Ancient and Modern: A Review of the Main Themes.” in: Dodgson M., Rothwell R. (eds) (1994) *The Handbook of Industrial Innovation*. Edward Elgar. pp.106-141.

Les premiers économistes à avoir pris au sérieux la question de la diffusion ont été Griliches et Mansfield (⁵¹). Dans le modèle Schumpétérien (⁵²), les firmes innovatrices, bénéficiant d'un avantage compétitif et d'une quasi-rente, sont rapidement imitées par d'autres. Ces dernières, attirées par les gains réalisés, transforment leur outil de production : ce mécanisme d'imitation fonde la diffusion de nouveaux produits et procédés dans l'économie et engendre le progrès technique et la croissance. Griliches et Mansfield se sont donc glissés dans ce cadre théorique pour s'intéresser de plus près au comportement des agents et entreprises que Schumpeter a qualifié d'imitatrices (⁵³). Leur approche s'est composée de deux volets essentiels: l'un a consisté à instrumenter, et à mesurer le phénomène d'imitation', et le second s'est efforcé de donner une explication aux phénomènes observés.

Mise en évidence de courbes de diffusion et de taux d'imitation

L'instrumentation du phénomène d'imitation a abouti à la révélation de l'existence, pour chaque nouvelle technologie, d'une courbe et d'un taux de diffusion aisément calculables. Force études empiriques sont ainsi venues confirmer le même résultat: la généralisation d'une nouvelle technologie dans un milieu d'adopteurs potentiels prend systématiquement la forme d'une courbe sigmoïde (⁵⁴).

Ce résultat a été obtenu à partir des hypothèses suivantes (⁵⁵):

⁵¹ Les bases de ces modèles ont été présentés respectivement dans Griliches, Z. (1957) "Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change" in: *Econometrica*, Vol. 25, n°3, October 1957, pp. 501-522. Mansfield, E. (1961) "Technical Change and the Rate of Imitation" in: *Econometrica*, Vol 29, n°4, pp. 741-766. Mansfield fustige l'incapacité de Solow à rendre compte du changement technique dans Mansfield E. (1968) *Industrial Research and Technological Innovation*. Norton & Co. Il développe une théorisation fondée sur deux volets: l'innovation - basée sur la R&D - et l'imitation - basée sur l'acquisition par les firmes de nouveaux procédés.

⁵² Schumpeter, J. (1934) *The Theory of Economic Development*. Harvard UP.

⁵³ La filiation Schumpeterienne est explicitement exprimée par Mansfield: "Economists have long been interested in the process whereby new techniques spread from firm to firm; but until recently our knowledge of its workings did not extend far beyond Schumpeter's simple assertion that once a firm introduces a successful innovation, a host of imitators appear on the scene." Mansfield, E. (1963) "The Speed of Response of Firms to New Techniques" in: *Quarterly Journal of Economics*, Vol 67, May 1963, pp. 290-309.

⁵⁴ Les courbes sigmoïdes sont aussi connues sous le doux nom de courbe en S, ou 'S-shaped'. Dans son article de référence Mansfield (1961) compare ainsi les courbes de diffusion de 12 innovations majeures de l'industrie sidérurgique, de l'industries ferroviaire, de l'industrie minière et de la brasserie industrielle.

⁵⁵ Notons l'existence d'une autre classe de modèles, qualifié de 'Probit model' pour lesquels les hypothèses (1) (2) et (3) doivent être remplacées: le milieu d'adopteurs potentiel n'est pas fermé mais ouvert, et varie en fonction des profitabilités spécifique (spécificités de l'adopteur ie économies d'échelles possibles) et globale (prix des facteurs et améliorations techniques), elles mêmes variables. Dans ce modèle, la diffusion repose sur une succession de décisions individuelles indépendantes, fonction des profitabilités d'usage. Les modèles Probit se demandent pourquoi et à quel moment une entreprise adopte une nouvelle technologie. Le modèle de Mansfield se demande comment une technologie se diffuse dans le milieu économique.

- (1) l'existence d'un milieu d'adopteurs potentiel fixe et identifiable correspondant à chaque nouvelle technologie
- (2) la circulation - contagion de l'information par contact informel ('word-of-mouth')
- (3) l'équivalence de toutes les adoptions entre elles (l'innovation est identique pour tous)
- (4) la possibilité d'agréger les décisions d'adoptions en une courbe de taux d'imitation ('rate of imitation') (⁵⁶)
- (5) la possibilité d'interpréter la courbe obtenue (et la fonction correspondante) comme étant la trajectoire de diffusion de l'innovation ou "time-path".

Une fois posée l'existence d'une courbe de diffusion, et obtenue une régularité exprimable sous la forme d'une loi fonctionnelle - à chaque nouvelle technologie correspond un taux de croissance intrinsèque (Mansfield 1961) - restait à développer une explication de ce phénomène.

Une analyse centrée sur le différentiel de vitesse de diffusion

Les deux auteurs ont développé leur analyse à partir d'une hypothèse simple: plus une innovation se répand rapidement dans un milieu économique, plus les effets de la diffusion sont bénéfiques - la vitesse de diffusion conditionne l'ampleur du progrès technique. Le problème central traité par ces théories consiste donc à modéliser la vitesse avec laquelle une nouvelle technologie pénètre un milieu en équilibre (firme, région, industrie, Etat) (⁵⁷). L'identification des courbes sigmoïdes a ouvert une série de questions nouvelles.

Pourquoi une technologie nouvelle se diffuse-t-elle à une certaine vitesse (non aléatoire)? Griliches et Mansfield ont tous deux avancé le rôle de la "profitabilité": plus une innovation est profitable - plus l'avantage compétitif est élevé - plus sa diffusion est rapide et moins le décalage ('time lag') entre le moment où l'innovation est disponible et le moment où l'innovation est diffusé est important (⁵⁸).

⁵⁶ Un indicateur souvent utilisé dans ce type d'approche est composé du nombre d'adopteurs effectifs sur le nombre d'adopteurs potentiels. Gold, B. (1981) "Technological Diffusion in Industry: Research Needs and Shortcomings" in: The Journal of Industrial Economics, Vol 29, n°3, pp. 247-269.

⁵⁷ Les auteurs ont peu étudié les effets croisés de la rencontre entre "milieux" et "technologie", mais il était supposé, de façon hypothétique, que l'innovation, en se diffusant dans le milieu, génère la croissance de celui-ci.

⁵⁸ Cela a permis de clarifier certaines controverses, comme celle de la taille idéale de la firme innovante, de l'existence de firmes occupant la position de "leader technologique", ou celle de l'influence de la conjoncture économique sur la propension des firmes à investir dans des innovations: pour Mansfield et Griliches, la seule corrélation sérieuse qu'il soit possible de mettre en évidence de façon stable est l'influence de la "profitabilité" intrinsèque de l'objet diffusé. En fonction des textes, Mansfield qui a été particulièrement prolyxe sur ces questions évoque également tantôt le niveau d'utilisation des capacités, la taille des firmes, ou l'importance de l'investissement nécessaire, la durabilité des biens considérés... Griliches évoque également, et cela est original, les anticipations des fournisseurs de l'innovation, qui peuvent décider de les produire en priorité pour des régions à fort potentiel.).

Comment expliquer l'existence même d'un 'time lag', d'un temps de latence, entre l'arrivée sur le marché d'une nouvelle technologie, plus profitable que les précédentes, et sa diffusion complète? Du point de vue de l'analyse standard, si une nouvelle technologie, supérieure à ses concurrentes, arrive sur le marché, sa généralisation devrait être immédiate. Rien ne justifie qu'elle ne soit pas adoptée instantanément par tous les adopteurs potentiels - l'existence d'une courbe de diffusion est donc une curiosité théorique, du point de vue du marché de la concurrence pure et parfaite. Pourtant dans la réalité "*the diffusion of a new technique is generally a rather slow process*" (Mansfield, 1961, p. 744). De ce point de vue, la courbe de diffusion suggère que la main invisible du marché met en relation une nouveauté technologique et son marché de façon progressive.

Comment expliquer la forme (en S) des courbes de diffusion des technologies? Cette question est celle qui a donné lieu aux débats les plus passionnés, expliquant en partie la diversité des modèles, que l'on peut classer par degré de fidélité plus ou moins forte à la théorie standard. Les interprétations peuvent être classées en deux grandes catégories. La première met en valeur la dynamique collective des entreprises imitatrices, et l'imperfection de l'information. Selon Mansfield la proportion de firme ayant déjà adopté la nouvelle technologie considérée, influence positivement le taux de diffusion: "*As more information and experience accumulate, it becomes less risky to begin using it. Competitive pressure mount and 'bandwagons' effects occur*" (Mansfield, 1961, p.745). La forme de la courbe reflète, dans sa partie fortement croissante, la réduction progressive du risque associé à l'adoption de l'innovation d'une part⁽⁵⁹⁾, et d'autre part la pression concurrentielle croissante associée à l'avantage compétitif procuré par l'innovation⁽⁶⁰⁾. A l'inverse, le taux de croissance tend à s'épuiser sur la fin de la période du fait du nombre de plus en plus limités d'adopteurs potentiels n'ayant pas encore adopté l'innovation. La seconde série d'interprétations, plus respectueuses des hypothèses de la théorie standard, a mis en évidence l'hétérogénéité des adopteurs, que celle-ci soit 'subjective' (aversion au risque) ou 'objective' (prix relatifs, profitabilité)⁽⁶¹⁾.

⁵⁹ Risque = "*extent of the uncertainty concerning the profitability and rate at which this uncertainty declines*" (Mansfield, 1961, p. 745). Dans le modèle de Mansfield "*le processus de propagation de l'innovation est structuré par la diminution de l'incertitude*". Le Bas, C.; Sylvestre-Baron, P.(1995) "Diffusion technologique non binaire et schéma épidémiologique. Une reconsidération" in: *Economie Appliquée*, tome 48, n°3, pp. 71-101

⁶⁰ Comme le soulignent également Gold et ses collègues, les entreprises n'adoptent pas une nouvelle technologie seulement par attrait pour la rente de l'innovateur, mais aussi par crainte de pertes liées à l'obsolescence. Gold, B.; Rosegger, G., Boylan M. (1980) *Evaluating Technological Innovations. Methods, Expectations, and Findings*. Lexington Books.

⁶¹ Griliches (1957) et Mansfield (1963) soulignent le rôle de la profitabilité, variable d'une exploitation agricole, et d'une entreprise à l'autre. Mansfield ajoute les capacités financières de l'entreprise. Les modèles dits 'probit' sont probablement les plus 'objectivistes': dès que le seuil critique (bénéfice-coût) est franchi, l'adopteur adopte. Le modèle considère la profitabilité individuelle, mais également ses fluctuations (innovation incrémentale, prix relatifs). Davies, S. (1979) *The Diffusion of Innovations*. Cambridge UP; David, P. (1986) "La moisonneuse et le robot" in: Salomon, Schméder (eds) op cit.pp.109-130. Les modèles dits bayésiens représentent une forme hybride. Stoneman, P.(1983) *The Economic Analysis of Technological Change*. Oxford UP.

Structuration de l'économie du changement technique

Nous retiendrons de cette présentation l'apport conceptuel fondamental, qui a véritablement ouvert la voie à l'économie du changement technique et de l'innovation. En laissant de côté les marchés, les entreprises, et les biens échangés - éléments rassurant du paysage familier aux économistes - les pionniers de la diffusion sont sortis du terrain d'investigation privilégié de l'économie. Ils se sont aventurés sur une terre largement inconnue jusqu'alors, celle de la technologie. Leur tour de force a consisté à montrer qu'il était tout à fait possible et pertinent de rendre justice de phénomènes longtemps considérés comme purement technologiques et exogènes -la dynamique technologique- à partir de calculs économiques rigoureux, respectant les hypothèses principales de rationalité économique. Ils ont ainsi scellés l'acte de naissance définitif d'une théorie de la diffusion technologique qui allait devenir une part essentielle de l'économie du changement technique (Freeman, 1994). La légitimité d'une telle démarche a tenu à l'adoption d'un cadre heuristiquement proche de celui des analyses néo-classiques, et à la mobilisation de concepts interprétatifs similaires à ceux utilisés dans le cas des marchés de biens et services.

Les prolongements et l'influence de ces travaux sur l'économie du changement technique ont été considérables. Empiriquement, le cadre diffusionniste ainsi posé a ouvert la voie au développement de multiples études chargées de mesurer la capacité d'un milieu - une entreprise, un pays ⁽⁶²⁾, ou une branche industrielle ⁽⁶³⁾ à absorber le progrès technique (Freeman 1994). Une véritable polémique a ainsi vu le jour aux Etats Unis à l'occasion de l'introduction d'une nouvelle technologie, les acéries à l'oxygène. Certains économistes ont sévèrement critiqué la lenteur de l'industrie sidérurgique américaine à adopter cette nouvelle technologie, conduisant selon eux, à la mise en péril de la compétitivité américaine par rapport à des concurrents comme le Japon ⁽⁶⁴⁾.

Les premiers travaux ont eu pour intérêt principal de ramener la dynamique technologique à des lois relativement simples et relativement indépendantes des milieux de diffusion: la technologie entrainait de plein droit dans l'analyse économique. Les résultats obtenus à partir de ces premiers modèles sont

⁶² Pour une hybridation du modèle mansfieldien et d'un modèle macroéconomique: Norotte, M., Bensaïd, J. (1987) "Comportements d'investissement et diffusion de nouvelles technologies" in: Economie et Prévision, Vol 80, pp. 53-67.

⁶³ Mansfield, E. (1968) op cit. sur la diésélisation des locomotives; Romeo, A. (1977) "The Rate of Imitation of a capital-Embodied Process Innovation" in: Economica, n°44, pp.63-69 sur la diffusion des machines outils.

⁶⁴ Pour ne citer que les principales références: W. Adams, J. Dirlam (1964) "Steel Imports and Vertical Oligopolopoly Power" in: The American Economic Review, Vol 54, September 1964, pp. 626-655; A. McAdams (1967) "Big Steel, Invention, and Innovation, Reconsidered" in: The Quarterly Journal of Economics, Vol 81, August 1967, pp. 457-482; G. Rosegger (1967) "Steel Imports

cependant rapidement apparus relativement frustrés. Ainsi, l'une des principales critiques formulée à leur rencontre par les générations suivantes d'économistes, a dénoncé le caractère statique et connu d'avance à la fois de l'objet et du milieu dans lequel il se diffuse. Une série de nouveaux travaux ont ainsi été lancés, dans les années 1980, insistant tantôt sur la nécessité d'établir des modèles plus sophistiqués, tantôt sur la nécessité de mieux appréhender la nature et la dynamique de l'innovation.

and Vertical Monopoly Power: Comment" in: The American Economic Review, Vol 57, September 1967, pp. 913-917; L. Lynn (1982) *How Japan Innovates*. Boulding Westview.

Chapitre 2: **Le concept charnière de trajectoire technologique**

“Dans la théorie orthodoxe une trajectoire technologique est le lieu du mystère qui entoure la croissance économique” Michael Piore ⁽⁶⁵⁾.

II. A. un contexte théorique renouvelé.

Michael Piore exprime une idée essentielle: le concept de trajectoire technologique représente l'espace dans lequel se noue le mystère de la relation entre technologie et croissance. Ainsi que le souligne l'auteur, il est difficile de saisir cette relation à partir d'une approche générale: il faudrait sans doute préférer parler des relations spécifiques entretenues entre des technologies et des croissances. Ce caractère

⁶⁵ Piore, M. (1991) “Nouvelles remarques sur les trajectoires technologiques” in: Boyer, R., Chavance, B., Godard, O. (eds) *Les figures de l'irréversibilité en économie*. EHESS. Pp.137-149.

cumulatif et dynamique des technologies a été mis en valeur par toute une série de travaux récents portant sur le développement économique et industriel.

1) Vers une meilleure compréhension des phénomènes de croissance et de compétitivité

“The macro economy is not simply the aggregate of various micro units but is regarded also as a complex network of micro relationship.” (B. Carlsson et R. Stankiewicz, 1995 ⁶⁶)

Une série d’avancées en économie du commerce international a permis de mieux préciser le contexte des relations nouées entre spécialisation technologique d’un pays (⁶⁷), compétitivité, et croissance à long terme (⁶⁸). L’ensemble de ces travaux souligne le rôle éminent de l’accumulation de certaines compétences technologiques nationales dans des secteurs industriels particuliers, formant des pôles de croissance compétitifs. Amable note ainsi l’enjeu stratégique à long terme que représente, pour un pays, la capacité de se spécialiser sur des technologies à fort potentiel de croissance et à fort potentiel de progrès technique, à l’instar des succès enviés du Japon (⁶⁹). Les politiques technologiques se trouvent ainsi au coeur d’une active réflexion. Comme le notent Carlsson et Stankiewicz, progressivement, les macro-économistes et les économistes industriels s’accordent à reconnaître la technologie comme l’élément de base de la dynamique industrielle: *“It is the nature and role of technology as a base for industrial development and economic growth which is the primary focus”* (Carlsson, 1995, p. 22).

La poursuite d’une stratégie délibérément positionnée sur des secteurs technologiques considérés comme ‘porteurs’ n’est pourtant pas suffisante (Amable 1992). Encore faut il que la nation considérée bénéficie d’un ‘cadre institutionnel’ favorable à l’établissement d’une relation vertueuse entre technologie, compétitivité internationale et croissance.

Le concept débattu de *système national d’innovation* met l’accent sur l’épaisseur organisationnelle et institutionnelle du progrès technologique (⁷⁰)(⁷¹). Les théorisations les plus stimulantes sur la question du développement industriel mettent ainsi l’accent sur les relations entre dynamique du tissu industriel et

⁶⁶ In: Carlsson, B., (ed) (1995) *Technological Systems and Economic Performance: the Case of Factory Automation*. Kluwer. Pp. 21-56.

⁶⁷ Pourquoi Paris demeure t’elle la capitale de la mode? Pourquoi la Suède et le Japon sont ils si performants dans le secteur des machines outils? Pourquoi l’Allemagne connaît t-elle un tel succès dans le domaine automobile? Salais, R., Storper, S. (1994) *Les mondes de production*. EHESS

⁶⁸ Krugman, P. (ed) (1986) *Strategic Trade Policy and the New International Economics*. MIT Press, Lucas, R. (1988) “On the mechanics of Economic Development” in: *Journal of Monetary Economics*, Vol 22, pp. 3-42.

⁶⁹ Amable, B. (1992) “Effets nationaux d’apprentissage, spécialisation internationale et trajectoires de croissance” in: Foray, D., Freeman, C. (eds) *Technologie et richesse des nations*. Economica. Pp. 213-231.

⁷⁰ Freeman, C. (1988) “Japan: a New National System of Innovation?” in: Dosi, G. et Al. (eds) *Technical Change and Economic Theory*. Pinter. Lundvall, B. (ed) (1993) *National Systems of Innovation. Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*. Pinter. Nelson, R., Rosenberg, N. (eds) (1993) *National Innovation Systems. A Comparative Analysis*. Oxford UP.

⁷¹ Maurice, M., Sellier, F. et Silvestre, JJ. (1982) *Politique d’éducation et organisation industrielle en France et en Allemagne*. PUF

dynamique technologique ⁽⁷²⁾. Ces perspectives ont en commun de souligner l'importance de réseaux 'industriels' spécifiques progressant sur - ou assurant la progression de - sentiers spécialisés et compétitifs susceptible de générer progrès technique et croissance. Une bonne illustration a été donnée par Carlsson à partir du cas de l'automatisation en Suède ⁽⁷³⁾. Dans le cas de la Suède, la constitution de réseaux de coopération- compétition - 'systèmes technologiques' -formés d'instituts universitaires, de groupes d'entreprises productrices et de groupes d'entreprises utilisatrices de technologie a permis l'accumulation, le développement, l'utilisation, la valorisation de technologies qui ont assuré à ce pays un rôle de premier ordre dans ce domaine.

Par ailleurs, les stratégies technologiques s'inscrivent dans le cadre d'une compétition. La concurrence nouvelle - et en particulier du Japon - dans des secteurs traditionnellement fort de certains pays ont invité les économistes à analyser la spécialisation internationale sur la base d'une compétition technologique dynamique. La capitalisation de savoir faire et de structures économiques et institutionnelles enracinées dans l'histoire, si elle procure un avantage, ne permet pourtant pas de se trouver à l'abri d'un délogement rapide: on peut penser à l'industrie photographique allemande, à l'automobile, à l'électroménager, aux machines-outils et à la sidérurgie américaine, à l'industrie textile britannique, à l'horlogerie française, ou aux composants électroniques ⁽⁷⁴⁾ ... La compétition technologique et l'innovation ont pu aboutir à l'obsolescence rapide de réseaux technico-économiques performants ⁽⁷⁵⁾.

La technologie s'est trouvée inscrite dans un cadre tout à fait renouvelé. Les nouvelles théories du développement économique et de la croissance mettent en lumière à la fois sa dynamique, son caractère évolutif et cumulatif, son ancrage dans le tissu économique, et l'inscription de son développement dans un cadre coopératif- compétitif à géométrie variable. Les théories du changement technique se sont réarticulées autour du concept de trajectoire technologique.

⁷² Dahmén, E. (1989) "Development Blocks' in Industrial Economics" in: Carlsson, B. (ed) *Industrial Dynamics*. Kluwer. Carlsson, B., Jacobsson, S. (1992) "Systèmes technologiques et performances économiques: la diffusion de l'automatisation en Suède" in: Foray et Freeman, op cit. pp.80-99. Callon, M. (1991) "Réseaux technico-économiques et irréversibilités" in: Boyer, R. et Al. (eds) op cit. pp. 195-230.

⁷³ Carlsson, B. (1995) *Technological Systems and Economic Performance: The Case of Factory Automation*. Kluwer.

⁷⁴ Baldwin, R. et Krugman, P. (1988) "Market Access and International Competition: a Simulation Study of 16k Random Access Memories" in: Feenstra, R. (1988) *Empirical Methods for International Trade*. MIT Press.

⁷⁵ Jolivet, E. (1999) "Histoire d'un échec: la politique industrielle de la France de l'après-guerre dans le cas de la sidérurgie" Working Paper, Lest-CNRS, à venir

II. B Reformulation de la question de la diffusion.

L'idée selon laquelle la diffusion de l'innovation est essentielle à la croissance reste donc d'actualité. Comme le notent Carlsson et Jacobsson "*Les nouvelles technologies n'ont de poids que dans la mesure où elles ont un poids économique, c'est à dire si elles bénéficient d'une large diffusion et supplantent ce faisant les technologies antérieures.*" (Carlsson et Jacobsson, 1992, p.81). Pourtant, le concept de technologie a profondément évolué entre les premiers travaux et aujourd'hui, et l'économie du changement technique s'est transformée en 'économie du changement technique et de l'innovation'. La question de la diffusion s'en trouve radicalement reformulée et considérablement élargie.

1) **Les limites de l'approche des anciens à la lumière de l'économie de l'innovation**

"Within modern approaches, scholars are less concerned with the shape of diffusion curves and more concerned with articulating the underlying dynamic mechanism" ⁽⁷⁶⁾

1.1) Synthèse de l'approche diffusionniste

On peut résumer les principales hypothèses du modèle diffusionniste comme suit:

	Concept	Hypothèses
Logique technique	Progrès technique	1) La nouvelle technologie est supérieure à l'ancienne
Logique économique	Profitabilité	1) Le taux de diffusion est fonction de la profitabilité 2) La profitabilité est une qualité intrinsèque de la technologie 3) La nouvelle technologie est plus profitable que l'ancienne 4) Les agents sont capables de connaître la profitabilité
Milieu de diffusion	Firme, Région, Industrie, Pays	1) Il existe des groupes fixes d'utilisateurs potentiels 2) L'adopteur prend une décision unique 3) Les utilisateurs sont hétérogènes (taille, liquidités, information, aversion au risque, attitude innovante des managers)
Mesure	Courbe de diffusion Taux de croissance	1) La fonction est égale au nombre d'adopteurs actuels/ potentiels par le temps 2) L'origine de la courbe est la date de première adoption 3) La courbe de croissance est sigmoïde.
Effets	Le nouvel objet	1)Firme: avantage compétitif

⁷⁶ Lissoni, F., Metcalfe, J. (1994) "Diffusion of Innovation Ancient and Modern: A Review of the Main Themes" in: Dodgson, M., Rothwell, R. (eds) *The Handbook of Industrial Innovation*. Edward Elgar. p.107

	technique remplace l'ancien	2) Industrie: avantage compétitif 3) Nation: croissance macro-économique
Technologie	Objet technique	1) l'objet technique est stable

Ainsi que nous l'évoquions précédemment, une multitude de critiques ont été formulées au modèle diffusionniste, ouvrant la voie au développement d'une théorie de l'innovation.

1.2) Deux lignes de critiques

D'une approche statique à une approche dynamique de la technologie

La principale limite des modèles diffusionnistes tient à leur caractère statique: le milieu et la technologie demeurent inchangés tout au long de la période de diffusion. *“La première objection concerne le caractère statique du modèle qui décrit comment une innovation est diffusée dans un environnement inchangé, alors même qu'il est évident que l'innovation et l'environnement changent à mesure que se déroule le processus de diffusion”* (JL Gaffard 1990, p. 274⁷⁷). La dynamique telle qu'elle est représentée dans le modèle de la diffusion, très abstraite et agrégée, décrit la diffusion comme une mécanique, un mouvement mettant en scène un objet prédéfini se propageant dans un milieu préconstitué. Les tenants de cette vision des choses sont amenés à rigidifier et à simplifier arbitrairement à la fois le “projectile” et le “milieu”⁽⁷⁸⁾. L'hypothèse fondamentale sur laquelle repose tout l'édifice est alors l'idée du ‘progrès technique’, c'est à dire l'idée qu'une technologie nouvelle est nécessairement et immédiatement supérieure aux technologies existantes.

Deux auteurs, Gold en économie industrielle⁽⁷⁹⁾, et Rosenberg en histoire économique⁽⁸⁰⁾, se trouvent à l'origine d'une critique systématique des théories diffusionnistes, particulièrement cinglante sur son aspect statique. Les mises en cause ont porté sur un double front: le front de la théorie de l'innovation sous-jacente au modèle mansfieldien, et celui des analyses empiriques⁽⁸¹⁾. Les auteurs partagent le sentiment de la nécessité de dépasser le modèle diffusionnistes. Plusieurs points ont été l'objet d'avancées importantes:

⁷⁷ Gaffard, JL. (1990) *Economie industrielle et de l'innovation*. Dalloz.

⁷⁸ Akrich, M. (1989) “La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques” in: *Anthropologie et Sociétés*, Vol 13, n° 2, pp. 31-54. Latour B. (1986) “The powers of association” in Law J. (ed) *Power, Action and Belief. A New Sociology of Knowledge?*. in: *Sociological Review Monograph* 32. Routledge & Kegan Paul. pp. 264-280.

⁷⁹ Voir Gold, B., Rosegger, G., Boylan, M. (1980) *Evaluating Technological Innovations. Methods, Expectations and Findings*. Lexington Books et Gold, B. Peirce, W., Rosegger, G., Perlman, M. (1984) *Technological Progress and Industrial Leadership. The Growth of the US Steel Industry, 1900-1970*. LexingtonBooks.

⁸⁰ Rosenberg, N. (1982) *Inside the Black Box. Technology and Economics*. Oxford UP.

⁸¹ Rosegger démontre ainsi que la rapide diffusion du “BOF” -acéries à l'oxygène- dans l'industrie sidérurgique est inexplicable à partir du modèle de Mansfield. (Gold et Al. (1984)).

- (1) la technologie possède une dimension matérielle et immatérielle: *'accumulated pool of knowledge, skills, practices, and hardware'* (Gold et Al. 1984).
- (2) la technologie évolue continuellement à travers une série d'innovations. Cette instabilité rend délicat le choix d'un objet technique représentatif des différentes formes prises successivement par une technologie ('clusters' d'innovation).
- (3) les innovations matérialisent l'état d'avancement technologique à un certain moment ('embodiment').
- (4) les innovations se stabilisent progressivement avec leur usage et leur diffusion. L'activité innovative conduite par les entreprises joue un rôle essentiel dans le progrès technologique. Les entreprises saisissent les opportunités, mais développent aussi des solutions permettant de relâcher leurs contraintes de production (⁸²).
- (5) les utilisateurs potentiels forment une population mouvante.
- (6) la profitabilité d'une innovation, et sa supériorité par rapport aux technologies en place évoluent dans le temps avec sa stabilisation et l'exploration de ses usages possibles (⁸³).
- (7) les innovations sont l'objet d'un apprentissage (⁸⁴).
- (8) la profitabilité et l'efficacité dépendent étroitement de l'intégration de l'innovation dans un réseau d'interdépendances techniques et humaines avec lequel elle interagit. L'innovation se caractérise par une série d'investissements (⁸⁵).

L'innovation comme processus de création et de diffusion de la technologie

⁸² Pour Gold, c'est même parce qu'elle est modifiée que l'innovation se diffuse (adaptation). Il note également que ces changements peuvent expliquer la faible diffusion d'une innovation si les adopteurs anticipent une obsolescence rapide (Gold 1984).

⁸³ Les premiers adopteurs (ie 'les milieux' les plus 'innovatifs') ne sont pas nécessairement ceux qui tirent le meilleur parti économique de la diffusion. En d'autres termes, la diffusion prend du temps ('time lag') non seulement parce que les adopteurs sont hétérogènes, mais aussi parce que la mise au point d'une innovation et sa stabilisation prennent du temps, et que l'ancienne ('sailing ship effect') aussi bien que la nouvelle innovation et leurs contextes sont évolutifs.

⁸⁴ "How do firms come to know the economic properties of a new technology?" (Metcalf, JS (1988) "The diffusion of innovation: an interpretative survey" in: Dosi et Alii (eds) op cit. pp.560-589). Un large débat s'est ouvert entre les auteurs qui défendent l'idée que les firmes acquièrent une information externe, et ceux qui estiment que l'information est essentiellement le fruit d'un apprentissage interne.

⁸⁵ Rosegger note ainsi la difficulté d'analyser la 'substitution technologique': le remplacement d'une ancienne technologie par une nouvelle "after the interposition of an innovative process into an existing integrated production network, little in the system remains the same as before" (Gold 1980, p. 155). Il en résulte une extrême difficulté à attester que la nouvelle est supérieure à l'ancienne, du fait de leur incomparabilité partielle. Une approche moins 'naïve' consisterait à prendre en considération les 'modification costs' liés à la mise en place de la nouvelle technologie ('switching costs' d'Antonelli, 1994). Gold distingue différentes situations d'investissement: investissement dans une usine neuve, investissement pour remplacer une machine vétuste ou hors d'usage, investissement remplaçant une machine en fonctionnement et partiellement amortie, investissement pour prolonger une usine existante. Il fait également la distinction entre des situations dans lesquelles le taux d'utilisation des capacités et le 'product mix' varient. Rosegger met en évidence l'importance de la 'base installée' (ou "spécificité technologique" Rosegger 1979), c'est à dire du parc de machines en cours d'utilisation avec lesquelles l'innovation doit interagir (Farell & Saloner, 1986). Pour l'auteur, dans chacune de ces situations, le calcul économique est différent, et il est impossible d'établir a-priori qu'une adoption rapide soit toujours la meilleure solution.

Une seconde critique frontale du modèle diffusionniste concerne la séparation artificielle introduite entre création et diffusion technologique. Dans ce modèle, les deux étapes sont très clairement isolées l'une de l'autre: la diffusion démarre lorsque la technologie est parfaitement stabilisée et constituée. Cette approche tend à promouvoir une vision extrêmement linéaire du processus d'innovation⁽⁸⁶⁾.

Ainsi, malgré leurs natures "*fondamentalement enchevêtrées dans la réalité industrielle*", création et diffusion technologique font "*l'objet d'un traitement absolument séparé dans l'analyse économique*" (Foray, D., LeBas, C. (1986)⁸⁷). Pour faciliter l'analyse de la période de diffusion, les premières théories ont procédé au cloisonnement des fonctions de création et de diffusion. Elles ont sélectionné, pour ce faire, un objet technique déjà diffusé, et ont porté un regard retrospectif sur 'sa diffusion'. Cet amalgame temporel, entre l'objet final et les objets réellement diffusés au fil du temps, a entretenu l'illusion d'un objet stabilisé et unique traversant le cours du temps sans altération. La création technologique a ainsi pu être analysée de manière totalement séparée, et être assimilée jusqu'à récemment, exclusivement à la fonction de recherche et développement.

Les travaux récents montrent à l'inverse que la dynamique de l'innovation se joue dans les relations subtiles, les aller- retours entre création et diffusion. Les sources de l'innovation sont multiples: l'impulsion peut venir de la recherche, ou à l'inverse des utilisateurs. N. Rosenberg considère que bon nombre d'innovations n'ont pas trouvé leur source dans l'application à l'industrie d'avancées scientifiques nouvelles. L'auteur cite l'exemple de l'aviation: "*The rise of scientific understanding supporting aircraft design reflects a similar story. Again the technology, or a primitive version of it, came first, and the 'science' or engineering discipline developed to support it. Thus the frail apparatus that the Wright brothers managed to get airborne for a few seconds in 1903 had very little well-understood 'science' behind its design. However, the promise of those early flying machines gave rise to the modern disciplines of aerodynamics and aeronautical engineering.*" (Nelson, Rosenberg, 1993, p. 7)

Foray et Le Bas défendent un point de vue similaire à partir de l'étude menée par Foray sur la fonderie. Les deux auteurs citent ainsi l'exemple des 'modèles perdus en polystyrènes', exemple dans lequel la recherche technique a été stimulée par l'innovation industrielle: "*Tandis que l'apparition de*

⁸⁶ Rosenberg et Gold promeuvent une théorie micro-économique de l'innovation opposée au modèle linéaire prévalent jusqu'alors (modèle chain-link formalisé par Kline et Rosenberg (1986)).

⁸⁷ Foray, D., LeBas, C. (1986) "Diffusion de l'innovation dans l'industrie et fonction de recherche technique: dichotomie ou intégration" in: *Economie Appliquée*, tome 39, n°3, pp. 615-650.

l'innovation correspond à une avancée soudaine de la dynamique des connaissances techniques qui précèdent alors les savoirs scientifiques, les problèmes posés par l'application industrielle de l'innovation suscitent la mise en place de programmes de recherche conçus comme des tentatives de résolution systématique des difficultés qui entravent la diffusion des innovations considérées." (Foray, Le Bas, 1986, p. 636).

Le passage d'une théorie de la diffusion à une théorie de l'innovation se noue dans l'intégration, en un même et unique processus, de la création et de la diffusion technologique ⁽⁸⁸⁾.

Les deux principales critiques formulées à l'encontre des théories de la diffusion ont ouvert la possibilité de penser le développement technologique comme un mouvement possédant une forte cohérence. Elles ont également pointé les limites patentées des théories de la technologies dont étaient porteurs les travaux des années 1950.

2) **Le besoin de formulation d'une théorie du développement technologique**

2.1) Caractère multidimensionnel de la technologie.

Le passage des théories de la diffusion au concept de *trajectoire technologique* peut être résumé à une question élémentaire souvent négligée: qu'est ce qui se diffuse? Prise au premier degré, cette question paraît presque triviale, et la réponse imaginée par Mansfield et ses collègues vient assez facilement à l'esprit: les innovations se diffusent sous formes de biens matériels ou artefacts ⁽⁸⁹⁾. Les compagnies ferroviaires acquièrent des locomotives diesel, les agriculteurs américains et anglais des moissonneuses, les fermiers américains achètent des plants de maïs hybride, les usines sidérurgiques des acéries à l'oxygène....

Dans cette perspective, l'hypothèse d'unicité et de stabilité du bien tout au long de sa diffusion était indispensable. Dans les théories de la diffusion, la circulation d'un bien unique rend les adopteurs et les adoptions équivalents entre eux. Celle-ci trace un 'espace de diffusion' (Foray & LeBas 1986), et rend les agents comparables, mesurables et étudiables.

⁸⁸ Foray, D. (1992) "Les mécanismes de la standardisation" in: Foray et Freeman (eds) op cit., pp.235-239; Callon, M. (1992) "Variété et irréversibilité dans les réseaux de conception et d'adoption des techniques" in: Foray et Freeman (eds) op cit. pp. 275-324; Antonelli, C. (1992) "La dynamique des interrelations technologiques; le cas des technologies d'information et de communication" in: Foray et Freeman (eds) 323-341.

⁸⁹ Metcalfe, JS (1990) "On diffusion, investment and the process of technological change" in: Deiano, E., Hörmell, E., Vickery, G. (eds) *Technology and Investment. Crucial Issues for the 1990's*. Pinter

Si l'on souhaite accorder quelque crédit à cette théorisation, on peut considérer que par 'bien matériel identique', les auteurs entendaient -comme semble le suggérer le concept d'*imitation*' qu'ils emploient- les répliques exactes d'un même modèle. Dans ce cas, un développement complémentaire au raisonnement tenu consiste à reconnaître l'existence de modèles de référence génériques (Zuscovitch, 1985), durables et reproductibles.

Il découle de ces propositions que les biens qui circulent ne sont, en quelque sorte, que la partie matérielle d'un modèle unique, les représentants d'une 'technologie'. Lorsqu'ils parlent de diffusion du maïs hybride ou de la locomotive diesel, tout se passe comme si les diffusionnistes faisaient référence à l'existence d'un modèle se prolongeant dans sa reproduction à l'identique et se diffusant dans l'adoption multiple de copies qui lui sont conformes. Il découle logiquement, qu'en germe dans la théorisation mansfieldienne, la technologie est conçue comme une entité à deux dimensions -(1) une dimension structurelle ou informationnelle ou générique (l'innovation est un modèle) (2) une dimension matérielle ou réelle ou spécifique (l'innovation comprend une multitude de répliques de ce modèle) - et deux propriétés - (1) la propriété de se diffuser (2) la propriété de se reproduire.

Il n'est, dès lors, pas étonnant que les développements des théories de la diffusion aient progressivement insisté sur la nature multiple de la technologie: on y trouve ainsi la distinction entre technologie générique et spécifique, entre une technologie-artefact, une technologie-savoir, et une technologie-compétence (Metcalfe 1990).

De plus, la prise en considération du caractère évolutif de la technologie a conduit à considérer que la technologie générique s'incorpore dans des clusters d'innovation. Les concepts souvent utilisés d'innovation 'radicale' et d'innovation 'incrémentale' marquent la volonté de marquer la filiation technologique, les éléments communs unissant une série d'objets techniques.

En conclusion, notons que les concepts utilisés par différents auteurs sont généralement flous et polysémiques. Pour faciliter l'appréhension du concept de 'technologie', nous proposons de distinguer une double acception (⁹⁰):

⁹⁰ Willinger, M. Zuscovitch, E. (1993) "Efficacité, irréversibilités et constitution des technologies" in: Revue d'Economie Industrielle, n°65, 3ème trimestre, pp. 7-22. "Il existe ainsi une différence de nature opérationnelle entre une technologie générique, entendue comme l'essence pure d'une technologie résidant souvent dans des lois scientifiques ou dans des principes

(1) le terme technologie est utilisé au sens général de science des techniques et des arts (comme le laisse supposer l'étymologie *tekhné*, art et logos, science) - la mécanique, l'électronique, la robotique, la chimie, les biotechnologies sont alors considérées comme des technologies. La définition des frontières observées -biotechnologie, robotique, électronique, informatique - repèrent un lieu de production large et 'générique'. La technologie se compose d'une famille de savoir et de compétences à l'interface du système éducatif, du monde académique, de l'Etat, de communautés professionnelles etc.. Cela réfère à un certain nombre d'institutions et de réseaux d'acteurs qui ont élevé un corpus de connaissances et de savoir faire au rang de discipline scientifique, avec ses laboratoires, ses revues professionnelles, ses organismes de recherche: chacun possède une dynamique propre de fonctionnement et d'"évolution" en fonction précisément des acteurs, des institutions, des corpus, des bibliothèques dont ils se composent. Dans cette perspective, la question de l'usage n'est sans doute pas le moteur direct et unique de l'évolution et de la dynamique de ces savoirs, ou plus exactement, le marché et les usagers de ces technologies ne sont pas strictement ceux des entreprises et du marché de consommation.

(2) le terme technologie désigne un produit technologique particulier- l'ensemble des corps de savoir hétérogènes composant un artefact particulier, et cristallisés dans une séquence de produits affiliés - que l'on qualifie de technologie pour décrire leur dimension générique et évolutive. Dans ce cas, la technologie est une fonction de production réunissant les différentes composantes nécessaires à la réalisation d'un objet technique. La technologie des aciéries à l'oxygène par exemple s'incorpore dans des machines particulières mais ne se confond pas avec elles. Il n'existe pas, pour autant, d'enseignement académique de la technologie des aciéries à l'oxygène. Si l'on se place dans le cas d'une technologie particulière, au sens où elle est constituée des connaissances opérationnelles permettant de produire directement une série généalogique d'objets techniques, alors, la question de la relation avec les utilisateurs et l'influence des apprentissages par l'usage devient considérable. Les savoirs mobilisés sont résolument hétérogènes (⁹¹): ils sont le produit de savoir faire et de savoir hybrides et mêlent, souvent sans distinction, les produits de certaines disciplines technologiques génériques et les expériences incorporées. Un objet technique, fut il une machine, ne se réduit pas à "une technologie" générique cohérente. Comme le montre Steinmuller dans le cas des circuits intégrés et des ordinateurs, ceux-ci sont composés de différents éléments hétérogènes pouvant faire l'objet de différentes technologies (⁹²).

de fonctionnement ayant un caractère général, et la technologie de production qui donne à ces principes une existence matérielle qui lui permet de fonctionner de façon efficace"

⁹¹ L'expression 'ingénierie hétérogène' rend compte de ce caractère hybride. Law, J. (1987) "technology and Heterogeneous Engineering: the Case of Portuguese Expansion" in: Bijker, W., Hughes, T., Law, J. (eds) *The Social Construction of Technological Systems*. MIT Press. Pp. 111-134.

Notons en guise de conclusion temporaire sur ce point l'intéressante distinction formulée par l'anthropologue des techniques Madeleine Akrich, distinction établie entre les scientifiques dont l'objet est d'étudier des phénomènes purifiés et abstraits - "*Science is taken to go beyond the social world to a reality unfettered by human contingency (...) to create knowledge with the status of universal and timeless truth*"- et les ingénieurs dont le travail est de construire des machines et outils "*composites, hétérogènes et physiquement localisés*" (Akrich, 1992⁹³)

2.2) Vers une nouvelle approche du développement technologique.

Si l'on accepte l'idée Schumpétérienne d'un développement économique reposant sur des cycles étroitement liés au développement de certaines technologies, l'identification des mécanismes de développement sur le moyen terme de ces technologies devient une question centrale. De ce point de vue, les travaux des diffusionnistes sont insuffisants car ils manquent totalement l'appréhension du caractère évolutif et dynamique de la technologie, au fondement du 'progrès technique'. D'où viennent donc les locomotives et les nouvelles variétés de maïs? Quel est le lien existant entre différentes générations de locomotives diesel, entre différentes variétés de maïs hybrides?

Identifier les mécanismes fondamentaux du progrès technique nécessite de reconnaître la continuité de la dynamique technologique, masquée par le caractère apparemment ponctuel des innovations. Les innovations ne constituent pas des phénomènes isolés et aléatoires, mais les manifestations d'un développement plus large, inter- temporel. Ainsi, de nombreuses innovations s'appuient sur le développement progressif d'innovations antérieures, formant de 'nouvelles combinaisons' d'éléments existants (Schumpeter, 1934, Nelson et Winter 1982). En d'autres termes, il s'agit de rendre compte du fait que les innovations ne "*s'élaborent pas de façon purement aléatoire, bien que l'aléa constitue un facteur important d'évolution, mais émergent selon une logique précise qui opère à travers des mécanismes de sélection et d'apprentissage*". (Willinger, Zuscovitch, 1993⁹⁴). Zuscovitch nomme '*technologie générique*' la "*force motrice*" capable "*de proposer, dans une certaine logique, un ensemble de solutions techniques aux besoins*" (Zuscovitch, 1985, p. 898). L'idée de technologie générique repose donc sur la mise en évidence de la continuité technologique liant une série d'innovations dans le temps et l'espace.

⁹² Steinmuller, E. (1996) "Technological Infrastructure in Information Technology Industries" in: Teubal M. et Alii, *Technological Infrastructure Policy. An International Perspective*. Kluwer, pp. 117-139.

⁹³ Akrich, M. (1992) "The De-Description of Technical Objects" in: Bijker, W., Law, J. (eds) *Shaping Technology/ Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press, pp. 205-224.

⁹⁴ Willinger, M., Zuscovitch, E. (1993) "efficience, irréversibilités et constitution des technologies" in: Revue d'Economie Industrielle, n°65, 3ème trimestre, pp. 7-22.

On peut classer les propriétés des technologies génériques selon deux catégories principales.

Premièrement, ces technologies sont *cumulatives*. Pour Zuscovitch, “*la dynamique générique spécifique d’une technologie déterminée repose sur un corps de savoir et de savoir-faire*” (Zuscovitch, 1985 p. 909). La dimension cognitive de la technologie permet d’expliquer le fait qu’une innovation prenne volontiers l’allure d’une ‘séquence d’artefacts’ au fur et à mesure que le ‘*design original*’ est approfondi et adapté à de nouvelles utilisations (Metcalf 1988). Ces séquences d’artefacts forment des familles reposant sur une base de savoir largement commune, sur un ensemble de principes de conception partagés (‘set of design principles’) (Metcalf 1988). Dans leur travail de conception, les innovateurs s’appuient volontiers sur l’existant (Nelson et Winter, 1982⁹⁵). La formation d’une base commune, que celle-ci soit matérielle ou immatérielle, renforcent les *interdépendances* liant entre eux les artefacts.

L’approfondissement progressif d’une voie technologique peut entraîner d’importants changements économiques à terme: “*Each improvement may be incremental in nature but cumulatively they may transform the competitive advantages associated with a particular technology*” (Metcalf 1990, p. 20). L’activité inventive tend à renforcer les voies technologiques suivies en s’appliquant prioritairement à l’amélioration progressive de certaines technologies, et au dépassement de leurs principales limites (Rosenberg 1982). Néanmoins, certaines limites sont inhérentes aux matières ou aux techniques utilisées, la plasticité des matières et des techniques n’étant pas infinie (Sahal 1985⁹⁶). Cela conduit logiquement à une certaine saturation du progrès technique réalisable avec certains assemblages. Certains auteurs voient dans cette saturation une source essentielle au fondement des innovations radicales (Dosi 1982⁹⁷, Sahal 1985). Cette cumulativité et l’aspect séquentiel du progrès technique soulignent la nécessité de prendre en compte un ensemble cohérent d’innovations plutôt que d’étudier la diffusion d’un artefact unique.

La seconde catégorie de propriété est l’**irréversibilité**. Les savoir technologiques ne sont pas absolument disponibles: ils n’existent que s’ils sont développés et utilisés. Un élément original de l’apport de Zuscovitch tient à la vision ‘vivante’ de la technologie qu’il promet: “*Un savoir ou un savoir-faire dissocié d’une pratique tend ainsi à s’éliminer du champs de la disponibilité, même s’il demeure repérable par des objets ou des textes*”.

⁹⁵ Nelson, R., Winter, S. (1982) *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Belknap Press of Harvard UP.

⁹⁶ Sahal, D. (1985) “Technological guideposts and innovation avenues” in: *Research Policy*, Vol 14, pp. 61-82.

⁹⁷ Dosi, G. (1982) “Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change” in: *Research Policy*, Vol 11, n°3, pp. 147-162

Pour l'auteur en effet, la technologie correspond aux *“générations de capital qui reposent précisément sur l'émergence, la maturation et le déclin d'un système technique déterminé”* (Zuscovitch, 1985 p. 898). Les bases de savoir, également nommées 'patrimoine technologique', dépendent donc étroitement des investissements et des capitalisations réalisées par les entreprises. La correspondance étroite entre capital investi et savoirs développés *“confère à la dynamique de l'innovation une irréversibilité fondamentale, qui constitue ainsi l'un des facteurs les plus importants du développement technologique et de l'évolution économique”* (Zuscovitch et Willinger, 1993). L'existence même de la technologie est liée à son incorporation séquentielle: elle s'incorpore dans des *“solutions techniques”* répondant à des *“problèmes spécifiques à un moment donné”*. Ce mécanisme d'incorporation renforce l'interdépendance des innovations entre elles: *“L'indivisibilité des options technologiques provient du fait que les solutions techniques générées par les innovations sont incorporées dans un dispositif matériel devant assurer l'efficacité du fonctionnement”* (Willinger, Zuscovitch, 1993, p. 8).

L'innovation est un mécanisme essentiel au développement technologique, en ce qu'elle constitue outre le lieu de cristallisation du progrès technologique, mais également la plongée de cette dynamique technologique dans le contexte économique déterminant sa valeur et les conditions de sa production et de son usage. Les artefacts -“dispositifs matériels”- cristallisent en quelque sorte les états des savoirs technologiques à un moment donné, mais également le dynamise et lui permettent d'évoluer. La technologie se modifie par l'intermédiaire de son incorporation: les objets techniques offrent autant de mises en situation faisant apparaître des associations inattendues, des points faibles à élaborer, ou comme le notait Schumpeter, des combinaisons inédites dont la valeur économique peut se révéler importante. Le caractère concret et fonctionnel du dispositif technique contraint fortement l'évolution des savoirs: (1) à la fois parce que ce dispositif est hybride : il incorpore des corps de savoir connexes, (2) parce que la matérialisation est comme le souligne Foray *“une plongée dans l'univers économique”* (Foray, 1996⁹⁸), (3) mais aussi parce qu'un dispositif technique 'doit avant tout fonctionner'. Le dispositif technique doit en outre tirer sa valeur de son intégration dans une fonction de production, et plus largement dans un contexte économique, généralement présenté dans la pensée évolutionniste comme un dispositif essentiel de la sélection.

Zuscovitch a exploré les conséquences économiques de cette irréversibilité: *“de ce fait, dès lors qu'un certain cheminement est pris sous forme d'une suite d'objets, ou plus généralement de dispositifs*

⁹⁸ Foray, D. (1996) “Diversité, sélection et standardisation: les nouveaux modes de gestion du changement technique” in: Revue d'Economie Industrielle, n°75, 1er trimestre, pp. 257-274

matériels, cela signifie que d'autres chemins ne seront jamais pris même si, au vu d'une solution nécessaire, une autre trajectoire eut été optimale" (Zuscovitch, 1985, p. 911).

“En effet, à l'inverse de la représentation courante en économie, on ne peut pas réitérer et retrouver l'ensemble des techniques qui ont été délaissées dans le passé. Si le choix des techniques se faisait à partir d'un ensemble identique sur chaque point de l'axe du temps, les conséquences de la sous-optimalité d'une décision effectuée dans l'incertitude serait relativement négligeable, car il serait toujours possible de faire, en quelque sorte, marche arrière, et de “repêcher” la technique la plus optimale pour une configuration donnée de variables économiques. En réalité le choix des techniques suit un processus analogue à celui d'une dérive cumulative et, par conséquent, incorpore un élément d'irréversibilité qui lui est essentiel. La première raison soutenant cette thèse est que toute décision prise par une firme structure ses caractéristiques de fonctionnement en imposant certaines directions à l'évolution de l'investissement, de l'organisation du travail, des qualifications du personnel, et ainsi de suite. Une deuxième raison peut être invoquée, qui joue un rôle encore plus important que la première car elle touche à l'ensemble de l'économie. Si à un moment donné, certaines techniques ne sont plus employées, elles auront tendance à disparaître et donc à ne plus être disponibles pour un choix de technique qui se situe dans l'avenir, même si rétrospectivement, elles apparaissent optimales pour la configuration économique correspondant au moment où le choix devient nécessaire.” (Zuscovitch, 1985, p. 906).

Rosenberg fournit un exemple de ce caractère *'path-dependent'* (David 1985) de la technologie. Un point essentiel de son argumentation est la prise en considération du caractère daté et limité de l'état des savoir technologiques. Si le fer et l'acier ont constitué les métaux prédominants au sein des sociétés industrielles, cela tient au fait que jusqu'à récemment, le haut fourneau représentait le principal procédé existant et développé disponible pour transformer le minerai en métal. *“Aluminium ore, in contrast, cannot be smelted in a blast furnace, even though it is similar chemically to iron ore. The only commercial practical ways of extracting aluminium involve huge quantities of energy”* (Rosenberg 1982). Zuscovitch développe une idée comparable dans le domaine des biotechnologies, à propos de la technique d'utilisation de la bactérie E. Coli : *“A titre d'exemple, prenons deux bactéries: A, qui ‘sait’ produire de l'insuline, et B, qui ‘sait’ dissoudre le pétrole dans les océans. Nous avons domestiqué A. Cela signifie que nous connaissons un ensemble d'éléments relatifs à son fonctionnement en tant que ‘dispositif’, suite à un investissement massif de R-D. Si nous avons besoin de la fonction opérée par B, nous lui prélevons le gène ‘responsable’ et nous l'insérons dans le patrimoine génétique de A, et ensuite nous envoyons A faire le travail de B. Or si nous savions ‘employer’ B directement, il est probable qu'elle aurait été plus efficace, donc plus économique.”* (Zuscovitch, 1985, p. 911)

L'ensemble de ces réflexions aboutissent à l'idée de technologies progressant le long de *trajectoires technologiques*.

II. C. Le concept de trajectoire technologique: cycle de vie des technologies.

“The Wright Brothers’ 1903 machine was scarcely more than a large, ungainly bicycle with attached wings. (The resemblance to the bicycle was no coincidence, since the Wright Brothers had previously been designers as well as manufacturers of bicycles.) Their airplane’s parts were secured by baling wire and glue, and its total flight was only a few hundred yards. Not until the 1930s did aircraft shed their struts and external bracing wire, the non-load-carrying skin involving the use of doped fabrics, and assume their stresses-skin monocoque construction form. Only with the design and development of the DC-3 did the airplane finally become a reliable means of transportation on commercial routes (..) But the performance gap that separates the DC-3 of 50 years ago from today’s wide-bodied aircraft, equipped with powerful jet engines, swept-back, sophisticated electronics, and capable of flying over most weather turbulence, is also immense. It almost has to be said of the airplane that everything of economic significance is attributable to the subsequent improvements, since 1903, that have been made within the original, crude framework of the Wright Brothers’ flying machine.” (Nelson, et Rosenberg, 1993, p. 9)

Il paraît difficile d'analyser la question de la diffusion aujourd'hui dans les mêmes termes que ceux utilisés par Griliches et Mansfield il y a quarante ans. La formulation des théories de l'innovation, du développement technologique ont été radicalement transformés. Tout ce qui précède prépare et milite fortement en faveur de l'émergence d'un nouvel outil d'analyse centré sur la dynamique technologique. C'est le rôle qu'assume le concept de *trajectoire technologique*.

S'il est des concepts qui méritent quelques clarifications, celui-ci en fait partie. Il est l'objet de controverses et d'approches différentes, de degrés d'élaboration très variables. Nous avons choisi de présenter deux courants qui conçoivent les trajectoires de façon très différentes: le courant des économistes de la standardisation et le courant des évolutionnistes.

Du côté des évolutionnistes, mettant en avant la question de l'offre de technologie, les trajectoires ont été présentées comme *des 'focusing devices'*, éléments de sélection et de concentration des efforts permettant l'accumulation. Comme le note M. Callon, dans cette perspective, *“les analystes ont insisté à juste titre sur la création de trajectoires qui concentrent les investissements: la notion d'apprentissage est centrale pour rendre compte du privilège indu accordé à certaines techniques ou à certains produits et de l'abandon progressif et souvent irrévocable d'autres options”* (⁹⁹).

⁹⁹ Callon, M. (1992b) “Variété et irréversibilité dans les réseaux de conception et d'adoption des techniques” in: Foray, D. & Freeman C. (eds) *Technologie et richesse des nations*. Economica. Pp. 275-324.

Du côté des économistes de la standardisation, la trajectoire correspond étroitement à un dynamique d'adoption qui tend à sélectionner une technologie parmi d'autres. *“Les modèles de diffusion et de compétition technologique soulignent la force des mécanismes qui aboutissent parfois à l'élimination de certains produits ou techniques et par voie de conséquence à la restriction de l'espace des choix offerts aux agents économiques”* (M. Callon , 1992, p. 277). L'intérêt du concept de trajectoire réside dans l'adoption d'un point de vue diachronique explorant la question des interdépendances technologiques. L'hypothèse centrale est que la technologie est de nature évolutive, processuelle et cumulative. Il est possible, à partir de ce point de vue, de se placer au plus près d'une technologie pour en suivre la genèse, l'évolution détaillée, le développement, les difficultés, la diffusion.

1) Présentation du phénomène

Certes, chaque procédé forme une machine, un bien différent, et chaque innovation de produit aboutit à la mise sur le marché de biens distinctifs. Mais cette indépendance est trop stricte et ne permet pas de rendre compte de certaines proximités en termes de compétences et de savoirs mobilisés ('neighborhood' Nelson et Winter, 1982) pourtant essentielles à la compréhension du caractère cumulatif du progrès technique.

“ The history of many technologies seems to be characterised by occasional major inventions followed by a wave of minor ones. Part of what is going on is product design evolution (...) The original DC 3, the result of the confluence of a number of R&D strands, represented a radically new civil aircraft package: all-metal skin, low wing, streamlining of body and engine configuration, more powerful engines. Over a subsequent decade, the basic design was improved in a variety of models, designed by other manufacturers as well as by Douglas.” “ The advent of the DC-3 in the 1930's defined a particular technological regime; metal skin, low wing, piston-powered planes. Engineers had notions regarding the potential of this regime. For more than two decades innovation in aircraft design essentially involved better exploitation of this potential: improving the engines, enlarging the planes, making them more efficient” “Each successive generation of plane was faster, had longer range, and was more comfortable. The original basic design was stretched to achieve additional performance and was differentiated to meet a variety of demand and conditions. The DC-4 represented the start of a series of four engine versions. By the mid 1950s the potentialities of this design concept appear to have been largely exploited. The advent of the Boeing 707 and Douglas DC-8 represented the start of another technological product cycle within the civil aircraft industry.” (Nelson et Winter, 1982, p. 257).

Un commentaire du même phénomène est donné par Abernathy:

“In the aircraft industry the development of the DC-3 stands out as a major turning point in the type of product innovation that took place and in the market structure of the aircraft and airlines industries (...)Reacting to requests from the airlines about needed operating improvements, Douglas designed the DC-3 and flew it first in 1936. Around eleven thousand were subsequently produced, and of these some thousand were still in use in 1966. Philipps observes that the DC-3 was so successful that, aside from the turbine-powered transports in Britain, no major innovations were introduced into commercial aircraft design until the new jetliners appeared in the 1950s. Instead, many refinements were made, such as stretching the design, adding appointments, and so forth, with the result that the airline operating costs per passenger dropped 50 percent.” (Abernathy, 1978, p. 73.)

Sahal propose également une description du phénomène:

“ It is often claimed that the introduction of DC-3 aircraft in 1936 marked the beginning of a new era in the development of technology. This is certainly borne out by evidence. The DC-3 was a product of a great deal of prior development effort. In turn, it became a focal point of significant further development of technology. Thus, it is noteworthy that the essential features of the DC-6 introduced in 1951 were identical with those of DC-3. The difference between the two lay in the degree of refinement rather than in the kind of design. Individually these refinements were of a minor nature. Collectively, however, they had a major impact on the capability of technology. As Miller and Sawers put it (...) ‘The enormous growth in air travel between the 1930s and 1950s was not the result of any great improvement in the design of the airliner, though it was helped by its higher speed and longer range which made international air travel practical’” (Sahal, 1985, p. 64)

Cette petite histoire de l’aéronautique américaine nous éclaire sur les phénomènes sous-jacents aux trajectoires technologiques qu’il s’agit d’essayer d’appréhender. Comment comprendre les observations indiquant de fortes interdépendances technologiques liant différentes versions d’un produit ou d’une machine, et qui semblent former une généalogie ou une famille d’innovations. Le concept de trajectoire a d’abord été conçu comme une boîte posée pour tenter de confiner le problème *“(technological trajectories) accounts for the relatively ordered patterns of innovation that one tends to observe at the level of single technologies”* (Dosi, 1988, p. 1128).

La thèse d’Abernathy et la mise en évidence du phénomène

Dans le secteur de l’automobile, Abernathy (¹⁰⁰) a mené une étude argumentée et très documentée de ce phénomène. Le travail réalisé est gigantesque et va bien au delà du fait stylisé présenté par Nelson et Winter.

Abernathy décrit le développement progressif de l’industrie et du produit automobile de son origine, que l’auteur situe en 1896, aux années 1970. L’auteur montre l’étroite relation qui a prévalu entre la dynamique technologique et le développement de cette industrie. De 1896 à 1909, un extraordinaire foisonnement de produits, de combinaisons, d’inventions aux formes diverses, dues le plus souvent à quelques ‘entrepreneurs- bricoleurs’ (entrepreneur-tinkers), a permis l’exploration d’une multitude de conceptions possibles de ce que pouvait être un véhicule motorisé monté sur quatre roues: *“During the next ten years, developments were typical of an emerging industry. A great diversity of products appeared on the market. Each automobile was produced in very limited quantities, often to consumer order, and each model was rapidly made obsolete by succeeding models (...) By 1909, there were sixty-nine manufacturing firms in the industry, each committed to its own design. But technological change was rapid, and only half of these firms survived for even seven years”* (Abernathy, 1978, p. 10). (¹⁰¹)

¹⁰⁰ Abernathy, W. (1978) *The Productivity Dilemma. Roadblock to Innovation in the Automobile Industry*. John Hopkins UP.

¹⁰¹ Pour un travail détaillé et complémentaire mené dans le même esprit sur la bicyclette - les planches sont en particulier extrêmement illustratives du bourgeonnement créatif caractérisant l’émergence d’un produit nouveau - voir Pinch, T. & Bijker, W.

Au coeur du foisonnement, un certain nombre de points essentiels de questionnement sont progressivement apparus comme essentiels. Ils ont fait l'objet d'une 'hiérarchisation'. Le point de désaccord le plus important concernait le choix d'un moyen de propulsion (the 'fundamental engine choice'): "*The choice of an engine was the pinnacle in a hierarchy of design choices that established constraints for other choices in components*" (Abernathy, 1978, p; 12).

Une rude concurrence, symboliquement mise en scène à l'occasion de courses automobiles faisait rage entre les partisans des moteurs électriques, à vapeur et au pétrole. Le moteur à explosion a d'abord fait figure de "*poor third choice*", les autres moteurs présentés sur le marché connaissant plus de succès et étant plus fiables. Pourtant un évènement remarquable s'est produit au cours de l'année 1900: à l'occasion d'une course organisée sur la piste du Washington Park de Chicago, pour la première fois, un engin à essence a battu ses concurrents électriques et à vapeur. "*Races played major roles in stimulating advanced designs, as experimental proving grounds, and as advertising.*" (Abernathy, 1978, p. 12). Le succès inattendu du moteur à essence sur les pistes de course lui a permis d'asseoir progressivement sa domination sur ses concurrents - l'auteur note qu'il dominait déjà le marché américain en 1902 - à la fois parce qu'il a bénéficié d'une attention soutenue, et d'améliorations rapides sur le plan technique, mais également parce qu'il a été de plus en plus fréquemment adopté sur le marché: "*after this, improvements and market acceptance came rapidly*" (ib.).

Entre 1902 et 1908, les efforts innovatifs se sont nettement focalisés sur le moteur à essence, cherchant à améliorer un certain nombre de points : les photographies de l'époque nous montrent la progressive stabilisation d'un design. Le moteur s'est installé à l'avant du véhicule, la traction avant s'est imposée, le châssis s'est abaissé, le volant a élu domicile à gauche, la transmission s'est répartie entre quatre positions disposées en H...

Parallèlement, certaines sociétés cherchaient à tirer parti du caractère plus cumulatif et stabilisé de la technologie pour s'essayer à la production d'un 'modèle' en série: Old Motor Works a gagné 30% du marché américain de l'automobile en produisant un modèle compact, léger, et bon marché.

L'émergence du modèle T de Ford a marqué une étape cruciale du développement de l'industrie automobile avec l'émergence d'un "*dominant design*", au confluent du mouvement de stabilisation des

(1987) "The Social Construction of Facts and Artifacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other" in: Bijker, W., Hughes, T., Pinch, T.(eds) *The Social Construction of Technological Systems*. MIT Press.

caractéristiques de l'automobile et de production en série. Alors que les deux périodes précédentes - exploratoires et stabilisatrice- étaient caractérisées par une multitude de changements - d'abord inscrits dans de multiples directions, puis progressivement orientées - le modèle T a semblé suspendre le cours du temps: "*for eighteen years the design of the model T chassis was not significantly changed*" (Abernathy, 1978, p. 13). Le design dominant de la Ford T, comme celui du DC-3, a réussi à stabiliser le bouillonnement créatif caractéristique des premiers temps et à introduire une forte continuité technologique: le lancement de la Ford T s'est accompagnée d'une forte irréversibilité (Boyer et Alii, 1991, Zuscovitch 1986) ⁽¹⁰²⁾.

Quels ont été les facteurs déterminants l'émergence d'un design dominant? Abernathy met en avant deux axes explicatifs.

Premièrement, l'auteur indique que le 'dominant design-Ford T' a constitué un effort de synthèse de nombreuses avancées désordonnées et éparpillées: "*It established the essentials of a dominant design at a higher level of component aggregation - the chassis. The model T chassis embodied an innovative synthesis of the industry's major advances up to that point, plus a few Ford innovations*" (Abernathy, 1978, p. 13).

Cette hypothèse présente deux avantages: (1) elle remet en question l'idée fort répandue selon laquelle un dominant design introduit obligatoirement une innovation technologique radicale ('technological breakthrough') (2) Elle souligne l'effort qu'ont réalisé les designers pour faire du modèle le point focal d'une trajectoire technologique cumulative passée et future. Le dominant design est conçu comme une synthèse, cherchant à intégrer la multitude de 'progrès' réalisés dans l'incorporation des différents composants historiquement élaborés. Sa durabilité s'est installée sur la qualité de l'intégration de ses composants ⁽¹⁰³⁾ ⁽¹⁰⁴⁾, la pertinence des choix des composants intégrés, l'inscription dans des

¹⁰² Pour Callon (Callon 1991) "l'irréversibilité d'une traduction dépend : (a) de l'impossibilité qu'elle crée de revenir à une situation dans laquelle elle ne constituait qu'une option ouverte parmi d'autres, (b) de la prédétermination des traductions à venir." (p. 218). On retrouve bien en effet cette double tendance chez Abernathy: le modèle T réussit à la fois à se constituer comme le point de convergence des dynamiques technologiques passées (a), et à orienter fortement la dynamique technologique future en la rendant cumulative "*through its success, the model T had the effect of establishing many design features. These features include the water-cooled front engine with drive shaft and rear-wheel drive, left hand steering, independant chassis and body construction (the body is manufactured separately and installed on the chassis), front and rear bumpers, and the essential driver controls of today's car.*" (Abernathy, p. 18)

¹⁰³ Callon développe un point similaire "*d'un point de vue général, on peut dire que l'irréversibilité croît à proportion que des effets de systèmes se créent dans lesquels chaque élément traduit, chaque intermédiaire, chaque traducteur s'inscrit dans un faisceau d'interrelations: modifier un élément, c'est à dire le définir différemment, suppose que l'on s'engage dans un processus de retraduction généralisé*" (Callon 1991, p.219).

¹⁰⁴ Abernathy et Clark (1985) soulignent l'importance du processus d'"autonomisation" de la science et des industries composantes vis à vis des industries d'origine "*importance of breaking the grip of the prior industries on the technological structure of the new industry*" (p. 8). Ainsi dans le cas de l'automobile "*From 1903 to 1907, the spark advance, the longitudinal*

machines et des unités de production performantes ⁽¹⁰⁵⁾. De part sa durée et sa stabilité, un dominant design instaure la possibilité d'une certaine cumulativité: il cherche à capitaliser et à dériver les lignes d'efforts innovatifs passés et futurs comme si il en était l'ultime destinataire.

Deuxièmement, Abernathy met en exergue l'importance du succès commercial remporté. *“The model T, which Ford introduced in 1908 at a price less than \$1000 was a spectacular success” “For eighteen years the design of the model T chassis was not significantly changed. During this period the industry’s production of passenger cars increased nearly sixtyfold, from 63 500 cars annually to 3 700 000 (...) Ford maintained about 50 percent market share through 1924”* (Abernathy, 1978, p.13-4)

Cette seconde hypothèse souligne deux nouveaux points importants (1) le dominant design n'existe et n'influence profondément l'orientation des innovations que s'il est adopté et largement diffusé. Il s'agit en particulier d'éviter des interprétations trop substantialistes: l'hypothèse selon laquelle un design technique posséderait une force intrinsèque n'est pas utile - **un bon design est un design adopté** (2) Tout design compose en quelque sorte une stratégie commerciale au sens large. Ford visait un certain type d'utilisateurs à travers une série de choix et d'orientations techniques et économiques. *“Above all else”* note Abernathy, *“model T buyers needed basic transportation”*. La compagnie Ford a dépensé de nombreux efforts pour simplifier, standardiser, rendre robuste, simple, léger, et bon marché son véhicule. Ainsi outre la synthèse d'innovations intervenues ailleurs Abernathy décrit *“a few Ford innovations”* suffisamment révélatrice de l'orientation stratégique de l'investissement réalisé par l'entreprise. Ford a utilisé de nouveaux alliages d'acier pour alléger le moteur d'environ 50%. De même, Ford s'est attaqué à un point du système qui lui paraissait problématique, la tension exercée sur les cylindres- blocs en cas de choc (trou ou obstacle) du fait du rattachement rigide du moteur à la structure. Ford a désolidarisé le

mounting of engines, torque tubes for drive shafts and bevel gear systems were introduced in successive Ford models. They were supported by a series of innovations in manufacturing processes: multiple machining, new assembly methods and so forth. Many of these concepts remained the industry standard for decades, and part of their success lies in the departure from the design rules of wagon makers and locomotive manufacturers. The spark advance and the torque tube, for example, marked a mating of technologies - electrical control concepts to the thermodynamics of engine design, and the dynamics of torque in motored propulsion to chassis design - that advanced and displaced the conventions of carriage makers” (p. 9). Cette hypothèse nous semble particulièrement intéressante dans la compréhension des relations entre technologie et structure industrielle. Abernathy, W., Clark, KB (1985) “Mapping the winds of creative destruction” in: *Research Policy*, Vol 14, pp.3-22.

¹⁰⁵ Ce troisième aspect est très important. Deux éléments sont ici à souligner: la manufacturabilité et la spécialisation. Abernathy observe à quel point les efforts de Ford ont été singulièrement orientés vers la ‘manufacturabilité’. Ford a régulièrement retraduit des avancées en les simplifiant, en les rendant plus fiables, plus léger, plus faciles à entretenir, en les recomposant pour en faciliter la production: *“Ford redesigned the block and cylinder as two separate parts that could be cast and machined with fewer difficulties”* (p. 13). En ouvrant un marché de masse, Ford a dû se doter des capacités de production de masse. Ford a appliqué une logique système fondée sur la spécialisation et l'intégration (‘precision-made interchangeable parts’, ‘mass production’, management of ‘the total production of such a complex product’). Un point essentiel du dominant design est donc qu'il constitue le fruit d'un investissement important: cela est vrai au sens large et au sens strict - les outils de production de sa reproduction forment un capital important et spécifique qui assoient sa durabilité. Le travail de Ford (et d'autres) a consisté à lier la production d'automobiles à d'importants investissements. Abernathy note très bien ce point et souligne que l'un des résultats a été que cette industrie a été très vite dominée par quelques groupes.

moteur de la structure pour éviter que celui-ci ne soit sensible aux chocs *“Instead of strengthening the frame, the model T introduced a three point motor suspension that isolated the engine from the twisting forces that the frame absorbed”* . Ces efforts et d’autres ont en fait visé à rendre le véhicule utilisable sur les mauvaises routes de campagne. *“Other new features included tough, flexible construction, high roads and the essential rural market the car was designed to serve”* (Abernathy, p. 13). La stratégie de Ford a consisté à ouvrir un segment de marché nouveau à l’automobile *“The mass market first developed in small towns, rural settings, and farms. Above all else, Model T buyers needed basic transportation. This and the fact there were initially no competitors in the low-priced market segment explains why Ford was able to dominate the US market for so long with one unchanged model”*.

Nous sommes amenés à constater, sans forcément bien saisir l’origine et le fonctionnement de ces phénomènes, que les innovations intervenant dans un domaine particulier, si elles présentent sans conteste une certaine variété, forment également une série relativement cohérente et ordonnée dans le temps, le long d’un cycle repérable. L’apparition ponctuelle de design dominant forme donc le paroxysme, la partie visible de la forte continuité liant une série d’innovations.

Abernathy inscrit le développement technologique dans le cadre d’une trajectoire technologique, au fondement d’une théorie de l’innovation reposant sur une double dynamique:

“For the first fifty years of automobile production, through 1950, there was a sense of common direction. At any time, rapid advances in one component, such as the body or engine, provided a focus for technological competition. The resulting advances created a standardized design. The process of standardization followed a hierarchy: first came the propulsion choice, then the overall chassis configuration, and then the major components were advanced. Finally, once technological change in the components subsided, the overall design of the automobile was optimized. (...) For much of its history, the US automobile evolved through a hierarchy of standardization to a highly standardized design, almost as if there were a natural logic to standardization” (Abernathy, 1978, p. 20-1)

L’auteur érige le design dominant au statut de pierre angulaire à partir de laquelle s’organise le renversement de la dynamique technologique:

“The superior designs of product like the Dc-3 and the model T Ford seem to mark turning points in the development of their respective productive units. The designs were synthesized from individual technological innovations that had been introduced independently in prior products. The important economic effects of a dominant design afford a degree of enforced product standardization, so that production economies can be sought, and provide a bench mark for functional performance competition, so that effective competition can take place on the basis of costs as well as product performance. Product design milestones are also apparent in other product lines where evidence is available on patterns of development over time” (Abernathy, 1978, p; 75).

La thèse d’Abernathy a posé les bases d’une théorie du développement technologique (¹⁰⁶). La vision cyclique du développement technologique introduit l’idée qu’une innovation radicale

¹⁰⁶ Tushman, M., Nelson, R. (1990) “Technology, Organizations, and Innovation. Introduction.” in: *Administrative Science Quarterly*, Vol 35, March 1990, pp. 1-8.

s'accompagne généralement dans sa phase d'émergence de phénomènes de rupture, de discontinuité, et de désordre. Les concepteurs épousent la métis, cet esprit créateur et indiscipliné qui à partir d'une notion donne naissance à des formes multiples, instables, insaisissables. L'intervention de l'ordre - sous la forme d'un 'dominant design' organisant et hiérarchisant l'ensemble des forces créatrices - peut seule stabiliser le processus en donnant un pli et une perspective convergente au temps. L'intervention d'un design stable s'accompagne de processus d'accumulation, qui transforment les fondements essentiellement fluides des premiers temps en capital, en matériel, en connaissances, en organisations (¹⁰⁷).

2) Efforts de conceptualisation: présentation de deux écoles de pensée

2.1) Approche évolutionniste: élaboration des conditions de production technologique

La première théorisation économique que nous avons choisi de présenter est l'approche évolutionniste. L'aspect cyclique du développement technologique y est analysée comme une dynamique de l'offre - conçue comme le mécanisme essentiel de production de la variété (search) - sanctionnée par des mécanismes de sélection - la sélection est assurée par l'adaptation aux contraintes et par le marché. L'originalité de la thèse défendue tient à la mise en évidence des fondements cognitifs de l'accumulation technologique, cristallisés dans les trajectoires technologiques.

L'origine analytique de la notion de trajectoire est souvent attribuée à l'émergence d'une forte controverse chez les économistes du changement technique sur la source et l'orientation du progrès technique. La question au coeur de ces débats a été formulée comme une alternative entre partisans du "demand-pull" et défenseurs du "technology-push" (¹⁰⁸): est ce que l'innovation ressortie d'une logique essentiellement économique tirée par la demande, fondée sur le développement d'une demande à laquelle les entreprises s'efforceraient de répondre ou sur une logique essentiellement technologique?

La première élaboration de la notion de *trajectoire technologique* s'est inscrite dans ce cadre (¹⁰⁹). Elle visait à rendre compte du caractère cumulatif de la dynamique technologique. Les technologies tendent à suivre des sentiers relativement ordonnés de développement.

Notion de trajectoire technologique

¹⁰⁷ Utterback, J. Suarez, F. (1993) "Innovation, competition, and industry structure" in: Research Policy, Vol 22, pp. 1-21.

¹⁰⁸ Mowery, D. et Rosenberg, N. (1979) "The influence of market demand upon innovation: a critical review of some recent empirical studies" in: Research Policy, Vol 8, pp. 102-153.

Selon Nelson et Winter, il faut rompre avec l'image de l'innovation spontanée: l'innovation n'est pas une invention radicalement nouvelle mais une recombinaison d'éléments *existants* "*the creation of any sort of novelty in art, science, or practical life - consists to a substantial extent of a recombination of conceptual and physical materials that were previously in existence*" (Nelson et Winter, 1982, p. 130). Certes, chaque procédé forme une machine, un bien différent, et chaque innovation de produit aboutit à la mise sur le marché de biens distinctifs, conformément à ce qu'enseigne la théorie néo-classique. Mais le postulat d'une indépendance trop stricte rend invisible certaines continuités pourtant essentielles à la compréhension du caractère cumulatif du progrès technique. Les auteurs défendent ainsi le principe d'une certaine épaisseur temporelle de la technologie. "*In many technological histories the new is not just better than the old; in some sense the new evolves out of the old. One explanation for this is that the output of today's searches is not merely a new technology, but also enhances knowledge and forms the basis of new building blocks to be used tomorrow*" (Nelson et Winter, 1982 p.256).

Les auteurs remarquent ainsi que l'histoire longue fait apparaître l'émergence occasionnelle d'"innovations majeures", approfondies ensuite et améliorées par une série d'"innovations mineures", une continuité technologique, interrompue par des discontinuités ⁽¹¹⁰⁾.

L'innovation majeure se caractérise par la rupture, la discontinuité introduite dans l'ordre technologique, la mise en place d'un nouveau *régime technologique* (Nelson et Winter 1982). Le régime technologique identifie une potentialité de développement technologique, présente en germe dans le dominant design, correspondant à un certain état de la science, des marchés, de la technique: "*a frontier of achievable capabilities, defined in the relevant economic dimensions, limited by physical, biological, and other constraints, given a broadly defined way of doing*" (Nelson et Winter, 1982).

Le 'DC-3' représente un exemple de *régime technologique*, un "modèle d'avion" possédant un certain nombre d'options fixes : carlingue en métal, ailes pleines en position basse, moteur à piston. Les avions produits dans les années qui suivirent le lancement du DC-3 ont repris fidèlement ces "options", formant ainsi la grande famille du "régime technologique DC-3".

Le régime technologique fixe des options techniques - des caractéristiques techniques - à partir desquelles des améliorations peuvent être envisagées. Le premier modèle, de part son incomplétude, agit comme un élément de focalisation ('focusing device' Rosenberg 1976). Il ouvre une série d'améliorations

¹⁰⁹ Nelson, R., Winter, S. (1977) "In Search of a Useful Theory of Innovation" in: Research Policy, Vol 6, pp. 36-76.

potentielles ('impératifs technologiques' Rosenberg 1982). Ainsi, chaque design se compose d'un certain nombre de sous-éléments, chacun incluant des 'erreurs', ("design problems to solve"). Ces potentialités sont alors exploitées dans les versions suivantes. L'amélioration progressive de ces problèmes crée une dynamique d'apprentissage, un sentier d'amélioration. Les gains liés aux innovations incrémentales peuvent être extrêmement importants. La dynamique est entretenue par ce mécanisme incitatif, renforcé par l'affaiblissement de l'incertitude, et les besoins quasi-nuls de réinvestissement. Il paraît tout à fait rationnel d'approfondir une trajectoire technologique une fois celle-ci engagée sur la voie du succès. La trajectoire revêt alors la forme d'un cycle avec un début et une fin, laquelle intervient lorsque les potentialités du design "*finissent par avoir été largement exploitées*", lorsque les limites optimales de ce que les contraintes physiques, biologiques -incontournables- rendaient possible sans bouleversement des hypothèses de départ. La trajectoire technologique est ainsi formée d'un ensemble composé d'une innovation majeure, reproduite dans ses grandes lignes, et améliorée continuellement dans ses détails (¹¹¹).

Mécanismes de genèse de la diversité technologique.

Nelson et Winter ne se sont pas contentés de décrire la dynamique du cycle technologique. Ils ont proposé une incursion au coeur des fondements cognitifs du développement technologique. Les auteurs suggèrent, pour comprendre l'orientation de la trajectoire technologique, d'étudier l'activité de conception et les bases de connaissances sur lesquelles elle repose.

Dans le modèle néo-classique, la question de la disponibilité des opportunités technologiques ne se pose pas: la technologie est une variable exogène. Nelson et Winter estiment au contraire que la diversité technologique est le fruit du travail des acteurs. La création de diversité technologique se fait par l'intermédiaire de mécanismes de recherche de nature séquentielle. Cette exploration est coûteuse et entâchée d'un degré de risque élevé du fait de l'incertitude relative à son résultat. Conformément aux hypothèses de *rationalité limitée* exposées par H. Simon, Nelson et Winter considèrent que l'exploration du spectre n'est ni immédiate, ni complète.

Le processus d'exploration s'organise autour de deux types d'actions complémentaires: (a) la recherche identifie les caractéristiques techniques et économiques de certaines voies (b) le développement consiste à choisir une technologie spécifique et à la rendre opérationnelle. Hughes (1983) établit une

¹¹⁰ Anderson, P., Tushman, M. (1990) "Technological Discontinuities and Dominant Design: A cyclical model of Technological Change" in: *Administrative Science Quarterly*, Vol 35, December 1990, pp. 604-633.

¹¹¹ Nelson et Winter distinguent les trajectoires naturelles générales (mécanisation, recherche d'économies d'échelles) et les trajectoires naturelles spécifiques (approfondissement d'un design).

distinction similaire: "Research is an information-gathering exercise and can be done by literature search or by scientific experimentation. Development, an important part of the innovation process, often involves the redefinition of the problem, new ideas, and research as the invention is tried in environments that are increasingly like the real use environment within which the innovation must function" (¹¹²).

Il existe, en conséquence, deux arbitrages économiques liées à l'activité d'exploration. Un premier arbitrage confronte la recherche de voies nouvelles potentiellement rémunératrices aux contraintes pesant sur l'effort innovatif - l'incertitude concernant le résultat et l'exploration nécessairement limitée du spectre. L'incertitude sur le résultat s'étire le long de la frontière entre connu et inconnu "The economic attributes of members of the set are not, in general known to the R&D decision maker. What he does know includes some of the technological attributes of the technologies (these may provide the name or the description of the technological alternatives in question) and also some general stochastic relationships between technological attributes and economic attributes. Thus it is known that a plane with higher-pressure and higher-temperature engine will fly faster and that this offers certain advantages to a potential purchaser of the plane, but the engine will cost more to produce (..) However, these relations are not known sufficiently well so that economic attributes can be perfectly predicted from technological ones" (Nelson et Winter, 1982, p; 248). Un second arbitrage équilibre réduction du risque - liée à la possibilité d'allouer les crédits à la recherche pour générer une variété importante d'information sur les voies possibles et leurs caractéristiques- et la recherche de retour sur investissement - que seul le développement effectif d'une technologie après sélection permet d'espérer. Cela amène les décideurs à adopter des stratégies mixtes tenant compte de ces arbitrages.

D'après Nelson et Winter, l'exploration tend à approcher un *secteur technologique* (composé de plusieurs voies) et à progressivement sélectionner une technologie au sein de ce secteur lorsque l'information obtenue paraît satisfaisante (¹¹³). Cette approche est essentiellement séquentielle - "the knowledge acquired in the course of the project may have implications for the next round of R&D projects" - dans la mesure où le niveau d'approfondissement dépend des résultats obtenus au 'rounds' précédents.

Mécanisme d'accumulation technologique

¹¹² Hughes, T. (1983) *Networks of Power: Electrification in Western Society 1880-1930*. John Hopkins UP. p. 19

¹¹³ Foray, F. (1996) "Diversité, sélection et standardisation: les nouveaux modes de gestion du changement technique" in: *Revue d'Economie Industrielle*, n°75, 1er trimestre, pp. 257-274. David et Foray (David et Foray 1996) proposent de rapprocher l'exploration de la métaphore de l'exploration géologique.

Dans ce contexte, la question de la décision d'investissement ne peut se comprendre comme un simple traitement linéaire d'information. L'innovation est un processus combiné de création et de sélection. La complexité d'un tel processus invite à se pencher davantage sur les dispositifs de sélection mis en place par les acteurs. Nelson et Winter en reconnaissent deux: le dispositif organisationnel et la dynamique d'apprentissage.

Le dispositif organisationnel joue un rôle prépondérant dans la procédure de décision. Quelle procédure suit l'évaluation des projets? Quelle est la durée et le niveau de l'engagement financier de l'entreprise? Quel type de projet sont généralement retenus par l'entreprise? *"Since all alternatives cannot be considered, there must be some rather mechanical procedures employed for quickly narrowing the focus to a small set of alternatives and then homing in on promising elements within that set"* (Nelson et Winter, 1982, p. 255). La mise en place de réponses organisées et routinières -(*'mechanical procedures'*)- facilite les prises de décision rapides et légitimes. Les *routines* (¹¹⁴) facilitent la coordination collective de l'allocation de ressources. Elles ont une fonction de "réducteurs d'incertitude", au sens où elles tendent à réduire l'horizon des possibles perçus par la firme, à imposer des limites aux activités de recherche et à fournir un cadre stable à l'action des acteurs de l'innovation. Elles permettent aux membres de l'organisation de disposer de règles -conventionnelles et connues par avance- de décision et de coordination des actions visant à incorporer une forme "d'objectivation" des arbitrages.

Les routines ne peuvent fonctionner sans la participation des acteurs. Le chef de projet doit développer une connaissance plus intime et spécifiques de *l'espace technologique* dans lequel il entend investir, afin de nourrir les procédures de décision: *"Knowledge can facilitate the problem solving by guiding the effort toward promising design alternatives. And knowledge can facilitate overall design by indicating what problems may be hard or easy and by guiding strategy toward configurations that do not require that the former kind be solved"* (Nelson et Winter, 1982, p. 257).

D'après Nelson et Winter, cet apprentissage s'effectue séquentiellement par secteur technologique. La définition de secteurs prometteurs, le premier balisage suggère l'existence préalable de connaissances. Les auteurs évoquent l'idée de l'existence d'une 'culture générale', d'un savoir commun

¹¹⁴ Nous n'allons pas ici développer la conception des routines dans le travail de Nelson et Winter, bien que celle-ci en soit l'un des éléments essentiels. La citation qui suit en fournit une approche suffisamment opérationnelle pour l'usage que nous en faisons ici *"As a first approximation, therefore, firms may be expected to behave in the future according to the routines they have employed in the past. This does not imply a literal identity of behavior over time, since routines may be keyed in complex ways to signals from the environment. It does imply that it is quite inappropriate to conceive of firm behavior in terms of deliberate choice from a broad menu of alternatives that some external observer considers to be 'available' opportunities for the organization. The menu is not broad, but narrow and idiosyncratic; it is built into the firm's routines, and most of the "choosing" is also accomplished automatically by those routines"* (Nelson et Winter, 1982, p. 135).

permettant une première formulation de *l'espace technologique*: “*The R&D decision-maker does not know the economic characteristics of as yet uninvented or undiscovered technologies, but he knows certain technological attributes. These enable him to divide up the set of possibilities into subclasses - a set of ‘blue’ technologies, a set of ‘yellow’ ones, and so on. At the existing set of factor prices he may know for example, that the blue technologies are more promising ones for exploration than any of the others in the sense of stochastic dominance of the distribution of unit costs reductions*” (Nelson et Winter, p. 252). Cette culture générale provient de différentes sources. Bien que Nelson et Winter demeurent évasifs sur cette question délicate, nous proposons de distinguer trois sources:

(1) **La professionnalité des ingénieurs**: “*it is known that a plane with higher-pressure and higher-temperature engine will fly faster and that this offers certain advantages to a potential purchaser of the plane, but the engine will cost more to produce. It is known, too, that certain classes of chemicals are much more likely to include effective pain-killers than other classes of chemicals*” (p. 248)

(2) **Les savoir liés aux produits existants**: “*Assume that the product in question (being sold by the firm) can have different attributes; cars or television sets can be big or small, models can be deluxe or plain, and so forth. An R&D decision maker ought to have a pretty good (though not infallible) idea regarding what subclasses of ‘new technologies’ will lead to a product with one set of attributes. A shift in consumer demand toward one set of attributes and away from another changes the mix of production that would be dictated by plausibly responsive production decision rules. But such a shift also ought to influence the allocation of research and development effort in the same direction.*”(p. 254)

(3) **Les savoir de ‘voisinage’ liés à la technologie**. Selon Nelson et Winter, dans le déroulement d’un projet, se forment, outre des connaissances spécifiques susceptibles d’être utilisées à la replication dudit projet, une forme de compétence heuristique, dite de voisinage, qui accroît la capacité à gérer les projets futurs d’innovation, en général, et les projets d’innovations “similaires à”, en particulier. “*Knowledge at a given technology is partially transferable to related ones*” (Nelson & Winter, 1982, p; 249).

Ces trois types de connaissances forment une base cumulative à partir de laquelle l’activité innovante peut effectivement se développer. L’hypothèse formulée consiste à considérer que sur le moyen terme, du fait de la rationalité limitée, du caractère routinisé des activités innovantes, de l’incertitude caractéristique des processus d’innovation, du caractère cumulatif des connaissances acquises (“what is found is found”), les entreprises tendent à poursuivre dans le futur des activités innovantes

similaires ou voisines de ce qu'elles ont déjà réalisé dans le passé. *“There is a neighborhood concept of a quite natural variety. It makes sense to look for a new drug ‘similar to’ but possibly better than the one that was discovered yesterday. One can think of varying a few elements in the design of yesterday’s succesful new aircraft, trying to solve problems that still exist in the design or that were evaded through compromise”*.

Nelson et Winter ont élaboré la ‘boîte conceptuelle’ permettant de sérier la question de la cumulativité technologique. Leur analyse des trajectoires technologiques se fonde sur une analyse du travail de conception et d’innovation. Ils ouvrent ainsi la voie à la recherche de fondements micro-économiques du développement technologique. Notons simplement ici que les auteurs laissent béantes deux séries de questions: premièrement, les questions liés à la genèse, à l’accumulation, à la dynamique des savoirs élémentaires (savoir collectif) auquel ils font jouer un rôle essentiel dans leur modèle; deuxièmement, la question de la sélection et de l’adoption des technologies indispensables à la compréhension de la transformation d’un design en design dominant.

Dosi et l’élaboration du concept de paradigme technologique

Au niveau de l’entreprise individuelle, la rationalité limitée explique une approche par secteur s’efforçant de cartographier un *espace technologique* en sous ensemble affublés d’attributs technico-économiques. Au niveau industriel, il existe une professionalité transversale des ingénieurs (‘general theoretical understanding’) qui fournit une première idée du potentiel représenté par une voie technologique ouverte, et offre un repère sur la manière de s’y prendre pour exploiter celui-ci. Les connaissances partagées dont nous avons exposé l’importance au paragraphe précédent sont ainsi en partie formées de manière cumulative autour des designs dominants. Metcalfe et Miles (1994) formulent une série d’arguments convainquant allant dans cette direction. Ils notent que dans l’élaboration d’un design dominant, et du fait que celui-ci nécessite la création de savoir et de compétences jusqu’alors inconnues, une ‘structure intellectuelle’ (‘intellectual framework’) est créée simultanément avec le *design dominant*. *“Beyond formally standardised rules of behaviour and characteristics of product and processes, there are phenomena which bring uniformity to the common-sense expectations and rules of thumb of scientists, engineers, R&D managers, and other innovators. Both empirical practice, and lively discussion in the trade press and elsewhere, help establish such assumptions and expectations.”* (Metcalfe et Miles, 1994, p. 259). Les notions des ingénieurs portent sur les potentialités technico-économiques du design dominant *“beliefs about what is feasible or at least worth attempting”*.

Nelson et Winter détaillent les savoir partagés dans l'industrie aéronautique: *“In aviation, engineers can work on improving the thrust-weight ratio of engines, or on increasing the lift drage ratio of airframes. In jet engine technology, thermodynamic understanding relates the performance of the engine to such variables as temperature and pressure at combustion. This naturally leads designers to look for engine designs that will enable higher inlet temperatures and higher pressures. In airframe design, theoretical understanding (at a relatively unsophisticated level) always has indicated that there are advantages to getting planes to fly at higher altitudes, where air resistance is lower. This leads designers that will operate effectively at higher altitudes, and so forth. Often there are complementarities among the various trajectories. Advances in engine power and the streamlining of aircraft are complementary.”* (Nelson et Winter, 1982, p. 259)

Il revient à Dosi d'avoir exploré cette question à travers son concept de *paradigme technologique* (¹¹⁵). Nous avons repéré trois principales acceptions des *paradigmes technologiques* chez l'auteur: (1) un paradigme est un programme de recherche: un ensemble de règles et de critères d'orientation de l'activité inventive et un certain nombre de fonctions cibles. (2) un paradigme est un “exemplar” -un objet technique comme le DC-3- constituant un modèle de référence et fixant en particulier une série de compromis (“trade-off”) et orientant l'activité innovatrice (“problem-solving activity”) (3) une connaissance collective des ingénieurs et des chercheurs, une manière commune de voir et de penser.

Metcalf et Miles montrent le lien entre cette vision paradigmatique, et le concept de dominant design: *“if we understand ‘paradigm’ to refer to shared cognitive frameworks for the individuals and institutions, which help them define problems and design tests and solutions, then the concept has considerable relevance to those seeking to advance any technology” “In Nelson’s sense they are design heuristics. Once a workable design configuration has been established, a paradigm provides a framework within which a community of technological practitioners can define problems and identify solutions: it becomes the framework for incremental artefact improvement within a stable base of broad knowledge and skill. From this, it is a short step to characterising paths of advance as trajectories (Dosi 1982) or as innovation avenues (Sahal 1985) or as dominant designs ...”* (¹¹⁶).

Les *paradigmes technologiques* forment un espace technologique potentiel dont les frontières sont liées à des manières de voir. Ils se composent de connaissances, de savoir faire, de tours de main,

¹¹⁵ Dosi, G. (1982) “Technological paradigms and technological trajectories” in: Research Policy, Vol 11, n°3, pp.147-162 et Dosi, G. (1988) “Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation” in: Journal of Economic Literature, Vol 26, pp. 1120-1171.

d'habitudes de penser, d'objets techniques de référence, de règles de gestion..... Toutes les voies ouvertes par un paradigme ne sont pas explorées, alors que d'autres restent inexplorées. Les entreprises explorent et exploitent ces potentialités le long de *trajectoires technologiques* cumulatives (¹¹⁷). Cette capitalisation permet de générer d'importants retours liés à des effets d'apprentissages. Selon l'idée originale de Kuhn, l'accumulation n'est possible que dans le cadre d'un *paradigme* stable: le progrès technique n'existe que lorsqu'un espace technologique est délimité, qu'une vision technologique est partagée par les ingénieurs et les chercheurs, lorsque des bases de connaissances spécifiques à chaque industrie sont progressivement constituées, lorsque, enfin certains designs jouent le rôle de référence à partir desquels un certain nombre d'améliorations sont possibles.

Dans ce schéma, les *trajectoires technologiques* assument le rôle essentiel de révélateur. Les trajectoires se confondent avec ce que Kuhn appelle l'activité "ordinaire" dans le domaine de la recherche scientifique, consistant à exploiter et à approfondir certaines pistes - "*technical progress along a defined path*" (Dosi 1982, p. 157)- :

(1) du fait de leur caractère cumulatif, les trajectoires tendent à stabiliser et à focaliser l'activité inventive exclusivement dans une direction, facilitant ainsi l'exploitation d'effets d'apprentissages. En ce sens, elles agissent comme des dispositifs de focalisation ('focusing devices'), permettant aux entreprises et plus largement à l'économie de passer d'un univers de l'incertitude et de la multiplicité, à un univers balisé, auto-réalisateur, justiciable d'actions stratégiques et bénéficiaire d'économies d'échelles et d'apprentissage. C'est dans l'approfondissement de trajectoires technologiques que peuvent se former deux types de capitaux essentiels au développement économique: la base de connaissance technologique et les machines qui leurs correspondent.

(2) Elles constituent la pièce maîtresse de l'irréversibilisation. A partir du moment où un design stable émerge et est adopté par un certain nombre d'entreprises, la trajectoire technologique à laquelle il donne naissance lui confère, en retour, un statut dominant et irréversible. La trajectoire technologique donne progressivement plus de poids, et rend de plus en plus difficile l'introduction de changements radicaux. En focalisant l'attention de façon exclusive, la trajectoire tend à être 'aveugle': elle rend difficile le développement d'autres voies.

¹¹⁶ Metcalfe J., Miles I. (1994) "Standards, selection and variety: an evolutionary approach" in Information Economics and Policy, Vol 6, pp. 243-268.

¹¹⁷ "Let us define as a technological trajectory the activity of technological process along the economic and technological trade-offs defined by a paradigm" (Dosi, 1988, p.1128). La trajectoire définit un sentier de progrès technique dans le cadre d'arbitrages technologiques donnés. Par exemple "*in microelectronics, technical change is accurately represented by an exponential*

(3) L'exploitation du potentiel ouvert dans le cadre d'un paradigme est limitée. La trajectoire suit donc un cycle de développement jusqu'à épuisement de ce potentiel. L'épuisement stimule alors la remise en question du paradigme, afin que l'activité industrielle et le capital accumulé continuent à vivre et à générer des richesses. La trajectoire tend à générer une autre trajectoire en 'sautant' d'un paradigme à l'autre. Cela correspond à deux phénomènes (a) l'épuisement du paradigme est incitatif "*le progrès graduel à l'intérieur d'une typologie de machines (que nous avons défini ailleurs comme le progrès à l'intérieur d'un 'paradigme technologique')* est toujours possible mais avec un épuisement progressif des opportunités. Cela revient à dire que toute trajectoire se caractérise, en termes stochastiques, par des rendements croissants dynamiques mais avec des taux décroissants" (¹¹⁸) (b) les connaissances et le capital accumulés forment la base de nouvelles explorations "*Plus une entreprise avance le long d'une trajectoire, plus sa probabilité de sauter sur une autre trajectoire caractérisée par une valeur A2 plus élevée (c'est à dire de 'découvrir' une innovation radicale) augmente*" (Dosi et Al., 1992, ¹¹⁹p. 128)

Le modèle évolutionniste possède l'avantage de réintroduire l'offre dans l'analyse technologique et d'endogénéiser l'innovation dans les modèles économiques de croissance. Les *trajectoires technologiques* traduisent une dynamique d'investissement. Le concept de paradigme met ainsi en relation la trajectoire suivie par une technologie et l'inscription de cette technologie dans un réseau de production progressivement capitalisé. Les efforts de conception, d'exploration, de R&D sont ainsi utilisés à l'élaboration progressive de ce que nous nommons *les conditions de production* de la technologie: tant sur le plan des savoirs, que sur le plan des outils, Nelson, Winter et Dosi expliquent comment ces conditions sont progressivement formées par les acteurs de l'innovation. L'hypothèse de rationalité limitée introduit une dimension stratégique dans l'analyse: la capitalisation de *moyens de production* est un "processus onéreux" et incomplet qui tend à se focaliser sur certaines voies. Essentiellement, l'irréversibilité et la dynamique du modèle reposent sur deux principes dont les fondements ont été posés par Nelson et Winter: le principe d'une rationalité organisationnelle limitée reposant sur des routines, et le principe d'une capitalisation progressive poussant à l'approfondissement d'une voie technologique.

2.2) Théorie de la standardisation

trajectory of improvement in the relationship between density of the electronic chips, speeds of computation, and cost per bit of information" (Dosi, 1988, p. 1129)

¹¹⁸ Chiaromonte, F. Dosi, G. (1992) "Les microfondements de la compétitivité et leurs conséquences macro-économiques" in: Foray, D., Freeman, C. (eds) *Technologies et richesse des nations*. Economica. P. 121-161.

¹¹⁹ Cette vision rebondissante des trajectoires marque une évolution récente dans les conceptions de Dosi, laquelle laisse une autonomie croissante aux trajectoires par rapport à un paradigme.

Noyée et normalisée dans l'ensemble du fonctionnement de l'organisation, la concurrence entre technologies, comme élément central du développement technologique n'apparaît plus dans les thèses évolutionnistes. Le marché est devenu un élément étranger à l'analyse. La compétition est naturalisée, homogénéisée dans la continuité technologique. La diversité y est dissoute. L'émergence d'un *design dominant* n'est, dans cette perspective, qu'un point à l'origine d'une *trajectoire technologique* marquée d'une forte cohérence. La notion de paradigme ne suffit pas à nous faire comprendre pourquoi l'agrégation de rationalités individuelles limitées déboucherait sur une telle cohérence macro-économique: elle le postule, gommant dans le même mouvement, la question méso-économique de la diffusion. Cette perspective ne permet pas de rendre compte de la multiplicité des couleurs et des formes ayant émergées collectivement sous l'impulsion créative des bricoleurs d'automobile au début du siècle. Même si la théorie évolutionniste reconnaît explicitement l'importance des designs dominants, elle ne réussit pas à fournir une explication convaincante du basculement soudain intervenu avec l'arrivée de la Ford T sur le marché.

L'économie de la standardisation développe un point de vue symétriquement opposé à celui de l'économie évolutionniste. La compétition technologique y représente le point de départ de l'analyse. En dépit d'une forte variété (¹²⁰), on peut ainsi proposer de classer cette littérature abondante en deux catégories: l'une s'intéresse à l'émergence simultanée de différentes alternatives technologiques dans les premières étapes de la diffusion (¹²¹), l'autre révisé le cas plus classique de la substitution (¹²²). Ces travaux ont en commun de montrer l'importance et l'influence de la standardisation sur les mécanismes du marché. Une standardisation trop faible ou trop forte, trop tardive ou trop rapide des produits tend à aboutir au même résultat, une sous optimalité du marché ("market failure") (¹²³): elle tend à limiter l'innovation en renforçant l'inertie technologique (Farrell & Saloner 1985), elle peut générer des effets de

¹²⁰ Pour une série de revues détaillées, nous renvoyons le lecteur intéressé aux travaux de D. Foray. Foray D. (1989) "Les modèles de compétition technologique: une revue de la littérature" in: Revue d'Economie Industrielle, n° 48, pp. 16-34. Foray D. (1990) "Exploitation des externalités de réseau versus évolution des normes: les formes d'organisation face au dilemme de l'efficacité dans le domaine des technologies de réseau" in: Revue d'Economie Industrielle, n° 51, pp. 113-140. Foray D. (1993) "Standardisation et concurrence: des relations ambivalentes" in: Revue d'Economie Industrielle, n°63, pp. 84-101. Foray D. (1996) "Diversité, sélection et standardisation: les nouveaux modes de gestion du changement technique" in: Revue d'Economie industrielle, n°75, pp. 257-274.

¹²¹ David P.A. (1985) "Clio and the economics of QWERTY" in: American Economic Review, Vol 75, n°3, pp.332-337. Cowan R. (1991) "Tortoises and hares: Sequential technological choice under increasing returns" in The Economic Journal, Vol 102, July 1991, pp. 801-814. Arthur B. (1989) "Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events" in The Economic Journal, Vol 99, March 1989, pp. 116-131. Foray, D. (1989) op. cit.

¹²² Katz M., et Shapiro C. (1985) "Networks externalities, Competition, and Compatibility" in: American Economic Review, Vol 75, pp. 424-440; Farrell J., Saloner G. (1986) "Installed Base and Compatibility: Innovation, Product Preannouncements, and Predation" in: American Economic Review, Vol 76, n°5, december 1986, pp. 940-955; Farrell J, Saloner G. (1988) "Coordination through Committees and Markets" in: The Rand Journal of Economics, Vol 19, n° 2, Summer 1988, pp.235-252; Berg S. (1989) "The production of Compatibility: Technical Standards as Collective Goods" in: Kyklos, Vol 42, Fasc 3, pp. 361-383.

¹²³ Pour une contestation de la validité de la proposition de 'market failure': Liebowitz S., Margolis S. (1994) "Networks Externality: an Uncommon Tragedy" in: Journal of Economic Perspectives, Vol 8, N°2, Spring 1994, pp. 133-150; Liebowitz S., Margolis S. (1995) "Path-Dependence, Lock-in, and History" in: The Journal of Law and Economics, Vol 11, n° 1, pp. 205-226.

niche, de segmentation du marché, liés à une insuffisante compatibilité (Berg 1989, Katz & Shapiro 1994, 1986, Farrell & Saloner 1985, 1986), elle peut être utilisée comme une barrière à l'entrée dans le cadre de la stratégie 'prédatrice' d'une firme cherchant à occuper une position dominante (Katz & Shapiro 1985, Farrell & Saloner 1986), elle peut, enfin, aboutir à la sélection irréversible d'une voie technologique inférieure (David 1985, Arthur 1988, Cowan 1990).

2.2 a) Arthur et les bases du modèle de rétroaction positive : une approche analytique du phénomène de diffusion

Notion de trajectoire technologique et 'competing technologies'

D. Foray (1989) débute son article de synthèse par la question clé suivante "*Comment expliquer la victoire finale dans le domaine des réacteurs nucléaires, de la méthode de refroidissement par eau, alors que de nombreux spécialistes affirment aujourd'hui que le refroidissement par gaz serait plus efficace si on avait consacré au développement de cette méthode autant de ressources qu'à celui de sa rivale?*" (Foray, 1989, p.16).

Rappelons que l'une des principales hypothèses soutenant l'édifice des théories diffusionnistes consiste à mettre en exergue la profitabilité réputée supérieure des nouvelles technologies -hypothèse du progrès technique- comme le moteur essentiel de la diffusion technologique. Les théories de la standardisation, réfutant cette hypothèse, ont montré que des agents parfaitement rationnels pouvait fort bien sélectionner une technologie sous-optimale. Elles ont ainsi contribué au dépassement des principales limites des théories traditionnelles de la diffusion.

Débarassé de l'hypothèse du progrès technique, l'ouverture de la question de la compétition technologique est devenue possible, et même nécessaire: il est *a-posteriori* devenu impossible de dire quelle alternative allait être sélectionnée *a-priori*. Cela permet la prise en considération de l'émergence, en particulier lors des premières étapes du développement technologique, de plusieurs alternatives entrant en concurrence. Les décisions d'adoption d'une innovation ne sont plus mécaniquement déterminées par la "profitabilité" intrinsèque d'un objet technique préexistant. Le développement technologique est étroitement lié à l'exercice d'un choix par les acteurs économiques. Le profit devient le résultat d'un effort d'investissement, de mise en relation de l'objet et des ses utilisateurs, et non la révélation automatique d'un potentiel. Foray décrit cette logique à l'aide d'une formule synthétique: "*On ne choisit pas une*

technologie parce qu'elle est plus efficace mais c'est parce qu'on la choisit qu'elle devient plus efficace"
(Foray, 1989, p. 16).

L'élément essentiel à retenir est que, dans ce cadre renouvelé, le mouvement de diffusion ne tient pas centralement aux qualités internes prédéfinies d'un objet technique, mais, à l'inverse, au comportement des acteurs, et en particulier aux décisions d'adoption des utilisateurs. La question n'est plus de savoir pourquoi un milieu n'adopte pas plus rapidement le progrès, mais pourquoi des acteurs adoptent une technologie x (plutôt que y) à un moment t (plutôt que z), et quels sont les effets de cette décision micro-économique sur la dynamique technologique d'ensemble. La force qui meut les technologies dans la société n'est donc pas donnée a-priori, mais générée au fil du processus d'adoption.

Pour Arthur, la dynamique technologique ne repose pas prioritairement sur l'innovation mais sur l'adoption: l'adoption et sa dynamique déterminent la forme des biens présents sur le marché et leur *évolution*, "*c'est l'adoption et l'usage qui confèrent au bien son mode d'existence*" (Foray 1992). Arthur rompt ainsi avec une vision homogène du temps de la trajectoire. Le temps en lui même, n'est pas un facteur pertinent d'analyse du développement technologique. Les décisions d'adoption, leur nombre, leur orientation, engendrent des modifications, ou à l'inverse, une stabilisation des caractéristiques technologiques: elles orientent l'évolution rapide du design ou à l'inverse, sa standardisation sur un design dominant. Elles invitent à l'exploration simultanée et compétitive de plusieurs trajectoires, ou à l'inverse, à l'approfondissement d'une voie technologique unique.

Arthur analyse ainsi le cycle du développement technologique sous l'angle d'une dynamique de la demande. La diffusion technologique s'accompagne de la création d'un réseau d'utilisateurs de plus en plus interdépendants, fédérés autour des objets techniques. En début de cycle, les préférences individuelles des agents peuvent s'exprimer sans encombre selon une logique 'atomisée'. Il en résulte une dynamique exploratoire tous azimut favorisant un bouillonnement créatif dans laquelle s'exprime un esprit de compétition. L'adoption massive aboutit à une altération profonde des préférences des agents: les décisions individuelles d'adoption y sont fortement influencées par les tendances collectives, selon une logique 'coordonnée'. L'intégration progressive d'une dynamique collective promeut une forte conformité, laquelle se traduit par la standardisation rapide de certaines caractéristiques, et par l'élection d'une technologie dominante.

Cowan commente ainsi le cycle du développement technologique: "*It has been observed that the history of science contains many examples of multiple, independent discoveries of the same idea. (..)*

Many technological advances appear in multiples (Merton's term referring to the independent discovery of the same idea by more than one scientist). It is also the case, however, that in the history of technology the multiples tend to consist of different technologies. Several innovators may simultaneously discover ways of overcoming a particular bottleneck, or practical difficulty. Though these discoveries, in their fully developed forms, will all be means to the same end, they may differ considerably in the way this end is achieved. Though they will perform the same function, the discoveries are technically distinct. Gas and electric refrigerators, heavy water, light water and gas-graphite nuclear reactors, wet and dry smoke-stack scrubbers are all instances of technological multiples (..) Economists now refer to these situations as cases of competing technologies. One of the interesting features of competing technologies is that often, as history unfolds, some of the technologies disappear as agents stop adopting them. It is also often the case that when several technologies are competing all but one of them disappear and this single technology comes to dominate or monopolize the market.” (124).

Ainsi, le développement de l'automobile a procédé d'une dynamique proche de celle décrite par Cowan. La compétition entre véhicules à essence, à vapeur, et électrique a fait rage dans les premières étapes pour progressivement laisser place à une situation monopolistique du moteur à essence.

Rendements croissants et basculement d'une rationalité individuelle à une décision commune

“What makes competition between technologies interesting is that usually technologies become more attractive - more developed, more widespread, more useful - the more they are adopted” (Arthur 1988 p. 590).

L'auteur avance que la dynamique d'adoption passe progressivement d'une logique atomisée à une logique coordonnée. Pour comprendre le développement technologique, il est donc indispensable de faire la lumière sur les mécanismes au fondement de cette transformation. Quel sont les mécanismes à l'origine du basculement, du passage de la diversité à un marché dominé? Quels sont les mécanismes qui font verser la dynamique d'une logique exploratoire individualisée à une logique focalisée collective, du désordre à l'ordre?

Ainsi que nous l'avons noté, Arthur privilégie une approche par la dynamique d'adoption: *“To ascertain how the actual outcome is 'selected' from these multiple candidate outcomes, we need to keep*

¹²⁴ Cowan R. (1991) “Technological variety and competition: issues of diffusion and intervention” in: OECD (ed) (1991) *Technology and Productivity: The Challenge for Economic Policy*. OCDE.p.509-521.

track of how adoptions of rival technologies build up (together with the small events that might influence them) and how they eventually sway and tip the market” (Arthur, 1988, p. 591).

Arthur met en avant deux mécanismes essentiels construisant une interdépendance croissante des décisions d’adoption: les *rendements croissants d’adoption* et les *externalités de réseau*.

Le concept de *rendements croissants d’adoption* souligne la continuité et la cumulativité des trajectoires technologiques individuelles. L’hypothèse de rendement croissant signifie ⁽¹²⁵⁾, ainsi que nous l’avons largement développé jusqu’à présent, que la technologie est adaptative et évolutive, et qu’elle se prête à des apprentissages et à des améliorations ⁽¹²⁶⁾. L’originalité de l’apport arthurien tient à l’articulation du concept de rendement croissant, avec le processus d’adoption. Pour l’auteur, les rendements croissants sont générés par la quantité d’adoptions, et donc par le niveau de diffusion de la technologie. Le développement des technologies et leur diffusion se confondent dans un seul et même mouvement: c’est en étant choisie et adoptée qu’une technologie se développe et acquiert ses caractéristiques (en particulier ici ses performances ‘supérieures’). Par l’intermédiaire de ce mécanisme, une étroite relation se noue entre les objets techniques et leurs adopteurs.

Le concept d’*externalité de réseau* souligne l’existence d’un intérêt collectif créé par l’usage commun d’une technologie. L’exemple des technologies de réseau a été repéré par les économistes depuis fort longtemps, que ce soit dans le secteur des télécommunications ou des transports ⁽¹²⁷⁾. Un exemple traditionnel est celui du téléphone. En tant qu’usager, l’utilité retirée d’une souscription à un abonnement téléphonique est une fonction croissante du nombre des autres usagers. Ces mécanismes ont été étendus par les économistes de la standardisation à l’ensemble des technologies. L’exemple souvent cité est celui de la décision d’achat d’un magnéscope (Katz et Shapiro 1985). L’existence d’un parc de cassettes vidéo plus ou moins large (fonction de la diffusion) accompagnant telle ou telle alternative technologique conditionne l’usage, et donc l’utilité qu’un adopteur peut tirer de son acquisition.

Les décisions prises individuellement à un niveau microéconomique possèdent donc une série de conséquences sur la mise en place de certains investissements à un niveau collectif. Sous hypothèse de rendements croissants d’adoption, le modèle proposé par Arthur fait jouer la concurrence entre des technologies équivalentes à l’origine. Les préférences des adopteurs se répartissent entre les différentes

¹²⁵ Young, A. (1928) “Increasing returns and economic progress” in: *The Economic Journal*, December 1928, pp. 527-542.

¹²⁶ Dans son article de 1989, Arthur construit un modèle où les rendements peuvent être croissants, constants ou décroissants. Arthur W.B. (1989) “Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by historical Events” in: *The Economic Journal*, Vol 99, March 1989, pp. 116-131.

alternatives existantes. Le processus séquentiel de décision (*'one-off'*), les anticipations, et les mécanismes de renforcement, même aléatoires (*'small events'*), finissent par aboutir au développement et à la diffusion affirmée de l'une des technologies par rapport aux autres. Dans ce contexte, Arthur souligne le rôle des évènements intervenants dans les premières étapes du développement. Ceux-ci peuvent incidemment conférer un avantage décisif à l'une des alternatives en concurrence. Au delà d'un certain seuil, l'avantage acquis s'irréversibilise (*'lock-in'*), conduisant à l'élimination des autres alternatives. Le *'lock-in'* intervient au moment où l'avantage acquis par B est tel, que tout adopteur futur, quelque soit ses préférences de départ, est amené à choisir rationnellement B (l'adopteur n+1 n'a plus le choix et ne peut, indépendamment de ses préférences et des caractéristiques des technologies en concurrence, que choisir le standard du marché). Dans ce modèle, la technologie sélectionnée domine - "comes to dominate" (Arthur 1988, p. 601)- le marché.

Cumulativité et interdépendance conduisent la dynamique d'adoption à suivre une trajectoire ou sentier (*'path-dependency'* Arthur 1988, David 1987). *'Path-dependency'* et *'lock-in'* soulignent ainsi l'importance de l'enchaînement temporel des évènements et du moment où la décision intervient: les décisions prises à un moment t dépendent des décisions antérieures (et mêmes postérieures dans certains cas). Par l'intermédiaire de ce mécanisme, une étroite interdépendance se noue entre les objets techniques et leurs adopteurs. De ce fait, la compétition se rapproche, avec le temps, d'une concurrence entre groupes d'influence "*Thus competition between technologies usually becomes competition between bandwagons, and adoption markets display both a corresponding instability and a high degree of unpredictability*" (Arthur 1988).

Au fil du cycle la nature et le degré d'incertitude varient radicalement. On passe ainsi de décisions prises dans un univers incertain, à un univers de la certitude et du monopole: les décisions stratégiques et les dilemme décisionnels interviennent nécessairement avant le lock-in (¹²⁸). Le moment du *'lock-in'* transforme radicalement la dynamique de l'innovation et la structure de l'économie, rendant inévitable et massive l'adoption de la technologie sélectionnée.

Dans un cas comme dans l'autre, l'auteur capitalise l'essentiel des arguments que nous avons vu progressivement émerger en économie de l'innovation en faveur du caractère non-réversible et cumulatif de la technologie (*'path dependent'*). Dans son modèle, la technologie suit une trajectoire soutenue par la

¹²⁷ Carlton D., Klammer J. (1983) "The need for Coordination Among Firms, with special reference to Network industries" in : The university of Chicago Law Review, Vol 50, pp. 446-465.

¹²⁸ Pour David, la capacité d'action est maximale au moment où l'incertitude l'est également (*'blind Giant'* 1987), et diminue avec l'accroissement de l'information.

création de phénomènes d'accumulation de capital matériel (Abernathy 1978, Farell et Saloner 1986, Frankel 1955) et immatériel (David 1985) dans le processus de diffusion. La construction de réseaux d'usage et de production de l'objet technique, et l'incorporation (Abernathy et Clark 1985) des apprentissages dans les générations d'objets techniques amènent les adopteurs, en principe indépendants, à partager une interdépendance les uns vis à vis des autres. Tout en maintenant les hypothèses de rationalité et d'atomisation, Arthur démontre que dans des situations de rendements croissants, les agents sont amenés à construire un choix collectif.

Arthur pose par hypothèse, la possibilité que l'adoption d'une technologie transforme celle-ci et ses caractéristiques. L'auteur fait ainsi du mécanisme d'apprentissage incorporé dans le progrès technique la courroie de transmission dominante des rendements croissants. Avec Arthur, on comprend mieux les conditions économiques dans lesquelles un dominant design tend à émerger au moment du renversement de dynamique technologique observé par Abernathy. Dans cette perspective, il a suffi que le moteur à essence ait été l'objet d'une diffusion importante, qu'un nombre suffisamment important d'inventeurs-bricoleurs se soient attachés à le développer en anticipant son avenir radieux, pour qu'il prenne une avance décisive sur ses concurrents et les élimine rapidement. Il y a deux séries de questions auxquelles ce de standardisation ne répond pas: pourquoi le moteur à essence a-t-il connu des avancées plus décisives que le moteur à vapeur? Quelles sont les caractéristiques du design stabilisées suffisamment pour que les auteurs puissent aujourd'hui parler "du" moteur à essence (¹²⁹)? Sur ces différents points, David a apporté un éclairage déterminant.

1.1 b) David et le concept de standardisation : description d'une réalité historique complexe

Le modèle d'Arthur explique le passage de la compétition technologique à la sélection d'une trajectoire technologique unique. David se demande pourquoi certains designs deviennent dominants, et comment certaines caractéristiques technologiques sont standardisées. Si le point de vue choisi par Arthur est fondamentalement analytique, au sens où l'auteur déploie un modèle de la diffusion, l'angle retenu par David s'efforce de rendre compte et de donner sens à des matériaux historiques.

L'étude menée par David sur le cas QWERTY se veut une illustration paradigmatique, voir parabolique, des théories de la standardisation, à travers l'exposé d'un 'fait stylisé' (¹³⁰). Dans cette étude de cas abondamment citée, David interroge: pourquoi la première ligne des claviers (anglo-saxon) débute-t-elle par les caractères QWERTY? Pourquoi des arrangements -dont il a été démontré qu'ils étaient plus

¹²⁹ Misa montre les batailles livrées avant d'arriver à une définition commune de l'acier. Misa, T. (1992) "Controversy and Closure in Technological Change: Constructing 'Steel'" in: Bijker, W., Law, J. (eds) *Shaping Technology/ Building Society*. MIT Press.

¹³⁰ David, PA. (1985) "Clio and the Economics of Qwerty" in: American Economic Review, Vol 75, n° 2, pp. 332-337.

efficaces- ont ils été régulièrement rejetés depuis les années 1910? Alors qu'il était mis en concurrence avec d'autres technologies dans les années 1870-80, dont le clavier "idéal" techniquement plus attractif (¹³¹), le clavier QWERTY a été élu clavier "universel" au milieu des années 1890, pour le plus grand bénéfice de la firme à l'origine de sa promotion, Remington & Sons.

Choix des caractéristiques techniques, dynamique de mise en relation, et stabilisation de l'objet technique.

Les caractéristiques des objets techniques constituent des modalités de mise en relation de groupes de producteurs et d'utilisateurs. Les standards 'volontaires'- par opposition aux standards *de jure*, imposés par une autorité supérieure- sont assimilables à des conventions -"*agreements intended to facilitate communication within an industry*". Dans cette perspective, la standardisation est l'action d'amener les choses à un standard uniforme - "*standardization - the action of bringing things to a uniform standard*" (¹³²). La standardisation est ainsi un *processus d'action sur les choses*, en conformité avec un accord négocié établissant une *référence commune* entre producteurs et utilisateurs.

David a souligné avec emphase, l'importance des phénomènes informationnels et transactionnels dans le phénomène de standardisation technologique: "*Seen from the most general theoretical perspective, it properly belongs to the domain of information economics; the establishment of standards has greatest significance when economic agents cannot assimilate without substantial costs all the relevant information about the commodities that may be exchanged with other agents, and the processes by means of which those goods and services can be produced. Many features that have been noticed as problematic about the demand for 'standards', and the supply thereof, are not peculiar to standards as such. They are, instead, generic attributes of information as a commodity.*" (David 1987, p. 211).

La Ford T, outre les économies physiques qu'elle a pu générée, a également permis aux consommateurs d'automobiles des premiers temps de cette industrie d'échapper à l'opportunisme et au hazard moral dont ils étaient jusque là tributaires: chaque voiture sortant des chaînes de production de l'entreprise Ford était 'identique', d'une qualité 'égale', garantie par la marque Ford. Les utilisateurs pouvaient aisément s'informer sur ce produit avant de l'acheter. D'un autre côté, il est bien évident que seule une simplification massive, la promotion de l'interchangeabilité des pièces a permis à Ford de bâtir une entreprise contrôlant étroitement la qualité des conditions de reproduction à l'identique d'une 'même'

¹³¹ Une controverse est née sur la question de l'infériorité de QWERTY. Liebowitz, S. et Margolis, S. (1990) "The Fable of the Keys" in: *Journal of Law and Economics*, April 1990, Vol 33, pp. 1-26.

¹³² David, P. (1987) "Some new standards for the economics of standardization in the information age" in: Dasgupta, P., Stoneman, P. (eds) *Economic Policy and Technology Performance*. Cambridge UP., pp. 206-239.

voiture, par l'intermédiaire en particulier, comme il est désormais bien connu, de la simplification et de la spécialisation des tâches d'"exécution", et la prise en charge de la conception des produits, des machines, et des apprentissages liés à la trajectoire technologique par des cols blancs dégagés des conditions de production (¹³³). Abernathy note également l'immense complexité de l'organisation du processus de production d'une automobile, liée en particulier au nombre d'opérations et de pièces impliquées. Ici encore, seule la réduction draconienne de l'incertitude et de la diversité a permis à Ford de mettre en place l'organisation séparée de la production des pièces -et en particulier du moteur- et de l'assemblage final, auquel Ford a dédié une usine complète - modèle d'organisation de l'outil de production largement repris jusqu'à aujourd'hui.

En conséquence, les caractéristiques des objets techniques ne correspondent pas uniquement à une *logique technique*, mais également à une *logique transactionnelle*: "*Many goods are 'compatible', or standardized' in the sense that different manufacturers provide more interchangeability than is logically necessary*" (¹³⁴). Ainsi, dans le cadre d'un marché en émergence caractéristique des premières étapes de la compétition technologique, la coordination des actions économiques requiert l'établissement d'une certaine capacité d'anticipation, une certaine connaissance commune facilitant les transactions, l'établissement de relations entre utilisateurs (¹³⁵) et producteurs (¹³⁶). "*Having a standard can lower transaction costs by making it simpler for all the parties to a deal to recognize what is being dealt in, and also by limiting the scope for the exploitation of informational asymmetries*" (David, 1987, p. 212).

Lorsque Christopher Sholes, imprimeur, a déposé son invention, rien ne semblait le prédisposer à devenir le père du clavier utilisé par des millions d'anglo-saxons depuis plusieurs générations. Son prototype de machine à écrire n'était pas véritablement au point, sur le plan technique, et il ne disposait pas non plus d'une avance sur ses concurrents, puisque son brevet était répertorié comme le '52^{ème} brevet de machine à écrire déposé aux Etats Unis'.

L'ordre du clavier 'QWERTY' est né d'une double mise en relation. Premièrement, il résulte de la forte interdépendance technico-économique entre le clavier et la machine à écrire dans son ensemble, avec laquelle il était d'abord totalement solidaire. A la recherche d'une machine à écrire facile à fabriquer et

¹³³ Hatchuel, A. (1994) "Frédéric Taylor, une lecture épistémologique. L'expert, le théoricien, le doctrinaire" in: Bouilloud, P., Lécuyer, JP. *L'invention de la gestion*. L'Harmattan.

¹³⁴ Farrell, J., Saloner, G. (1985) "Standardization, Compatibility, and Innovation" in: *The Rand Journal of Economics*, Vol 16, n°1, Spring 1985, pp. 70-83.

¹³⁵ Eymard -Duvernay a analysé la relation entre standardisation des biens, qualité, et coordination économique. Eymard-Duvernay, F. (1989) "Conventions de qualité et formes de coordination" in: *Revue économique*, Vol 40, n°2.

¹³⁶ Thévenot a analysé l'importance de la standardisation des 'formes' dans le fonctionnement efficace de la production. Thévenot, L. (1985) "Les investissements de forme" in: *Conventions économiques, Cahiers du CEE*, n°29, pp. 21-71.

facile à employer, les premiers concepteurs ont rencontré un problème technique majeure: construire un système mécanique qui permette à l'utilisateur, en un même point focal d'impression, de poser alternativement n'importe lequel des 26 caractères et des quelques signes que contient un clavier, tout en déplaçant le papier automatiquement de manière à ce que ces caractères se juxtaposent pour former des phrases harmonieuses. Les claviers ont tantôt été disposés au dessus, ou en face de la machine, le papier tantôt acheminé par le haut ou par le bas, les caractères tantôt disposés en arc de cercles, les clés disposées de façon indépendantes ou gravées dans un même cylindre... Les premiers prototypes de la machine à écrire inventée par Sholes se caractérisaient ainsi par une série de choix techniques concernant les matériaux, les dispositifs mécaniques, leur positionnement, leurs techniques de fabrication... Les choix effectués imposaient à l'organisation des touches du clavier, un ordre défini - proche de Qwerty - afin de limiter les problèmes d'amalgames et de chevauchement des clés. Deuxièmement, le choix de QWERTY est lié à l'association de Sholes avec l'entreprise Remington. La série QWERTY a résulté, outre les impératifs techniques de la machine à écrire Sholes-Remington, de savoirs faire commerciaux de Remington, acquis dans la distribution de produits standardisés ⁽¹³⁷⁾ *“l'astuce consistant à réunir dans la première ligne les lettres permettant aux commerciaux d'impressionner leurs clients en tapant très rapidement le nom de la machine: TYPE WRITER.”* (David, 1985, p. 333).

La description du processus de stabilisation du clavier 'QWERTY' nous amène donc immédiatement aux alliances tissées par Sholes. Sans elles, Sholes ne serait sans doute jamais sorti de l'anonymat commun à ses 51 co-inventeurs ⁽¹³⁸⁾. David note essentiellement deux alliances déterminantes: l'une avec un homme d'affaire inspiré, et l'autre avec la société Remington. L'implication de Remington a abouti à une reconception du design - sous l'impulsion des ouvriers qualifiés de Remington, auteurs de 'nombreuses modifications' - et à sa standardisation. La série QWERTY est sortie définitivement fixée de cette alliance. Remington a donc assuré le passage du prototype au produit, en apportant ses compétences et son expérience en matière de production et de commercialisation et en contribuant à tisser les liens d'un véritable marché technologique: *“To understand what happened in the fateful interval of the 1890's, the economist must attend to the fact that typewriters were beginning to take place as an element of a larger, rather complex system of production that was technically interrelated. In addition to the manufacturer and buyers of typewriting machines , this system involved typewriter operators and the variety of*

¹³⁷ Remington & Sons était une société réputée pour la fabrication d'armes. Houndshell a livrée une thèse mettant en évidence le rôle des entreprises d'armement, liées aux commandes uniformes de l'armée, dans la progression de la standardisation aux Etats Unis. Houndshell, D. (1983) *From the American System to Mass Production, 1800-1932: The Development of Manufacturing Technology in the United States*. Baltimore.

¹³⁸ David livre un article très descriptif, dans lequel le poids de ces alliances est plus suggéré qu'analysé. Pour une analyse Akrich, M., Callon, M. Latour, B. (1988) "A quoi tient le succès des innovations" in: *Annales des Mines*, juin et septembre 1988, pp.4-17 et 14-29.

organizations (both private and public) that undertook to train people in such skills.” (David, 1985, p. 334).

Ces mises en relation, déterminantes dans le succès de Sholes-Remington, n’ont pas pour autant éludé une forte compétition. Plusieurs approches alternatives ont progressivement offert des solutions au problème central de la disposition des caractères, jusque là limitant, ouvrant la voie à l’utilisation d’arrangements de clavier mieux organisés -indépendant du reste de la machine à écrire- comme par exemple celle de la séquence DHIANTENSOR qui contient en une ligne les caractères permettant de composer 70% du vocabulaire de la langue anglaise. Paradoxalement, comme le note David “*Juste au moment où il devenait évident que tout logique micro-technologique au fondement d’une prédominance de QWERTY était en train d’être supprimée du fait des progrès de l’ingénierie de la machine à écrire, l’industrie américaine s’orientait rapidement vers un clavier QWERTY frontal comprenant 4 rangées de touches et auquel on se référerait comme le clavier “universel”*” (David 1985). QWERTY était devenu un design dominant.

Investissement et irréversibilité : de la stabilisation locale à la robustesse globale de l’objet technique

La mise au point de la machine à écrire Sholes-Remington justifie que celle-ci ait figuré parmi les candidats sérieux participant à la compétition technologique, mais comment comprendre le monopole acquis sur le marché par le standard QWERTY? Comment comprendre l’adoption du standard QWERTY par les concurrents même de Remington?

Comme Arthur, dont il s’inspire explicitement, David soutient deux lignes d’explications de ce ‘lock-in’: celle des rendements croissants et celle des externalités de réseau.

Les concepteurs des machines à écrire Sholes-Remington se sont trouvés dans l’obligation de surmonter une série d’obstacles, de construire un environnement favorable à leur machine, de stabiliser son design de manière satisfaisante pour un marché qu’ils ont contribué à créer, et de se doter des ressources nécessaires à sa production massive. Le clavier QWERTY s’est donc trouvé associé à une trajectoire technologique, ponctuée d’améliorations et d’apprentissages.

Mais l’élément le plus original du travail de David réside dans la mise en évidence des externalités de réseau. Nous avons noté précédemment la mise en place progressive d’un marché

technologique complexe autour des machines à écrire. Dans ce système, les utilisateurs ont été le plus souvent des employés appartenant à des organisations. Une série d'institutions, publiques et privées, se sont mises en place transversalement aux organisations afin de dispenser des formations à l'utilisation des claviers. Or, le marché des compétences d'utilisation des machines s'est révélé être un élément déterminant du choix de QWERTY. Ce marché du travail s'est en effet structuré en prenant le clavier QWERTY comme référence: les cours de formation à la dactylographie ont été prodigués selon ce standard. Les organisations ont donc partagé un même capital, formé sur le marché externe. Cette interdépendance a eu un effet boule de neige sur les décisions d'adoption ("Snowball effect" évoqué précédemment). Un contexte de diffusion favorable à QWERTY et défavorable à ses concurrents s'est progressivement mis en place.

D'un côté, et paradoxalement, la progression de l'ingénierie a progressivement libéré les claviers des machines de l'obligation d'un arrangement QWERTY - lié aux risques de chevauchement des clés - et ouvert la possibilité d'arranger les clés dans n'importe quel ordre. Cela a réduit l'incitation à imposer un autre standard, puisque l'ordre du clavier et la technologie d'impression se sont autonomisés. QWERTY, dans le même mouvement, a bénéficié d'avantages identiques aux autres arrangements- les concurrents de Remington ont pu aisément l'adapter à leurs machines, et les progrès réalisés sur d'autres systèmes ont pu être transférés d'une machine à l'autre sans affecter le clavier. D'un autre côté, les frais de conversion de la main d'oeuvre formée aux claviers QWERTY n'ont fait qu'augmenter avec le temps, puisque qu'un "stock" de main d'oeuvre - un capital humain- toujours croissant a été constitué. Du fait de la combinaison de ces deux facteurs, il est donc devenu moins coûteux d'"*adapter les machines aux habitudes des hommes que le contraire. Et les choses sont ainsi depuis lors.*" (David 1985 p. 336)

Les théories de la standardisation présentent donc l'intérêt de réintroduire la demande dans l'analyse et de proposer une version totalement renouvelée de la question de la diffusion. Comme dans le cas des théories évolutionnistes, les *trajectoires technologiques* traduisent une dynamique d'investissement. Les concepts de *rendements croissants d'adoption* et d'*externalités de réseau* soulignent la construction progressive d'interdépendances entre les utilisateurs. Les efforts d'amélioration, de standardisation, de création de facilités ou d'institutions communes aux utilisateurs participent de l'élaboration de ce que nous nommons *les conditions d'utilisation* de la technologie. Arthur et David expliquent comment ces conditions sont progressivement construites par l'effet de la dynamique d'adoption. Le caractère informationnel des transactions entre producteurs et utilisateurs incite à la sélection de designs dominants aux caractéristiques techniques identifiées et anticipables. L'irréversibilité et la dynamique de la théorie repose sur la mise en place progressive d'une référence partagée.

Conclusion du paragraphe II : Trajectoire et espace technologiques

“In the early 1980’s numerous producers entered the market with mutually incompatible PC’s, and often with very different ideas of what the functionality of the desktop computer would actually be used for. By the end of the decade an industry standard had been established (IBM).” (Metcalfé , Miles 1994 p. 262).

1) Vers une vision cyclique du développement technologique

Dans sa revue de quelques 650 publications dans le domaine de l’économie du changement technique et de l’innovation, C. Freeman souligne le consensus existant sur la mise en évidence du caractère cyclique du développement technologique (¹³⁹): le développement technologique s’organise

¹³⁹ Freeman C. (1994) “The economics of technical change” in: Cambridge Journal of Economics, Vol 18, pp. 463-514.

généralement en deux phases, l'une d'exploration et de création de diversité, et la seconde de sélection et d'approfondissement d'un nombre restreint de pistes technologiques.

L'étape "exploratoire" est consacrée à la création de diversité. Le foisonnement d'alternatives qui la caractérise est tout à fait essentiel à la construction de la compétition entre technologies. Ces explorations construisent l'espace des choix possibles pour le futur. En matière de technologie, sans cette phase apparemment irrationnelle et chaotique de construction de voies technologiques alternatives, la concurrence ne pourrait pas jouer son rôle électif, et la sélection se ferait sans que les voies explorées, et l'information collectée puissent garantir l'efficacité de la solution retenue. "*Diversity, then, is the fuel that propels evolutionary adaptation*" (¹⁴⁰). La compétition n'a de sens et ne peut exister que si les ressources pour cette compétition sont créées. Le processus de création de ces ressources participe donc tout aussi fondamentalement que la concurrence elle-même aux performances atteintes.

L'étape de sélection favorise l'investissement et les apprentissages par élection d'une voie technologique dominante. A l'occasion de la seconde étape, on observe généralement l'émergence d'une trajectoire technologique dominante, s'imposant progressivement comme la meilleure solution. "*After a period of experimentation, during which information can be collected, it is desirable to choose the most effecient design (assuming the conditions during the experimental phase are expected to persist) and standardize on that one*". (David, Rothwell 1996, p. 191-192).

D. Foray livre une bonne synthèse de la dynamique d'ensemble:

"Il y a au départ une forte incertitude sur les caractéristiques de la population de variantes, la variance et l'écart-type des rendements, la diversité technique et fonctionnelle de l'espace de développement de la technologie générique, etc. Cette forte incertitude invite à construire un schéma de sélection, articulé autour de deux régimes d'apprentissages. Le type d'incertitude évoqué détermine tout d'abord une phase d'exploration extensive et d'expérimentation de l'ensemble du spectre des variantes possibles. L'apprentissage sur les caractéristiques de la population et l'évaluation des qualités des différentes variantes possibles permettent de diminuer l'incertitude sur les performances relatives des différentes variantes et d'identifier progressivement 'la meilleure variante' susceptible d'être sélectionnée. Au terme de cette phase d'apprentissage par la diversité, on disposera d'une information satisfaisante sur la distribution des performances de la technologie générique, selon ses différentes variantes. Il est clair qu'il n'y a pas une distribution unique et que selon les critères de performance privilégiés, la distribution aura plusieurs formes (...) Au terme de cette phase d'apprentissage, il devient donc possible de sélectionner une (ou un petit nombre de) variante (s) et de procéder à l'amélioration intensive de celle-ci par un usage répété. L'usage répété et la standardisation permettent en effet d'identifier les irrégularités structurelles qui seront à la source de nouvelles investigations. La plus grande partie des gains de productivité seront obtenus au cours de cette seconde phase" (Foray, 1996, p. 263).

Un modèle du développement technologique

¹⁴⁰ David, P. Rothwell G.(1996) "Standardization, Diversity, and Learning: a Model for the Nuclear Power Industry" in: International Journal of Industrial Organization, p. 186

Une question cruciale est alors d'expliquer, comme l'a très bien noté C. Freeman, comment on passe de l'une à l'autre étape: "*how relatively ordered processes of technical change can emerge from the diversity and uncertainty associated with invention and innovation*" (Freeman, 1994, p. 483)

En d'autres termes, si l'on s'accorde à reconnaître l'existence d'un mouvement qui transforme la nature profonde de la dynamique technologique au cours de son développement, il devient tout à fait essentiel de mieux comprendre la nature de cette transformation, et comment elle intervient. Celle-ci se situe en effet au cœur de la tension dynamique de l'innovation, d'une part, et d'autre part, éclaire de manière cruciale les phénomènes de diffusion technologique. Le cadre des théories de la diffusion offre une perspective trop étroite pour résoudre l'ensemble de ces questions. Résoudre la question du changement technologique, ou comme nous l'avons formulé au début de ce chapitre du progrès technique, nécessite de s'intéresser de près au développement technologique et à sa dynamique.

Ce n'est que récemment, sous l'impulsion des travaux des économistes de la standardisation que la complexité des arbitrages en jeu a pu être mise à jour. Ces arbitrages se traduisent par la mise en place d'un 'effet ciseaux'. Dans un premier temps, cet effet favorise l'expression créatrice d'une multitude d'entrepreneurs bricoleurs, au prix d'un certain désordre technologique, et d'une multiplication des produits, des procédés et des entreprises productrices. Dans un second temps, la dynamique se renverse en faveur d'une mise en ordre, relayée par la mise en place d'une structure de marché oligopolistique, voire monopolistique, soutenue par une capitalisation massive, et ordonnée autour d'un ou de quelques standards dominants ⁽¹⁴¹⁾.

La théorie de la standardisation a constitué un apport théorique considérable en montrant comment, dans un contexte de concurrence technologique, une technologie sous-optimale pouvait être sélectionnée par des agents rationnels. Partant de ce point névralgique de la sous-optimalité, les théoriciens de la standardisation ont opéré un véritable basculement épistémologique dans le regard des économistes sur la question de la diffusion: "un nouveau paradigme en économie de la technologie" (Foray, 1989, p. 16). Le cadre théorique qu'ils ont développé permet de dépasser les principales limites des théories traditionnelles de la diffusion. Retenons trois points principaux:

(1) *Trajectoire technologique et compétition technologique*

¹⁴¹ Utterback, J., Suarez, F. (1993) "Innovation, compétition, and industry structure" in : Research Policy, Vol 22, pp. 1-21.

Les éléments présentés jusqu'ici militent vivement en faveur d'une représentation trajectorielle du développement technologique. Ce point de vue permet de rendre compte de trois dimensions essentielles de la technologie: le poids de l'apprentissage, le caractère cumulatif, et le caractère 'path-dependent'.

Nous disposons donc d'une première base théorique et empirique pour interpréter le paradoxe de David : la dynamique technologique se développe le long d'un chemin où se mêlent création et diffusion, en suivant un cycle où alternent des étapes de création de variété et de sélection.

Le renversement de la dynamique s'accompagne d'une transformation radicale de la situation économique au cours du cycle:

(a) la première phase, exploratoire, se caractérise par une forte incertitude sur la technologie, sur les performances, sur les marchés: une multitude de pistes technologiques peuvent exister, mais elles demeurent floues, intuitives et ne vivent, souvent, que dans l'imagination de quelques innovateurs, ou au mieux, regroupent un producteur et quelques utilisateurs. Les projets et les évaluations de la situation divergent d'un groupe de conception à l'autre, d'un groupe d'utilisateur à l'autre. Les avantages traditionnels des grandes entreprises (barrière à l'entrée, économies d'échelles, économies d'apprentissages, ressources et capital) s'estompent face à un marché souvent limité et fortement segmenté (Mueller et Tilton 1969). On peut voir la phase exploratoire comme un effort collectif mené pour définir un *espace technologique*, et le mettre en correspondance avec des méthodes et des outils de production et des utilisateurs. Il est possible de se représenter cette étape comme l'écriture multiple et collective de scénari de développement technologique.

(b) La seconde étape peut être représentée comme la mise en place de ces scénari au sein d'une forte compétition technologique et économique. Le point essentiel ici est que, du fait des ressources nécessairement limitées (Willinger, Zucovitch, 1993), pour profiter du caractère cumulatif de la technologie, il faut concentrer les investissements sur quelques alternatives, en abandonnant une multitude de pistes potentielles. S'engage alors une course à la diffusion, fondée sur des investissements visant un marché développé, une production en grande série, des apprentissages de plus en plus localisés. Les utilisateurs jouent un rôle actif dans la sélection, mais aussi le développement des alternatives technologiques (Foray 1989, Bijker et Pinch 1987).

(2) *poids de la dynamique d'adoption*

L'un des points marquants des développements récents de l'économie de la standardisation est la mise en lumière du poids considérable de la dynamique d'adoption dans le développement technologique. De nombreuses implications de cette proposition demeurent à notre sens largement inexplorées. Néanmoins, cette perspective a contribué à placer les utilisateurs et les usages des biens au coeur de l'analyse, en montrant que leur seule influence conduit à des phénomènes de 'lock-in', d'irréversibilisation, influent fortement sur l'orientation du progrès technique: la diffusion forme la technologie (Foray 1989).

Par rapport aux thèses diffusionnistes, il s'agit d'abandonner l'hypothèse d'un milieu constitué, d'un objet défini, et d'une force d'attraction animant cet objet (Mansfield 61). Les adopteurs forment un réseau d'acteurs intéressés à une technologie (Callon 1992, David 1992, David et Foray 1994). Le processus de diffusion est un processus de co-construction des utilisateurs et de la technologie (Abernathy 1978): en d'autres termes, la diffusion n'est donc plus considérée comme le déroulement d'un programme, ou le dévoilement d'un potentiel, mais comme la construction d'un réseau-marché mettant en relation une technologie et ses utilisateurs (Foray 1989; Callon 1992).

(3) Le développement technologique comme processus de création et diffusion

L'ensemble de ces développements permet aujourd'hui d'envisager l'intégration, dans une même approche de la création et de la diffusion technologique autour des concepts de *trajectoire technologique*, de *dominant design*, et de *standardisation*. Comme l'indique D. Foray, la grande division qui a longtemps parcouru le champs de l'économie du changement technique est en passe d'être résolue: "*Quelle est la conception économique de la technologie que véhicule l'approche des rétroactions positives? Cette conception qui rejoint en particulier les plus récents résultats de la sociologie des sciences et des techniques (Callon 1992), revient à affirmer qu'il n'y a pas matière à différencier des phases de créations et de diffusion: c'est l'adoption et l'usage qui confèrent au bien son mode d'existence*" (Foray 1992 p. 18)

Les développements récents de la théorie de la standardisation s'efforcent désormais de réaliser la synthèse, en inscrivant la diffusion dans le cycle général du développement technologique. Les apports principaux de ces développements théoriques ont reposé à la fois sur le fait d'avoir fait sortir l'économie du changement technique d'un déterminisme technologique sclérosant, d'avoir informé la question de l'interdépendance technologique, et d'autre part, d'avoir ouvert la voie, en mettant le doigt sur des mécanismes précis d'articulation de l'offre et de la demande - les rendements croissants et les externalités de réseau - à un questionnement orienté vers la recherche des mécanismes de construction du

marché de technologies en concurrence. *In fine*, la standardisation apparaît comme un phénomène intimement lié au développement technologique et aux caractéristiques des processus d'innovation.

2) Vers le concept d'espace technologique.

L'ensemble des développements théoriques présentés nous ont amenés à former un concept, celui d'*espace technologique*. Le concept d'espace technologique s'efforce de capitaliser à la fois les avancées réalisées sur l'offre de technologie, en particulier sous l'impulsion des travaux évolutionnistes, et sur la demande, en référence bien entendu à l'économie de la standardisation. Nous cherchons à intégrer à la fois une perspective trajectorielle de la technologie, que l'on peut représenter comme un axe horizontal décrivant le temps, et les interactions compétitives existant entre plusieurs 'technologies' ('competing technologies'), conçues comme la prise en compte par un axe horizontal de la mise en place d'une multitude d'innovations concurrentes simultanément en différents lieux de l'économie. L'*espace technologique* vise ainsi à conceptualiser la scène compétitive décrite par Abernathy dans son étude sur l'automobile. Il épouse l'ensemble de ce que nous avons appelé le cycle de développement technologique, en ne considérant pas ses différentes phases de façon séparées mais comme un tout.

Comment décrire les objets techniques ⁽¹⁴²⁾

Prenons au sérieux l'idée que les objets techniques sont une manifestation d'un tout plus large que nous appellerons technologie ('*technologie générique*' Zuscovitch 1985). Ajoutons l'idée fondamentale mise en évidence par Zuscovitch, que la technologie en question n'évolue pas indépendamment de son inscription dans les objets techniques, mais par elle: la technologie est '*vivante*' et s'incorpore séquentiellement dans des solutions techniques spécifiques. L'innovation est le mode essentiel d'évolution de la technologie: la mise en place d'objets techniques innovants catalyse la création de nouveaux savoir et savoir faire. Le développement technologique passe donc par l'innovation, au sens de création de nouveaux produits et/ou de nouveaux procédés. Comment alors décrire les objets techniques et leur dynamique?

Les objets techniques sont des éléments hétérogènes.

Prenant l'exemple des technologies de l'information, et plus particulièrement l'exemple de l'ordinateur, E. Steinmuller ⁽¹⁴³⁾ illustre un point essentiel: un objet technique est la plupart du temps le

¹⁴² Akrich, M. (1987) "Comment décrire les objets techniques" in: Technique et Culture, Vol 9, pp.50-62.

produit composite d'éléments multiples et hétérogènes (¹⁴⁴) évoluant sous une double contrainte, une logique propre, liée à ses différentes caractéristiques, et une logique de système, liée à son l'intégration de ses différentes composantes (¹⁴⁵). On peut produire une métaphore de cette représentation: l'objet technique est un noeud de réseaux (¹⁴⁶).

La dynamique technologique se développe selon trois axes

Rosenberg assimile la dynamique technologique à une activité de résolution de problème (Rosenberg 1982, Dosi 1982, 1988, Hughes 1983 ¹⁴⁷). Celle -ci peut revêtir deux formes distinctes. Premièrement, *l'espace technologique* s'organise autour d'une *fonction*. Ainsi, la fonction de la métallurgie consiste à transformer des minerais bruts et variés en métaux, c'est à dire en produits homogènes aux caractéristiques contrôlées, utilisables dans l'industrie, la construction etc (Rosenberg 1982). Pour remplir cette fonction, différentes alternatives technologiques, représentant différents arbitrages ('*Trade-offs*' Dosi 1988), émergent et entrent en concurrence. Nous nommerons cette dynamique, *dynamique intégrative*, car elle contribue à forger des objets techniques cohérents (¹⁴⁸). Deuxièmement, l'auteur estime que de l'hétérogénéité interne des objets techniques naissent des tensions (imbalances, bottlenecks) contribuant à orienter l'activité innovatrice (focusing devices). Steinmuller (1996) estime ainsi que l'essentiel des changements intervenus dans le domaine des technologies de l'information ont consisté à prendre en charge des goulets d'étranglements définissant des '*trajectoires d'amélioration technologique*'. Chaque alternative technologique progresse ainsi le long d'une *trajectoire technologique*. Nous nommerons cette dynamique, dynamique de spécialisation, car elle tend à renforcer et à approfondir la cohérence des composantes individuelles formant les objets techniques.

¹⁴³ Steinmuller, E. (1996) "Technological Infrastructure in Information Technology Industries" in: Teubal, M. et Alii (eds) *Technological Infrastructure Policy. An International Perspective*. Kluwer

¹⁴⁴ Cette vision hétérogène des objets techniques rejoint les réflexions de la sociologie de l'innovation "*Machines and devices are obviously composite, heterogeneous, and physically localized*" Akrich, M. (1992) "The De-Description of Technical Objects" in: Bijker, W., Law, J. *Shaping Technology/ Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press. Pp. 205-224. et Akrich M. (1987) op cit.

¹⁴⁵ Henderson, R. Clark, K. (1990) "Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms" in: *Administrative Science Quarterly*, n°1, March 1990, pp. 9-30.

¹⁴⁶ Akrich, Callon, Latour (1988) op cit.

¹⁴⁷ Hughes (1983) en déduit ce qu'il nomme une méthode du reverse salient-critical problems qu'il décrit de la façon suivante: "As noted earlier, reverse salients are obvious weak points, or weak components in a technology which are in need of further development. A reverse salient is obvious, and creative imagination is not needed to define it. As will be shown, the non durability of experimental lamp filaments before 1878 was a reverse salient in incandescent lamp systems. Edison and many others were aware of the need for inventive activities in this area. In contrast to a reverse salient, then, the definition of critical problems by an inventor does require creative imagination. Critical problems result from the inventor's defining the reverse salient as a problem, or a set of problems, that, when solved, will correct the reverse salient"

¹⁴⁸ Une illustration originale de cet effet de cohérence est donné par Steinmuller (1996) à propos des cartes perforées. Les cartes perforées étaient une spécialité d'IBM avant même que l'entreprise ne se lance dans la construction d'ordinateurs. L'auteur estime que la logique des cartes perforées à profondément et durablement marqué le développement technologique du secteur.

En fonction des problèmes jugés prioritaires, et des éléments les plus stratégiques du système, Steinmuller note que le 'leadership' technologique passe volontiers d'une logique à l'autre, incombant tantôt aux représentants d'une dynamique intégrative et tantôt aux représentants d'une logique de spécialisation. Ainsi, dans le cas de l'industrie informatique, progressivement, des compétences devenues stratégiques pour le développement de l'industrie tels que la conception des microprocesseurs et des logiciels se sont trouvées localisées dans d'autres organisations qu'IBM, "*the innovative lead passed upstream to Intel and Microsoft in the next generation of microprocessor based on Intel's 80386 which relied on the interaction between microprocessor and software technology while IBM's contribution to system integration was effectively bypassed by many imitators*" (Steinmuller, 1996, 133) ⁽¹⁴⁹⁾.

Un artefact comme un ordinateur ou une locomotive forme donc logiquement un assemblage matériel au noeud d'une dynamique technologique multiple. L'artefact peut être représenté comme un point nodal situé sur une matrice dynamique caractérisée par trois axes définissant un *espace* de développement technologique: (1) un *axe intégratif* qui tend à orienter l'activité innovatrice de manière systémique (2) un *axe de spécialisation* lié au fait que chaque élément du système technique peut appartenir à d'autres réseaux et subir l'influence d'autres dynamiques. (3) une *axe coopératif-compétitif* qui tend à orienter l'activité par transfert, différenciation ou imitation entre solutions techniques existantes. A chaque axe correspond un réseau ou une série de réseaux particuliers ⁽¹⁵⁰⁾ comprenant des acteurs, des savoir ⁽¹⁵¹⁾ et des capitaux particuliers.

(1) L'axe 1 renvoie à la construction d'une cohérence, d'une cohésion, d'un certain 'alignement' ⁽¹⁵²⁾ des différents composants formant l'objet technique (Callon 1992). Il représente donc une dynamique de coordination, d'incorporation, de mise en cohérence, d'intégration, d'arbitrage, d'autonomisation du design comme un tout ⁽¹⁵³⁾, de simplification ⁽¹⁵⁴⁾. On peut l'entendre comme un effort pour créer une

¹⁴⁹ Le lecteur pourra consulter avec intérêt l'excellente démonstration de Henk Van Den Belt et Arie Rip (1987) "The Nelson-Winter-Dosi Model and Synthetic Dye Chemistry" in: Bijker, W., Hughes, T., Pinch, T. *The Social Construction of Technological Systems. New Directions in the Sociology and History of Technology*. MIT Press. Pp.135-158.

¹⁵⁰ Callon, M. (1992) "Sociologie des sciences et économie du changement technique: l'irrésistible montée des réseaux technico-économiques" in: Coll. CSI, *Ces réseaux que la raison ignore*. L'Harmattan. Pp. 53-78.

¹⁵¹ les produits existants agissent comme des 'focusing devices': "*that serve to define the framework within which improvements can be identified and made (...) the original transistor was a fragile, unreliable, and expensive piece of apparatus. It was only the subsequent improvements in that original, primitive device that made the later microelectronics revolution possible. In this as in other cases, the advance of technology went hand in hand with the advance of science. The invention of the transistor in 1948 rapidly transformed solid-state physics from a small subspecialty into the largest subdiscipline of physics. This was true within the university scientific community as well as within private industry.*" (Nelson, Rosenberg, 1993, p.8- 9).

¹⁵² "*la traduction réussie crée cet espace commun, cette équivalence, cette commensurabilité qui manquait: elle aligne, tandis que si elle échoue, A et B retournent à leur incommunicabilité, se reconstruisant, en se désalignant, des espaces sans commune mesure*" (Callon, 1991, p. 212)

¹⁵³ Abernathy et Clark notent l'importance de ce processus d'autonomisation dans le cas de l'industrie automobile, qui dans les premiers temps subissait une forte influence de la part des constructeurs de cycles et de locomotives et wagons. Une progressive spécification des composants a permis de développer un marché spécifique et totalement différent à celui ouvert par les premiers

identité collective, pour établir les frontières et spécifier, identifier, stabiliser les éléments composant l'artefact, les positionner les uns par rapport aux autres. A partir des principaux arbitrages réalisés (trade-off) et de la prise en compte des principales contraintes ainsi incorporées, de la mise en évidence des principaux goulets d'étranglements qui en résultent, il est possible de définir une trajectoire technico-économique.

(2) L'axe 2 correspond à une dynamique de spécialisation et d'autonomisation des réseaux que noue l'artefact: Sahal (Sahal 1985) nomme *strutural innovation* "the process of differential growth whereby the parts and the whole of a system do not grow at the same rate" (¹⁵⁵). Le mouvement d'intégration (axe 1) peut générer un effet de spécialisation (axe 2). Dans le cas de l'ordinateur, les réseaux de conception-production-utilisation des logiciels, des cartes mères, des disques durs, des contrôleurs, des cartes graphiques, des cartes son, des microprocesseurs, des écrans sont mis en relation dans l'ordinateur, mais s'approfondissent avec le développement technologique, acquérant une certaine autonomie: cela se traduit par une capacité innovative et un pouvoir de négociation de la part de Microsoft et d'Intel vis à vis d'IBM (Steinmuller 1996). Chaque composant d'un objet technique peut également appartenir à un ou plusieurs autres réseaux qui influencent son identité et sa dynamique. Cela rejoint ce que Zuscovitch appelle 'dynamique interactive' (Zuscovitch, 1986). L'économie des nouveaux matériaux fournit un exemple emblématique de cette dynamique (¹⁵⁶).

(3) L'axe 3 se caractérise par des relations de 'compétition-coopération' entre alternatives technologiques (¹⁵⁷), entre 'technologies' au sens de Cowan et d'Arthur. La compétition technologique peut stimuler une série de développement tant au niveau global, qu'au niveau des différents composants d'un artefact. Tout en maintenant sa cohérence propre, une *technologie* peut adopter certaines composantes développées par ses concurrents. L'adoption massive et le succès de certaines composantes

assemblages. L'automobile a établi sa propre dynamique de développement technologique en même temps qu'elle a développé ses propres marchés. "In similar fashion, the application of vanadium steel alloy in engines and chassis components was an important part of the development of a lightweight vehicle. When Ford and his engineers found an alloy that afforded three times the design strength of traditional materials, it freed them to apply new concepts of lightweight design to many parts. As a result they were released from many old constraints that had been adopted from carriage technologies. The engine and the chassis came to be based on concepts of flexible lightweight strutural design as opposed to the more traditional designs that sought durability stout rigidity. Improved reliability and lightweight design were important elements in the creation of a rugged, durable vehicle, able to withstand the rigors of rural operation, and yet sufficiently low cost to permit the development of a mass market." (Abernathy, W, Clark KB (1985) "mapping the winds of creative destruction" in: *Research Policy*, Vol 14, pp. 3-22.)

¹⁵⁴ Cohendet et Alii (1991) notent ce point essentiel de la relation entre intégration et simplification "While the process of integration results in simplification of the overall productive system, the materials themselves are becoming more complex, as they 'integrate' several functions" (p. 380)

¹⁵⁵ Sahal, D. (1985) "Technological guideposts and innovation avenues" in: *Research Policy*, Vol 14, pp. 61-82.

¹⁵⁶ Cohendet, P., Ledoux, MJ, Zuscovitch, E. (1991) "The evolution of new materials: a new dynamic for growth" in: OECD, *Technology and Productivity: the Challenges for Economic Policy*. OCDE, Paris.

¹⁵⁷ Foray, D., Grübler, A. (1990) "Morphological analysis, diffusion and lock-out of technologies: Ferrous casting in France and the FRG." In: *Research Policy*, Vol 19, pp. 535-550.

sur le marché forme une incitation puissante à la mise en circulation transversale. Un exemple est donné par 'la souris', mise au point par Apple, reprise par IBM, puis par Microsoft. Une alternative technologique évolue, et ne constitue pas un monde hermétique. La transférabilité s'appuie sur l'existence de bases communes, de références partagées, de ressources similaires (¹⁵⁸). Les éléments intégratifs de l'espace technologique dans son ensemble, dont la 'standardisation' est l'exemple le plus extrême, oeuvrent à la dynamique technologique.

En conjuguant ces trois axes, on obtient l'image d'un objet technique comme point nodal d'une matrice de réseaux de divers, dont chacun répond à une triple dynamique, celle de l'intégration, de la spécialisation et de la compétition-coopération.

Chapitre 3:

Etude de cas. L'exemple édifiant de la technologie PCI

¹⁵⁸ Outre les interactions entre artefacts, on peut évoquer les relations de coopération-compétition entre entreprises, et les réseaux professionnels d'ingénieurs.

“La somme des connaissances spécifiques, concernant les techniques et les institutions, nécessaires pour apprécier tous les détails de ce genre d’étude empirique met toutefois rapidement à rude épreuve la patience de toute audience d’économistes, même la plus tolérante. Pour le meilleur ou pour le pire, nous évoluons dans un environnement intellectuel où faire jaillir l’étincelle des faits exige un travail long et ennuyeux”
(David 1992).

Les développements qui suivent sont destinés à confronter les principaux apports de l’économie de la standardisation à une étude de cas détaillée. Il s’agit d’éviter l’un des faits reproché aux économistes de la standardisation à propos de la faiblesse de leur base empirique (Leibowitz & Margolis 1994, 1995). L’objectif de cette troisième partie est double: proposer une illustration des phénomènes de standardisation et des principaux éléments conceptuels qui lui sont liés, et vérifier la validité des thèses proposées par les économistes de la standardisation.

Dans cette perspective, notre étude de cas a été structurée autour de l’analyse des *trajectoires technologiques* et de *la compétition technologique*. Ce choix a supposé de suivre le développement d’une famille de technologies sur un terme suffisamment long pour y faire apparaître les différentes phases du développement: exploration-compétition, standardisation, sélection-approfondissement. Nous chercherons à identifier les *rendements croissants d’adoption* et les *externalités de réseaux*, et à évaluer leur rôle dans la standardisation. Nous allons développer une analyse en deux parties. Premièrement, nous introduirons la notion d’espace technologique, qui nous permettra de situer les principales composantes de la

compétition technologique. Deuxièmement, nous procéderons à une analyse historique de la dynamique d'adoption, et du développement technologique qui en a résulté.

L'étude de cas va nous entraîner dans un univers qui a longtemps représenté une vision archétypique du monde industriel, celui des grandes usines sidérurgiques. A l'intérieur de ces sites "intégrés", entourés de barrières et dont les issues sont scrupuleusement surveillées par des gardes, on découvre une véritable cité avec ses rues, son port, ses immeubles, ses voies ferrées, ses restaurants, et des milliers d'âmes qui s'y affèrent en permanence. Certes, l'"urbaniste" qui a conçu ces cités n'était pas particulièrement conformiste ni soucieux d'esthétique: des milliers de tuyaux aux circonférences variées jaillissent au hasard de carrefours; des hangars gigantesques abritent de mystérieux brouahahas et des chocs inquiétants y retentissent; d'étranges poussières rouges, rouilles, ou noires couvrent le sol par endroits, des odeurs étranges aux accents sulfureux se dégagent de l'ensemble. En arrivant à proximité des usines, on remarque facilement les haut fourneaux, ils dominent le site par leur hauteur impressionnante. De ces grandes cheminées adossées à des rampes massives émane une sérénité confiante.

Pour l'observateur extérieur, les cheminées se trouvent au coeur de cités improbables, irréelles, et semblent hors du temps. Pourtant, ces drôles de machines vivent, respirent, s'enrhument au rythme de la société et de la nature qui les entourent: les consommateurs consomment moins de voitures, un nouveau gisement de minerai de fer est découvert en Australie, les boissons en canettes supplantent les bouteilles en verre...et voilà que le fonctionnement des cheminées tranquilles s'en trouve transformé. Le haut fourneau sera le personnage principal de cette thèse. Nous décrirons une partie des attentions nombreuses dont il est l'objet. Nous verrons comment des centaines de chercheurs, d'ingénieurs, de techniciens et d'ouvriers collaborent pour modifier certains de ses organes ou lui ajouter une fonction. Nous verrons que le haut fourneau est un enjeu pour l'entreprise, pour l'industrie, mais aussi pour la société prise plus globalement et même pour la planète sur laquelle nous vivons. Les cheminées - haut fourneaux - sont à leur tour extrêmement dépendantes de la société qui les environne. Parfois, des évènements lointains peuvent avoir sur eux des conséquences énormes. Nous verrons comment certains évènements intervenus sur la scène géopolitique ont pu rendre les haut fourneaux malades, et leur ont donné le hoquet, obligeant industriels et scientifiques à se pencher à leur chevet et à déployer des trésors de génie.

IIIA. L'espace Technologique des injections au haut fourneau

1) Opérationnalisation de la notion d'espace technologique et méthode utilisée

1.1) Espace et alternatives technologiques

Les études de cas présentent deux avantages : elles imposent la traduction des ‘concepts au concret’ (Midler 1986) et nécessitent la simplification -représentative- d’un réel complexe. Ainsi, la description ‘empirique’ de la compétition technologique requiert l’identification d’une famille de technologies en compétition, et des ‘*technologies*’ individuelles - ou ‘*alternatives technologiques*’ (Foray, Grübler 1990)- entrant dans cette compétition.

Dans la définition que nous en avons donné précédemment, nous avons insisté sur les trois dimensions dynamiques de l’espace technologique : l’intégration, spécialisation, compétition-coopération. Dans une acception plus opérationnelle, qui nous intéresse ici, nous employons le concept d’*espace technologique* pour rendre compte de l’existence d’un ‘lieu commun’ à une série d’alternatives technologiques, autorisant la compétition entre elles. Dans notre acception, l’espace technologique est évolutif. Ses frontières épousent les frontières de la compétition, il s’élargit lorsqu’une nouvelle alternative apparaît et se comprime lorsqu’une alternative disparaît.

D’un point de vue opérationnel cependant, nous allons projeter l’espace dans un plan synchronique, situé à l’origine de l’action. Cette représentation synthétique de l’espace regroupera virtuellement l’ensemble des alternatives en concurrence sur l’ensemble de la période. L’espace technologique se définit comme l’ensemble des voies technologiques susceptibles de remplir une même *fonction* (Rosenberg 1982, Foray, Grübler 1990). Nous entendons ici le terme *fonction* en relation étroite avec l’*utilisation* faite de la technologie, et l’*utilité* qui en est dégagée pour une série d’adopteurs. L’appartenance à l’*espace* n’est pas ici défini en référence à une logique technique, mais à la définition donnée par les utilisateurs et par leurs comportements d’adoption (¹⁵⁹).

Le concept d’*alternative technologique*’ (Foray, Grübler 1990) identifie les différentes voies technologiques en compétition dans l’espace. Pour nous, le concept d’alternative technologique opérationnalise deux idées essentielles. Premièrement, l’*alternative technologique* correspond étroitement à ce qu’Arthur nomme ‘competing technologies’. Comme le souligne Cowan, les competing technologies repèrent les choix technologiques dont disposent les adopteurs, pour remplir une même fonction. Le

¹⁵⁹ Nous marquons ici une différence conceptuelle et méthodologique importante vis à vis du travail de Foray et Grübler, dont nous nous sommes par ailleurs très directement inspiré. Les auteurs défendent l’idée d’une espace technologique théorique, fondé sur une analyse logique, réelles ou potentielles. Nous prenons en considération uniquement les technologies existantes. Deux raisons essentielles motivent cette divergence: nous prenons au sérieux la thèse de Zuscovitch selon laquelle la technologie est vivante, et n’évolue que par son incorporation effective dans des solutions techniques; nous fondons notre analyse en conformité avec la théorie arthurienne, sur l’idée que la dynamique d’adoption est essentielle à l’existence et à la qualification des technologies.

consommateur peut opter pour une automobile diesel ou essence. Plusieurs entreprises peuvent proposer différentes variantes d'une même voie technologique: bien qu'il arrive fréquemment qu'une alternative technologique soit appropriée par une entreprise unique, ces deux niveaux d'analyse ne se confondent pas. Deuxièmement, *l'alternative technologique* identifie une *trajectoire technologique*. Elle rend compte de l'existence d'un lien *générique* (Zuscovitch 1985) liant entre elles une série de 'solutions techniques' - une série d'objets techniques- dans le temps et l'espace. L'alternative technologique se répand dans l'espace technologique selon un principe d'évolution.

Le concept de *distance technologique* complète utilement cet ensemble. La compréhension de la composition -distribution- de l'espace technologique et de sa dynamique peut s'analyser comme un problème de distance, et de distanciation entre les artefacts existants (Nelson et Winter 1982, Foray et Grübler 1990). La distance mesure des différences entre les *caractéristiques* des différentes alternatives. La question de la distance rejoint un débat large et complexe sur la question de la *compatibilité* et de la *substituabilité* comme critères de définition d'un marché (¹⁶⁰). La *substituabilité* est un point de vue d'adopteur: est ce que les trois alternatives qui s'offrent à lui sont équivalentes du point de vue de la fonction qu'il souhaite leur voir assumer? Si tel est le cas, la compétition prend l'allure classique d'une comparaison entre les coûts d'investissement, les coûts de fonctionnement, et les bénéfices liés à l'efficacité des différents systèmes (¹⁶¹). La substituabilité définit les contours de l'espace technologique. La *compatibilité* est directement liée à l'identification *des alternatives technologiques*. Elle entretient un rapport direct avec la capitalisation de ce que nous avons nommé les *conditions de production* et d'*utilisation* de la technologie, et en particulier avec les dynamiques d'apprentissage. L'incompatibilité se traduit par l'introduction d'une rupture dans la dynamique d'accumulation technologique. L'adoption d'un objet technique incompatible rend obsolètes les savoir et compétences (Frankel 1955). Comme le notent Foray et Grübler, il est possible d'évoquer l'existence d'une distance critique à partir de laquelle une innovation bascule au rang d'innovation majeure, ou radicale.

1.2) Méthodologie

Foray et Grübler (1990) fournissent une méthode d'analyse performante permettant d'intégrer l'essentiel des points théoriques présentés jusqu'ici. Nous nous sommes donc en partie inspiré de leur travail pour présenter notre étude de cas. Ces deux auteurs utilisent le concept *d'espace morphologique*,

¹⁶⁰ Sur les concepts de distance, de similitude, de proximité (Nelson et Winter 1982, Berg, 1989, Foray et Grübler 1990, Callon 1992).

¹⁶¹ Foray et Grübler (1990) soulignent que la substituabilité implique non seulement que les *alternatives technologiques* en concurrence remplissent la même fonction, mais qu'elles partagent également d'autres éléments communs qualifiés de qualitatifs comme par exemple le degré de complexité

lequel définit “l'état de la technologie considérée”, en d'autres termes “la description complète et une classification taxonomique des technologies utilisées” dans l'espace étudié.

Leur concept est inspiré et se construit à partir de la méthode dite de l'Analyse Morphologique, laquelle “consiste en un examen rigoureux et en une évaluation de toutes les alternatives possibles pour chaque partie structurelle d'une problème” (Foray et Grübler, 1990, p.537).

La méthode de Foray et Grübler nous a paru digne d'intérêt pour plusieurs raisons. Premièrement, la méthode est centrée sur l'analyse de la dynamique technologique. L'espace se définit comme l'ensemble des voies technologiques substituables susceptible de remplir une même fonction. La description des principales caractéristiques des alternatives technologiques fournit une série de paramètres “P” permettant de caractériser et de positionner chaque alternative au sein de l'espace. La notion de distance technologique, permet de définir les relations existantes entre les alternatives technologiques à partir de leur positionnement dans l'espace.

Deuxièmement, l'analyse proposée correspond étroitement à notre démarche: une analyse de diffusion technologique dans une situation de compétition technologique. Elle permet de maintenir l'hypothèse de la *compétition technologique*, dans la mesure où précisément l'espace technologique est en quelque sorte une représentation de cette concurrence, tout en inscrivant celle-ci dans une perspective dynamique basée sur l'idée de *trajectoire technologique*. Les auteurs entendent en effet prendre acte du fait que “l'historiographie du progrès technique a démontré que le processus de diffusion technologique était également en lui même un processus de développement technologique.”(Foray et Grübler 1990, p. 535.). Conjugué à une analyse plus classique de diffusion de chaque alternative en terme de part de marché, l'outil forgé par les deux auteurs permet ainsi d'articuler analyse des phénomènes de diffusion et analyse des phénomènes de standardisation technologique. En particulier, nous nous trouverons ainsi en mesure de repérer et de visualiser d'éventuels phénomènes de lock-in et de lock-out.

Troisièmement, la notion d'espace technologique, et la méthode inspirée du travail de Foray Grübler consiste en une analyse technico-économique des technologies d'injection. Le fondement de l'analyse est une description des technologies en concurrence couplée à leurs caractéristiques économiques. Cet ancrage de l'analyse dans le contenu technique des innovations permet de pousser l'analyse au delà des statistiques, et favorise l'interprétation et la périodisation de la dynamique observée. C'est ce que notent les deux auteurs lorsqu'ils écrivent “nous serons en mesure (grâce à l'analyse morphologique) de définir le critère de périodisation du processus de diffusion considéré” (Foray et

Grübler 1990, p. 536). Par ailleurs, la description technico-économique des alternatives technologiques et de leurs évolutions rend possible la prise en compte des deux composantes de la technologie, matérielle et immatérielle (“*artifact and knowledge bases*”). Cette approche ouvre la voie à une analyse accordant une place de choix à l’apprentissage qui accompagne le développement et la diffusion technologique. Elle va nous permettre d’évaluer la pertinence et la portée du concept de *rendements croissants d’adoption*.

Cependant, nous ne procéderons pas à une Analyse Morphologique au sens classique du terme, car si nos objectifs sont communs avec ceux de Foray et Grübler, les méthodes, elles, divergent. L’analyse morphologique est une méthode issue de l’ingénierie. Elle a pour objectif de pouvoir mener une analyse technologique complète fondée sur la logique, explorant l’ensemble des possibilités techniques, qu’elles aient ou non été réellement explorées. Les différentes alternatives et variantes sont alors déduites de manière logique, par calcul mathématique, en fonction de la distance morphologique constatée entre différentes potentialités techniques. L’analyse économique de l’espace technologique de compétition est également réalisé sur cette base. L’avantage évident de cette approche est, ainsi que l’expriment les auteurs, de favoriser une analyse générique, modélisée de la technologie, qu’il est ensuite possible de rapprocher des faits observés. Une telle approche possède en particulier une capacité anticipatoire.

Le choix d’une autre approche méthodologique se justifie à la fois à la prise au sérieux de la thèse de Zuscovitch -technologie vivante-, et à l’importance accordée à *la dynamique d’adoption* dans le développement technologique. Pour nous, une alternative n’est pas une simple réponse logique, mais est le fruit d’une série de processus d’innovation ayant mis en relation des concepteurs, des producteurs et des utilisateurs. Il en résulte une simplicité plus grande de l’analyse, puisque nous ne prenons en considération que les alternatives existantes. L’analyse repose moins sur les capacités d’interprétation et d’anticipation d’experts, que sur l’observation des faits économiques. Il suffit donc d’un travail de documentation historique et statistique pour les décrire. Nous nous sommes appuyé en particulier sur les publications professionnelles d’ingénieurs et chercheurs. La différenciation entre alternatives et variantes s’effectue sur la base des évolutions historiques de la technologie, et des visions développées par les acteurs. La distance technologique n’est pas une distance théorique calculée, bien qu’elle pourrait fort bien faire l’objet d’une modélisation a-posteriori, mais une distance perçue par les acteurs - en particulier les adopteurs réels ⁽¹⁶²⁾ - et affirmée dans les trajectoires. La notion de *substituabilité* est fondée sur une analyse de la dynamique réelle de l’innovation: en d’autre terme, nous nous intéressons aux alternatives dont nous observons qu’elles sont effectivement entrées en concurrence parce que les acteurs (utilisateurs, producteurs et concepteurs inclus) les ont perçues ainsi : les anticipations des acteurs sont ainsi centrales dans notre

¹⁶² Callon livre une discussion stimulante de la notion d’utilisateur potentiel (Callon 1992).

analyse conformément à la thèse d'Arthur ('expectations' Arthur 1988). L'espace est peuplé d'alternatives mettant en relation, effectivement, des fournisseurs et des utilisateurs.

2) L'espace technologique de injections au haut fourneau.

*"A distinctive aspect of the metallurgical industries is that their productive processes are highly fuel-intensive. Metal ores appear in nature in various chemical combinations with less desired materials. The processes by which they are separated and refined have been the object of untold human exploration and ingenuity - and frustration. A decisive consideration in the emergence of particular metals has been the ability to develop technologies that could separate them without incurring outrageously high fuel costs. As a consequence, the industrial use of certain metals has not simply reflected their abundance in nature. There is, for example, far more aluminium in the earth's crust than iron. Nevertheless, iron has for many centuries been the most commonly used of all metals, whereas aluminium was only a laboratory curiosity in the nineteenth century. The reason is that iron can be smelted in blast furnaces and extracted at reasonable costs in terms of fuel and labor. Aluminium ore, in contrast, cannot be smelted in a blast furnace, even though it is similar chemically to iron ore. The only commercially practical ways of extracting aluminium involve huge quantities of energy. Moreover - and this is essential to the analysis of this paper - that energy must be delivered in a particular form." (Rosenberg 1982, *Inside the Black Box: Technology and Economics* p. 83)*

*"L'usine à fonte constitue la première étape métallurgique de la filière d'élaboration des aciers répondant aux besoins de nos clients. La diversification des caractéristiques du métal selon les propriétés finales souhaitées n'intervient qu'à partir du convertisseur, pour ce qui concerne la composition chimique, et de la coulée continue pour ce qui concerne la largeur du produit. La mission de l'usine à fonte est donc de niveler toute la dispersion inhérente aux matières premières géologiques et d'élaborer un métal de haute pureté et de caractéristiques constantes, afin de stabiliser le processus des opérations aval d'affinage. Le haut fourneau, qui constitue l'élément essentiel de cette filière, est le réacteur chimique qui assure l'extraction du fer contenu dans les minerais et l'élaboration de la fonte, alliage liquide de fer carburé. Contrairement à d'autres procédés d'élaboration du fer, le haut fourneau assure un passage du fer à l'état liquide, ce qui permet de parfaitement séparer, par décantation, la phase métallique et les impuretés issues de la gangue des minerais et des cendres de combustion, qui sont rassemblées dans un laitier liquide non miscible avec la fonte." (Steiler et Schneider 1994, *Le livre de l'acier* p. 1192)*

2.1) Fonction des injections au haut fourneau

Haut fourneau et reverse salient

Comme le souligne Rosenberg dans la citation présentée, le haut fourneau (blast furnace) a profondément et durablement marqué l'histoire industrielle en constituant le principal dispositif de raffinage du métal - assurant le passage des matières 'crués' à un matériau 'industriel' - utilisé de façon massive. L'efficacité technico-économique de ce dispositif a permis au fer, puis à l'acier, de s'affirmer, jusqu'à récemment, comme les principaux matériaux associés au développement économique dans la plupart des pays industrialisés (¹⁶³). Ainsi que l'a souligné Rosenberg, le problème prioritaire associé à la

¹⁶³ La longévité du haut fourneau comme procédé industriel est extraordinaire - ce procédé date du XIV^{ème} siècle. Aujourd'hui, la production de l'acier se répartit entre trois 'filières'(1) la filière électrique, développée dans les années 60, repose sur le recyclage des ferrailles (2) la filière réduction-directe, en voie de commercialisation, permet de produire la fonte directement à partir du minerai, quelque soit la forme de l'énergie (3) la 'filière fonte', dont le haut fourneau et le BOF sont les principaux éléments. Une étude de 1988 estimait à 70% la part de marché de la filière fonte. Van Vuuren (1988) "Direct Smelting Processes - an alternative route to liquid iron" in: IISI, Coal and Coke, pp. 59-85; Wright, J. (1994) "Coal utilization in the new Ironmaking process" in: Congress of Science and Technology of Ironmaking Proceedings, Sendai.

fonction de raffinage du métal est celui de l'utilisation de l'énergie. Le lien entre sidérurgie et utilisation d'énergie est tel que les changements intervenant au haut fourneau affectent la scène énergétique mondiale: *“(Figures) indicate the dominant position of steel in the industrial-energy scene. Only the chemical industry rivals it in terms of energy consumption. Moreover, this picture is repeated, with slight variations, in all industrialized countries which have significant steel industries. It follows therefore, that quite small changes in steel industry energy patterns can have considerable impact on the world energy scene”* ⁽¹⁶⁴⁾. Rosenberg en conclut que l'un des axes majeurs de développement technologique dans le domaine métallurgique a consisté à raffiner toujours plus de matière première, avec une efficacité énergétique toujours améliorée *“Thus, given the energy-intensive nature of metallurgy, a major theme in its technical history has been the search for greater efficiency in its utilization of fuel.”* (Rosenberg 1982, p. 84).

Schématiquement, deux flux convergent vers le haut fourneaux: le flux de minerai de fer, qui passe par l'atelier de préparation des charges, et le flux de charbon, transformé en coke dans la cokerie. L'objectif du haut fourneau est de transformer, par fusion-réduction, du minerai de fer, sous différentes formes, en fonte liquide, c'est à dire en fer presque pur (concentration en fer supérieure à 90%), et débarrassé de ses impuretés (phosphore, silice...). Le haut fourneau se présente comme une gigantesque cheminée. On charge le minerai et le combustible par le haut (la charge, ou burden), et on souffle de l'air chaud par le bas par l'intermédiaire des tuyères. Dans un langage plus technique: *“le haut fourneau est un réacteur composé de deux courants opposés de gaz et de solides, dans lequel la charge solide de matières premières descend pendant que le gaz réducteur chaud s'élève.”* ⁽¹⁶⁵⁾.

Rosenberg a donné un récit remarquable de l'alliance progressive scellée entre le coke et le haut fourneau (Rosenberg 1982) au XVIIIème siècle. Le coke est ainsi devenu la source d'énergie unique et incontournable du haut fourneau jusqu'à la période d'après guerre, permettant un essor considérable de la technologie et de la productivité de cet appareil ⁽¹⁶⁶⁾. C'est pourtant cette même alliance, jadis source de progrès, qui est devenue problématique dans l'immédiat après-guerre. Selon un processus très semblable à l'éviction historique du charbon de bois au XVIII ème siècle, le charbon à coke ⁽¹⁶⁷⁾ s'est transformé, face

¹⁶⁴ Monson, J. (1983) “General requirements for non-coking coals in the steel industry” in: *Ironmaking and Steelmaking*, Vol 10, n°5, pp. 196-200.

¹⁶⁵ United States Steel (1971) *The making, shaping and treating of steel*, McGannon, pp422-472.

¹⁶⁶ Rosenberg (1982), Chandler, A. (1972) “Anthracite Coal and the Beginnings of the Industrial Revolution in the United States” in: *Business History Review*, Summer 1972.

¹⁶⁷ Les caractéristiques des charbons “cokéfiabiles”, sont nombreuses et précises. Les charbons à coke, -dits de haute qualité- doivent contenir peu de cendres, peu de soufre, et être relativement secs. Le taux de matières volatiles, qui est, pour simplifier, un indicateur de la combustibilité, doit se situer entre 25 et 30%. Leur prix est donc supérieur à ceux des charbons non cokéfiabiles -dits vapeurs- plus courants.

à une production mondiale à croissance explosive, en ressource rare (¹⁶⁸), et donc chère (¹⁶⁹). Le développement technologique connu par le haut fourneau des années 1950 jusqu'à nos jours, a donc été fortement marqué par ce *goulet d'étranglement*, que l'on peut décrire comme le problème stratégique - ou le *reverse salient* - de l'économie de coke.

L'économie de coke comme fonction

L'économie de coke au haut fourneau peut être considérée comme le problème stratégique au coeur du développement technologique depuis la fin de la seconde guerre mondiale (¹⁷⁰). En tendance, la 'mise au mille' (¹⁷¹) d'énergie au haut fourneau a été divisée par deux entre 1945 et 1975: les pratiques courantes utilisaient environ 1000 kg de coke par tonne de fonte à la sortie de la guerre, pour approcher les 500 kg de mise au mille d'énergie au milieu des années 70 (¹⁷²). Le graphique 1.1 représente la tendance de l'économie de coke sur longue période (1960-1976) dans l'industrie sidérurgique mondiale.

Graphique 1.1. *Tendance récente de la consommation de coke dans les principaux pays producteurs*

¹⁶⁸ Deux facteurs peuvent être évoqués, la rareté relative du charbon à coke - "*peu de charbons réunissent les qualités satisfaisantes pour la cokéfaction*" (K. Warren (1975) op cit. p. 49); et la pénurie chronique de coke. La pénurie chronique de coke peut être attribuée au développement rapide de la production de fonte dans l'après-guerre et à la rigidité de la production des cokeries - qui entre en tension avec les fluctuations fortes du marché sidérurgique-. Ce décalage structurel a poussé les grandes usines à internaliser progressivement leur capacité de production de coke. Chardonnet, J. (1954) *La sidérurgie française. Progrès ou décadence*. A. Colin. Durille, E. (1982).

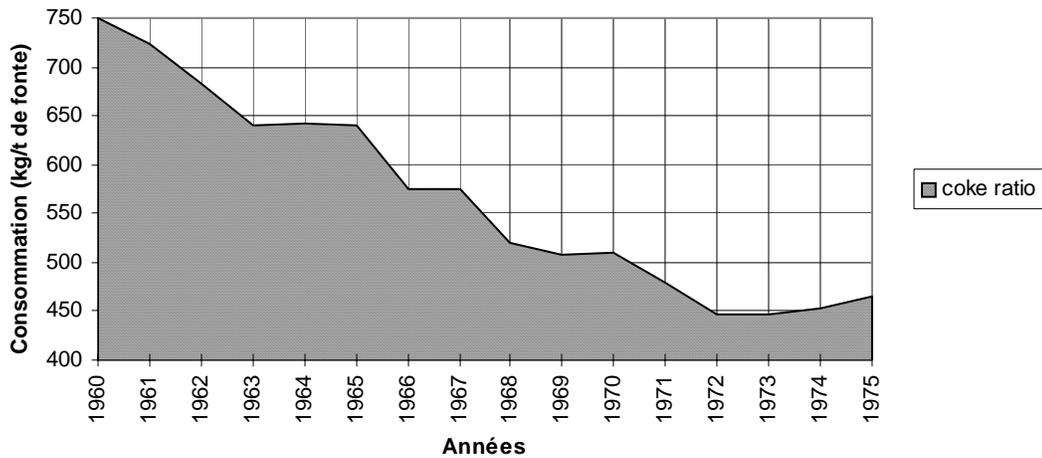
¹⁶⁹ L. Coche estime qu'entre 1955 et 1970, le prix du fuel est resté stable à environ 100 ff la tonne. Pendant la même période, le prix du coke est passé de 75 à 200 FF. "*Price of coke has been increasing, while prices of fuel oil, natural gas, electric power, nuclear energy were either increasing more slowly, or decreasing*" Coche, L. (1972) "Why Injection?" in: Standish, N. (ed) *Blast Furnace Injection*. AIMM. Chap. 1, p.1.

¹⁷⁰ L'économie de coke était déjà l'un des objectifs majeur de la commission de modernisation de la sidérurgie en 1947, à l'origine du premier Plan. Freyssenet, M. (1979) *La sidérurgie française 1945-1979. L'histoire d'une faillite. Les solutions qui s'affrontent*. Savelli.

¹⁷¹ La mise au mil est l'indicateur utilisé par les sidérurgistes pour évaluer leur consommation d'énergie par tonne de fonte produite. Elle se calcule en poids (kg) de matière énergétique chargée au sommet du haut fourneau, par tonne de fonte produite dans la partie basse du haut fourneau.

¹⁷² Durille, E. (1981) *La sidérurgie dans le monde depuis 1952*. Notes et Etudes Documentaires. Documentation Française.

Consommation mondiale de coke (1960-1975)



Source: IISI, (1993) *World Cokemaking Capacity*. IISI

L'espace technologique des injections au haut fourneau

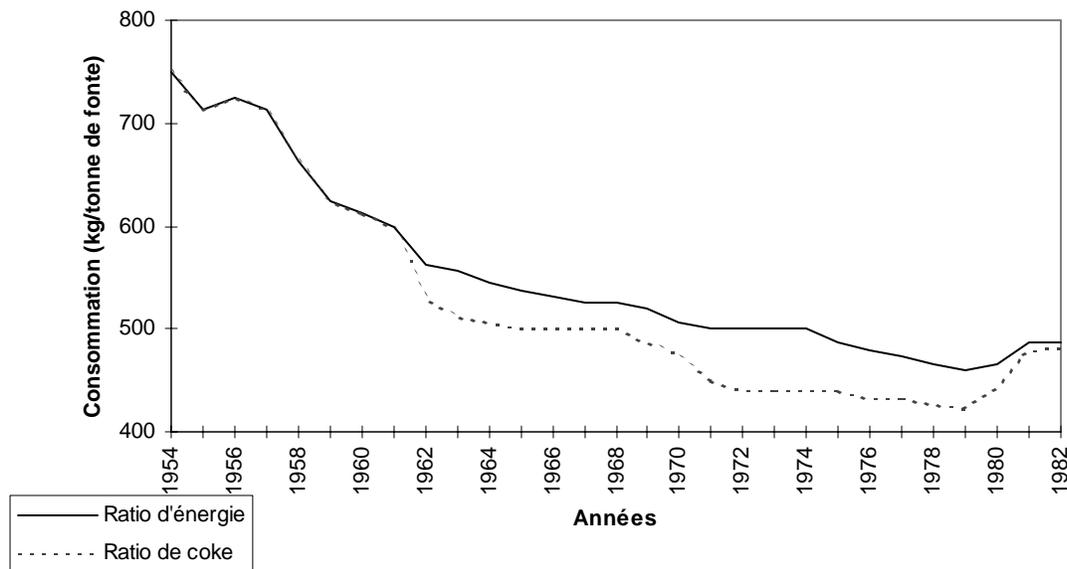
La courbe présentée par le graphique 1.1 présente une allure décroissante relativement régulière jusqu'au milieu des années 70. Elle masque cependant l'existence de deux périodes principales: une période d'optimisation de l'efficacité du haut fourneau dans l'immédiat après guerre, suivie d'une période de développement des technologies d'injection au haut fourneau à partir des années 1960.

Le graphique 1.2, présentant le cas du Japon (¹⁷³), illustre parfaitement le phénomène. Il apparaît clairement qu'à compter des années 60, les principales économies de coke ont été réalisées par substitution d'autres sources d'énergie - ie les injections au haut fourneau.

Graphique 1.2: *Economie de coke et injection au haut fourneau, le cas du japon*

¹⁷³ Le cas du Japon constitue une véritable référence en matière d'économie de coke, sur l'ensemble de la période. Il représente un cas paradigmatique de la tendance mondiale en la matière. Dourille, E. (1981)

Consommation de coke et technologie d'injection. Le cas du Japon



Source: d'après Iwamaru et Haru (1972) in Standish, Blast Furnace Injection et Inaba, S. (1996) in: IISI, Injection technology in Ironmaking and Steelmaking. Le trait pointillé représente la consommation de coke (graphique 1.1). Le trait plein représente la quantité totale d'énergie consommée pour produire une tonne de fonte au hf. La différence représente l'influence des injections au haut fourneau.

Au cours de la première période, les principaux développements technologiques ont visé l'optimisation de l'efficacité du haut fourneau et de sa 'mise au mille' de coke (¹⁷⁴). Cela a été rendu possible par un accroissement considérable de leur taille, par une mécanisation de la charge, par la substitution de charges préparées (sinter, pellet, coke) plus performantes à des charges crues, par l'augmentation de la température du vent, par un meilleur contrôle de la température de flamme - température des foyers (¹⁷⁵).

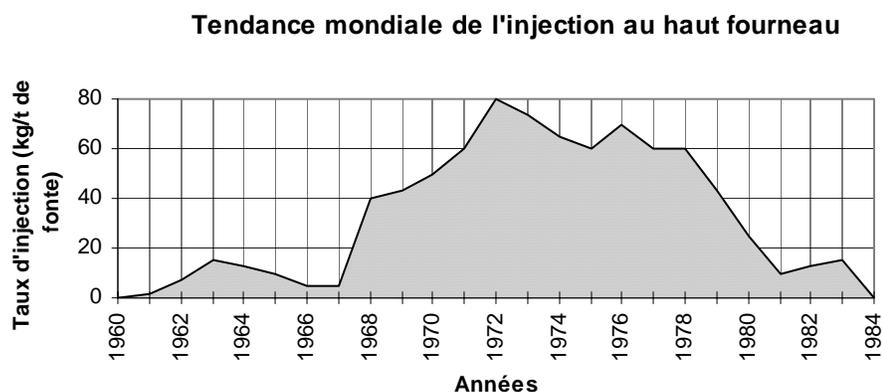
Le développement massif des injections au haut fourneau comme technologie destinée à économiser du coke correspond à l'épuisement progressif du gisement de progrès exploité dans l'immédiat après guerre. L'augmentation rapide du prix du coke, et la relative optimisation de l'efficacité du haut fourneau ont contribué à transformer une petite technologie d'appoint pour faciliter la régulation du haut fourneau, en espace technologique prenant en charge centralement la question de l'économie de coke: "Fortunately or unfortunately, whichever way one may look at it, the progress achieved in these fields is such that there remains hardly any space for further improvement. Our modern blast furnaces

¹⁷⁴ La 'mise au mil' correspond à la quantité d'énergie (kg) nécessaire à la production d'une tonne de fonte. Cet indicateur représente donc un excellent indicateur de diffusion (Gold et Al. 1980, 1984)

have become so efficient that equilibrium conditions have practically been attained. Thus, as the total energy requirements for the production of iron cannot be reduced any longer, the only way to further decrease the coke rate is to replace coke by other forms of energy, which are cheaper and more readily available.” (Decker et Poos, 1972, p.21.1)

Le graphique 1.3 récapitule la diffusion globale des technologies d’injection dans le temps. On constate l’essor remarquable de cette diffusion à la fin des années 1960, puis une regression rapide à la fin des années 70. La question de l’économie de coke a fortement structuré l’activité inovante, débouchant sur la formation d’un véritable espace technologique du haut fourneau à injection (¹⁷⁶).

Graphique 1.3 *Tendance mondiale des taux d'injection au haut fourneau.*



Source: First International Cokemaking Congress, Septembre 1987, Essen

2.2) Compétition technologique: présentation des principales alternatives technologiques

L’étude de l’évolution des économies de coke met en lumière la formation de l’espace technologique des injections au haut fourneau à partir des années 1960. Les technologies d’injections, qui n’étaient considérées par certains que comme de petites technologies d’appoint, se sont révélées être une source essentielle de progrès, dont l’importance économique dans le monde des haut fourneaux n’a fait que croître. A partir des théorisations proposées par l’économie de la standardisation, on peut poser l’hypothèse qu’un certain nombre d’alternatives ont émergé sous cette impulsion, pour entrer en compétition. Quelles ont donc été les principales alternatives technologiques de l’espace des injections au haut fourneau?

¹⁷⁵ Cette première période a suivi un modèle de développement proche de ceux décrit par Sahal (Sahal 1985). On peut noter que certaines injections (vapeur, oxygène, énergie) ont été utilisées dans la maîtrise de la température de flamme dès cette période. Mais leur fonction principale ne consistait pas alors à remplacer du coke mais à réguler le fonctionnement du haut fourneau.

¹⁷⁶ Voir notre conceptualisation de l’espace technologique (axe 1).

Fonction et procédé: le monde commun des technologies d'injection au haut fourneau.

La famille des injections au haut fourneau ne remplit pas simplement une fonction commune - d'économie de coke- elle partage également un procédé commun consistant à utiliser le *vent* soufflé dans la partie basse du haut fourneau comme vecteur de transport, et à agir directement au niveau des *foyers* du haut fourneau, créés juste à l'interface entre cette partie basse du haut fourneau et le *vent* arrivant des *tuyères*. Dans une certaine mesure, les injections au haut fourneau peuvent ainsi être comprises comme des technologies d'optimisation de la nature du vent soufflé au haut fourneau.

Il est utile de préciser qu'il existe deux grande zones historiques de développement technologique au haut fourneau: l'une concerne l'*enfournement* -ou *lit de fusion*, ou *charge*- c'est à dire les technologies de la partie haute du haut fourneau, l'autre concerne la partie basse. L'une des différences marquante entre ces deux zones d'action est leur temporalité: pour qu'une action menée au niveau du geulard prenne effet, il faut plusieurs heures (¹⁷⁷), alors que les actions entreprises au niveau des tuyères ont un effet immédiat, et présente donc une plus grande flexibilité (¹⁷⁸). Le coke intervient dans la partie haute et les injections dans la partie basse.

La matière en question

Le problème fondamental de l'espace des injections est celui de la matière injectée (¹⁷⁹). La nature de la matière injectée constitue le principal mode d'action sur le haut fourneau. Par conséquent, les alternatives technologiques se sont définies et différenciées à partir de la matière.

Dans la première phase de l'après guerre, des technologies ont ainsi été développées pour injecter des hydrocarbures (gaz, fuel, charbon), mais aussi de la vapeur d'eau, ou de l'oxygène. Les quantités utilisées étaient faibles, et les différentes alternatives étaient fréquemment mises en oeuvre conjointement. A partir du moment où le nouvel espace technologique a émergé - conjointement au développement des technologies d'injection comme substitution au coke - les matières premières énergétiques sont devenues la cible exclusive des attentions. Ont émergé de cette nouvelle dynamique, une série de matières en concurrence: le charbon, le fuel, le goudron, le gaz naturel, le gaz de cokerie, mais aussi des matières 'hybrides' conçues pour l'occasion tels que coal-water slurry, oil-water slurry, les mélanges charbon-fuel (COM).

¹⁷⁷ Le temps que la matière (dont le coke et un exemple) atteigne les foyers. D'après l'un de nos interlocuteur, le temps de latence -temps de descente des charges- est de l'ordre de 5 à 6 heures sur un haut fourneau moderne. Entretien section technique site de D, F. steel, janvier 1996.

¹⁷⁸ La première utilisation des injections, déjà mentionnée, consistait par conséquent en un paramètre de contrôle facilitant la régulation des phénomènes intervenant au niveau des foyers.

Ainsi que nous l'avons précisé, l'association entre le coke et le haut fourneau est forte et ancienne. Elle est également multiple. Dans le cas des injections au haut fourneau, la fonction de substitution a touché en priorité deux éléments de cette association: la fonction énergétique et la fonction réductrice du coke. Ces deux fonctions touchent à la dimension chimique de l'interaction entre coke et haut fourneau: le coke fournit de la chaleur en se consummant dans les foyers, et il fournit également un gaz réducteur, le monoxyde de carbone (CO) tous deux indispensables à la réduction du minerai de fer. L'espace est donc composé d'une famille d'hydrocarbures visant le remplacement du carbone contenu dans le coke par des sources plus flexibles - ie injectable dans la partie basse de l'appareil.

Principales questions techniques et principales caractéristiques des technologies: liquide, solide, gazeux, les états variables des matières énergétiques.

Sur le plan technique, le principe de l'injection au haut fourneau est relativement simple. Il s'agit d'acheminer une matière hydrocarbure dans les tuyères du haut fourneau, où, mélangée au vent chaud soufflé, elle pourra aisément atteindre les foyers et se consumer en produisant de la chaleur ($t^{\circ} \cong 1800^{\circ}$) et du gaz réducteur -(monoxyde de carbone)-. Les objets techniques possèdent donc un dispositif de stockage-déstockage de la matière, un dispositif de transport, et une interface d'injection.

En fonction de l'état de la matière, les caractéristiques des alternatives évoluent, dessinant deux groupes, le groupe des gaz et des liquides d'un côté, le groupe des solides de l'autre. Deux éléments discriminants permettent de rendre compte des variations observées d'une alternative à l'autre: (a) le système de contrôle des débits et (b) le degré de mise en forme des matières.

Dans le groupe des liquides et des gaz, le système de contrôle des débits est très similaire. Le dispositif se compose schématiquement d'un réservoir unique, d'un compresseur (gaz) ou d'une pompe (liquide) et d'un système de vanne agrémenté d'un compteur. La mise en forme des matières est cependant légèrement différente, entre gaz et liquides. Dans le cas des solutions techniques les plus simples, le gaz est injecté tel quel dans le vent, par un simple raccordement. Les liquides ont justifié le développement de système de chauffage de la matière et le développement d'interfaces sophistiquées avec la tuyère ou 'burner' (lance d'injection, atomisation, gazéification). Leur caractère liquide a également justifié la mise en place d'un système de purge, pour éviter leur stockage dans les conduites.

¹⁷⁹ Nous préférons mettre en avant une logique de problématisation (Hughes 1983, Rosenberg 1982, Callon 1986) qui n'est pas sans rapport avec les travaux sur la *design hierarchy* (Abernathy 1978, Clark 1985, Foray et Grübler 1990).

Le développement des injections solides s'est accompagné d'une série de *solutions techniques* nettement distincte - à *distance technologique élevée* -. Le contrôle des débits globaux et ligne par ligne a justifié le développement de dispositifs comprenant plusieurs réservoirs (généralement trois ou quatre ¹⁸⁰), de système de transport avec 'gaz transporteur', et de systèmes spécifiques de distribution du volume global sur la circonférence du haut fourneau. Mais la rupture technologique la plus nette a trait à la *mise en forme* de la matière. Dans le cas des solides, cette *mise en forme* est devenue très problématique. Elle a justifié le développement d'un atelier dédié au broyage et au séchage du charbon, et une série d'investigations et de controverses sur la question de la taille optimale - granulométrie -. La question de la granulométrie touche à l'interaction entre matière, vent et foyer, et particulièrement à la question de la combustibilité.

En soi, la question de la granulométrie a donné lieu à deux alternatives technologiques, l'une dite de charbon pulvérisé (PCI), la seconde dite de charbon grenu (GCI) que l'on peut définir de la façon suivante: "*granular coal, for injection into the Blast Furnace, is defined by British Steel as 100% < 5 mm, and 95 % < 2 mm. The final size distribution is determined by the raw coal size distribution, the type of preparation process, the form of classification and the hardness/abradability of the coal. At the fine end of the range the size is 10 to 30 % < 74 microns. Pulverised coal, by comparison, has typically 80 % < 74 microns*" (¹⁸¹)(¹⁸²).

Cette analyse nous amène donc à constater l'existence de plusieurs voies technologiques dans la famille des injections au haut fourneau. Les voies des gaz et des liquides sont technologiquement assez proches et relativement simples: "*Le fuel est beaucoup plus facile à contrôler que le charbon, la poudre, le solide. Pour le fuel, c'était comme si, à chaque tuyère on mettait un tuyau et on ouvrait un robinet*" (¹⁸³).

¹⁸⁰ Outre le rôle 'tampon' de la taille du réservoir de stockage, permettant le retour au marches tout coke, cela est lié à la continuité des débits. Pour obtenir un débit continu proche de ceux des gaz et liquides, il un système comprenant plusieurs silos. L'un des premiers inventeurs de système d'injection de charbon commente ainsi: "*C'est simplement de la manutention, c'est pour avoir la manutention continue. Il faut continuer à injecter en continu, d'où trois silos*" Entretien retraité, ancien chercheur Irsid, février 1996, Aix en Provence.

¹⁸¹ D. Gathergood (1996) "Blast furnace Injection of granular Coal" in IISI (1996) *Injection Technology in Ironmaking and Steelmaking*. IISI, Bruxelles.

¹⁸² Pour le commun des mortels, la différence entre un charbon broyé à 95% en particules inférieures à 2 mm et un charbon broyé à 80% en particules inférieures à 74 microns n'est pas significative. Pour les ingénieurs de la sidérurgie qui s'intéressent aux injections de charbon, la différence est très significative, au point d'avoir justifier l'émergence de deux technologies distinctes, marquées par des vocables différents: "*Il existe un écart important entre ce qu'on appelle le pulvérisé, pci, pulverised coal injection, et donc la technique du grenu, le charbon grenu*" Entretien, Direction département Fonte, usine de D., janvier 1996, D.

¹⁸³ Entretien retraité, ancien chercheur, principal responsable des recherches menées sur PCI, J Steel, novembre 1995, Tokyo.

La voie du charbon, nettement différenciée, est beaucoup plus complexe ⁽¹⁸⁴⁾. C'est ce que notait avec humour l'ingénieur Summers, l'un des pionniers des injections de charbon dans les années 60 dans une tirade aux accents shakespeariens:

*To inject or not to inject is not the question
But whether it is better to the mind to settle
For oil or natural gas and established practice
Or to take arms against a sea of troubles
And by injecting coal to break new ground
To fail or succeed, that is the question. (185)*

le critère de la "complexité technologique"

Il est possible de discriminer relativement clairement les différentes alternatives technologiques à partir d'un critère de complexité technologique. La nature des matières injectées se trouve au fondement de cette différenciation. Deux dimensions principales des matières énergétiques influencent la complexité technologique, ce que l'on pourrait nommer l'"injectabilité" et la "manipulabilité".

Premièrement, l'état physique de la matière détermine son "injectabilité", en proportion inverse de laquelle le système technique tend à se complexifier. L'"injectabilité" dépend de la capacité de la matière injectée à se réchauffer et à se mélanger au vent chaud soufflé dans les tuyères, et en particulier à l'oxygène qu'il contient, et à se consumer en l'espace de quelques millisecondes ⁽¹⁸⁶⁾ dans les foyers du haut fourneau. La combustion consiste en fait en une réaction chimique, une gazéification accompagnée d'un dégagement de chaleur. Plus les matières énergétiques sont proches du stade gazeux, et plus leur miction dans le vent des tuyères et leur combustion dans les foyers semble facile. C'est ce qui explique le développement de technologie d'atomisation, de pulvérisation, de gazéification des liquides et des solides injectés: "*Complete combustion of coal particles to carbon monoxide in the very limited space of a tuyere raceway is only possible by an extremely fine grinding of the coal.*"

Deuxièmement, la nature de la matière injectée se traduit par une certaine "manipulabilité", en proportion inverse de laquelle le système technique tend à se complexifier. Cette capacité de la matière énergétique à être facilement manipulable dépend de la facilité avec laquelle la matière peut être mise en

¹⁸⁴ Hemming, C., Carter, G. (1981) "Coal-injection systems for blast furnaces" in: *Ironmaking and Steelmaking*, n°3, pp. 104-113.

¹⁸⁵ Cité par D. Gathergood, (1988) *Coal and Coke. Technical Exchange Session*. International Iron and Steel Institute, Brussel, p.1

¹⁸⁶ Le temps de passage des particules est évalué par exemple dans le cas du charbon à 20 millisecondes par les chercheurs de l'IRSID. Lao et Al. (1994) "Fundamental Aspects and Industrial Practice of High Coal Injection in the Blast Furnace within

forme et acheminée dans des quantités voulues au niveau des tuyères (broyée, séchée, pulvérisée, mélangée, transportée, stockée, contrôlée, distribuée). Ainsi que nous l'avons constaté, il suffit d'un container pour stoker et déstocker les gaz ou les liquides, alors que trois sont au minimum nécessaires pour un solide. Le transport du gaz s'effectue par compression et différentiel de pression, le transport des liquides s'effectue par pompage, alors que le transport du charbon requiert un système d'air ou d'azote comprimé pour transporter et répartir le solide.

2.3) Aspects économiques de la compétition

“Le hf (haut fourneau), c'est ce qui fait le prix de revient. Une fois que vous avez fait la fonte, vous avez fait le prix de revient. Le gros du prix de revient vous l'avez avec la fonte. Après, vous pouvez le gâcher, vous pouvez le détériorer le prix de revient, mais vous ne pouvez pas l'améliorer” (¹⁸⁷).

Le poids des prix relatifs des matières et taux de remplacement théoriques

“Le coût des matières premières enfournées au haut fourneau représente environ 80% du prix de revient de la fonte. L'énergie sous toutes ses formes intervient pour près de 50% de ce prix de revient, ce qui justifie les efforts consacrés aux économies d'énergie..” (Steiler et Schneider, 1994, Le livre de l'acier, p. 1192).

Les matières premières et leurs caractéristiques économiques, techniques, physiques et chimiques se trouvent au coeur du processus de diffusion des technologies d'injection. La comparaison des prix relatifs des matières a constitué l'une des modalités essentielles de la compétition. Les prix relatifs des différentes “formes” d'énergie délimitent un contexte incitatif déterminant dans la sélection des technologies.

Taux d'équivalence et comparaison des prix des matières

Les prix relatifs constituent un indicateur fondamental pour les sidérurgistes. Ils leur permettent de situer les matières premières les unes par rapport aux autres, de comparer le prix du “coke” au prix du “fuel”, ou du “charbon”. Ainsi, l'augmentation du prix du coke dans les années 50-60 a joué un rôle fondamental dans le développement, et surtout la diffusion des technologies d'injection au haut fourneau. Le jeu des prix relatifs a agité comme un *signal* en faveur du développement de technologies d'injection: les prix relatifs du charbon et du fuel ont été jugés “attractifs” par rapport à celui du coke.

Les calculs comparatifs détaillés utilisés par les industriels combinent *prix relatifs* et *taux d'équivalence*. La stricte comparaison du prix d'une tonne de fuel et du prix d'une tonne de coke ne

Usinor-Sacilor Group.” In: *The First International Congress of Science and Technology of Ironmaking*, 1994, Sendai, ISIJ, pp 517-522.

¹⁸⁷ Entretien, ancien responsable des essais spéciaux, Irsid, Aix en Provence, décembre 1995.

fournit pas une information suffisamment pertinente pour les décideurs. Les sidérurgistes ont donc mis au point un modèle de calcul basé sur les effets des matières injectées sur le haut fourneau. *Ce taux d'équivalence* permet de calculer les bénéfices comparés des différents substituts au coke:

“J’ai mené une étude comparative sur le fuel, le gaz naturel et le charbon. La clé de ces calculs était le taux de remplacement du coke. S’il est possible de calculer le taux de remplacement du coke par chacune de ces matières, on peut alors en déduire le prix de revient de la tonne de fonte pour chacune d’elle” (¹⁸⁸).

Le “*taux de remplacement*” propre à chaque matière, conjugué à une évaluation des “*limites d’injections*” - taux maximum d’injection- que l’on peut atteindre avec cette même matière fournissent le cadre économique des décisions d’adoptions.

A titre indicatif, notons que les taux d’équivalence sont de l’ordre de 1.3-1.4 pour le gaz et le fuel (¹⁸⁹), et de 0,9-1 pour le charbon et le goudron (¹⁹⁰). Ces chiffres indiquent qu’une tonne de charbon remplace approximativement une tonne de coke, alors qu’une tonne de fuel ou de gaz remplace 1300 kg de coke. A prix égal, l’injection de gaz ou de fuel est donc plus avantageuse. Potentiellement, cependant les limites d’injection du charbon sont nettement supérieures à celles de ses concurrents, du fait de son action moins refroidissante sur la température de flamme du foyer - hypothèse du ‘rapport carbone/hydrogène’ supérieur (¹⁹¹)-.

Le jeu des prix relatifs des matières premières a une incidence considérable sur le développement et la diffusion des technologies au haut fourneau, à travers son rôle incitatif. Combiné au taux d’équivalence des matières substituables au fuel, les prix relatifs se trouvent au fondement des décisions technologiques. Leur influence tend cependant à s’organiser autour de tendances à moyen terme. Les temps de latence entre les mouvements des prix des marchés et la mise en oeuvre de technologies tirant pleinement partie de ces mouvements semblent importants. Les investissements étant relativement élevés, les retours sur investissement s’étalent sur plusieurs années. Cela entraîne donc une nécessaire prudence à court terme des décideurs, qui semblent fonder leurs choix sur des tendances plus structurelles, de l’ordre de plusieurs années, que conjoncturelles, de l’ordre de quelques mois, qui risquerait de les exposer à des revers lourds de conséquences.

¹⁸⁸ Entretien chef d’équipe de recherche, J. Steel, Japon, décembre 1995.

¹⁸⁹ Sherman, G. (1995) “Gary n°13 Blast Furnace achieves 400lbs/thm coal injection in 9 months” in: AIME Ironmaking Proceedings, Vol 54, April 1995, pp.39-44.

¹⁹⁰ Hanniker, G. (1991) “Towards 300 kg/thm coke rate with granular coal injection” in: AIME Ironmaking Proceedings, Vol 50, April 1991, pp.503-516.

¹⁹¹ Sexton, J. (1983) “Blast Furnace Coal Injection: Long proven, now economical” in: Iron & Steel Engineer, January 1983, p.38-41. Ce rapport est estimé à 3/1 pour le gaz, 7,5/1 pour le fuel et 16/1 pour le charbon bitumineux (Melcher et Mahan (1972) in Standish)

Calculs de coûts-avantages, immobilisation et dynamique d'adoption

L'intérêt monétaire d'une 'matière' fournit une condition nécessaire mais non suffisante de son développement: elle ne se traduit pas nécessairement par l'adoption de la technologie qui s'y rapporte, et n'entraîne pas nécessairement que la technologie associée débouche sur le meilleur arbitrage coûts-avantages.

La traduction des "prix" en "coûts" suppose de prendre en considération les aspects productifs, et en particuliers les aspects techniques des différentes alternatives. Les dimensions non monétaires des matières comme leur 'injectabilité' ou leur 'manipulabilité' interviennent pour une bonne part dans cette traduction. De plus, la compétition technologique dépend d'un calcul d'investissement variable pour chaque usine adoptrice, en fonction de la situation productive de l'usine, de l'état de son parc de cokerie, de sa capacité à produire et à valoriser du gaz, en d'autre terme de la "*spécificité des actifs*" qui s'y trouvent ('*Technical interrelatedness*' David 1987).

La substitution d'une injection auxiliaire au coke met en jeu un calcul portant sur les coûts fixes et sur les coûts variables des installations productives.

A titre indicatif, notons que le prix d'une cokerie est de l'ordre du milliard de francs pour une usine de petite taille. A capacité équivalente, une installation d'injection de charbon, représente environ 50% de ce coût: "*For additional coking capacity, a more than double investment has been estimated*"⁽¹⁹²⁾⁽¹⁹³⁾. On peut estimer que les installations d'injection de gaz et de fuel se situent autour de 5 à 10% de ce coût. Chaque usine connaît cependant une situation particulière en fonction de l'état de sa capacité de production de coke: "*Coal injection systems, including coal preparation, currently cost approximately £30 to £50 per annual ton of coal injected depending upon type of system, plant capacity and sophistication/degree of control required. Coke oven plants cost approximately £150 per annual tonne of bell coke for a brand new plant, £100 for a rebuild from pad level using new machines and £70 for a rebuild using existing machines.*"⁽¹⁹⁴⁾.

¹⁹² Koen et Alii (1985) "Injection of Coal into the Hoogovens Blast Furnace" in: *AIME Ironmaking Proceedings*, Vol 44, April 1985, p. 445.

¹⁹³ Fletcher fournit des données comparables: 16 M \$ US pour une installation de 33 tonne /heure. Fletcher, L. (1981) "Technical & Economic aspects of coal injection at blast furnace tuyeres" in *AIME Ironmaking Proceedings*, Vol 40, pp.142-145.

¹⁹⁴ Gathergood, D. (1988) "Coal injection into the blast furnace" in: *IISI, Coal and Coke*, IISI, Bruxelles.

Les cokeries constituent des investissements peu flexibles pour des raisons à la fois économiques et techniques. Économiquement, une cokerie représente un investissement lourd, d'une durée de vie de l'ordre de 30 ans. Techniquement, les cokeries possèdent des caractéristiques de fonctionnement rigides: les fours à coke doivent fonctionner avec grande régularité afin d'éviter d'occasionner des coûts de maintenance élevés et une usure prématurée. Les équipements d'injection offrent comparativement une souplesse d'utilisation importante: les taux d'injection peuvent varier fortement et s'adapter aux besoins du haut fourneau: "*one of the most interesting features of coal injection is that the coal injection rate can be manipulated in the short term without affecting normal furnace operation*"⁽¹⁹⁵⁾. La flexibilité de l'investissement en capital, dans le cas des technologies d'injection, crée des irréversibilités moins fortes, et représente un risque moins élevé que l'investissement dans une cokerie: l'immobilisation est limitée, et le risque pris en investissant, accru par la versatilité des marchés énergétiques, est également moindre.

Coûts fixes et coûts variables des différentes alternatives technologiques

On peut retenir deux principaux éléments pour caractériser la compétition entre alternatives: le degré de *complexité technologique* et les *coûts de production*.

Le *degré de complexité* technologique est étroitement lié aux coûts d'investissement respectifs des différentes alternatives dont nous avons évoqué les ordres de grandeur précédemment. La simplicité des installations d'injection des liquides et des gaz leur confère un sérieux avantage sur les solides ⁽¹⁹⁶⁾. Cet avantage est en bonne partie lié aux questions de l'"*injectabilité*" et de la "*manipulabilité*" des matières. Les *coûts de production et de maintenance* des installations suivent rigoureusement le même chemin, dans la mesure où, plus la *mise en forme* est importante, plus la manutention est complexe, et plus les coûts variables sont élevés. Cette série de désavantages des solides sur les liquides et les gaz accroît le seuil critique -l'écart des prix relatifs- à compter duquel une l'injection de charbon se justifie.

Au sein du groupe des solides, le développement de deux alternatives distinctes, PCI et GCI, s'explique également comme un effort pour agir sur ces deux dimensions. Ainsi, le charbon 'grenu' nécessite une immobilisation moins grande en capital physique que le charbon pulvérisé. L'atelier de broyage, à taux d'injection égal, peut être dimensionné plus modestement. De même, les contraintes de sécurité liées à la manipulation délicate du charbon très finement pulvérisé sont en partie relâchées de par la taille supérieure des particules de charbon caractéristique du charbon grenu. Enfin, les coûts de

¹⁹⁵ Maldonado, R., Hanniker, G., Pettifor, M. (1985) "Granular Coal Injection into Blast Furnaces at the Scunthorpe Works of the British Steel Corporation" in: *AIME Ironmaking Conference Proceedings*, Detroit, April 1985, p. 432.

¹⁹⁶ Ainsi, la partie broyage (caractéristique du charbon) représente environ 60% de l'investissement total.

production du charbon grenu, nécessitant un broyage plus grossier, sont également tenus pour inférieurs à ceux du charbon pulvérisé: *“Technical evaluations conducted at the works in 1980/81 indicated that the injection of granular coal was an economically attractive proposition because the capital cost would be less than the cost of any pulverised fuel system on the market. The granular coal would have additional benefits such as some relaxation in the stringent safety requirements for the pulverised fuel installations. Reduction in the cost of coal preparation would also be significant.”* ⁽¹⁹⁷⁾.

La simplicité technologique constitue donc un atout considérable dans la compétition livrée dans l’espace des injections au haut fourneau.

IIIB. Trajectoires technologiques, compétition, standardisation

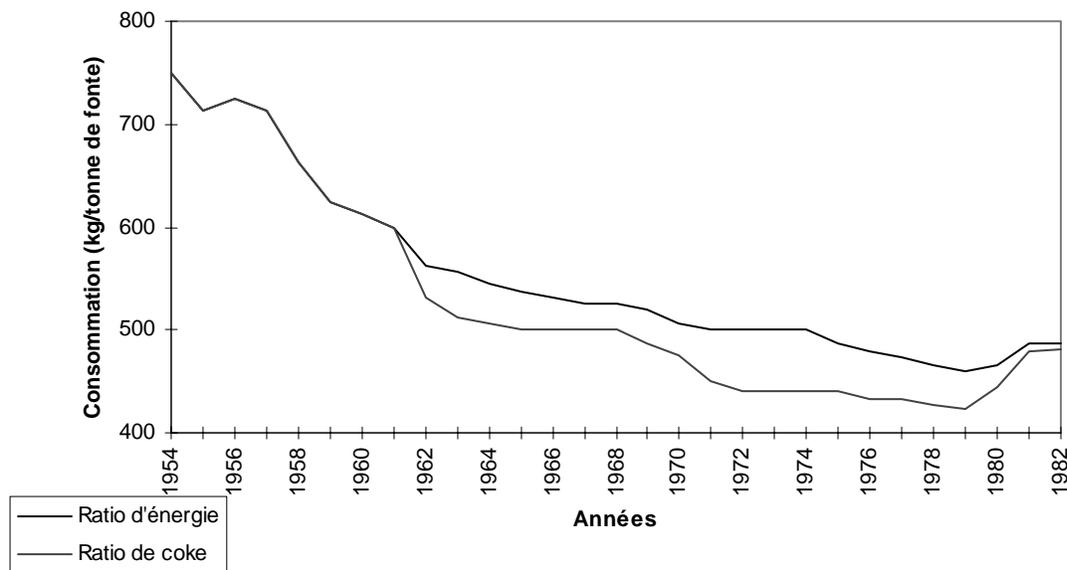
En présentant l’espace technologique des injections au haut fourneau, nous avons évoqué un certain nombre d’aspects de la compétition entre alternatives que l’on peut qualifier de statiques. Le paragraphe suivant va s’intéresser de plus près aux dynamiques historiques de développement des technologies.

¹⁹⁷ Maldonado, R., et Alii (1985) op. Cit. Une controverse existe sur cette question, certains auteurs estimant que le charbon grenu doit subir des étapes supplémentaires de chauffage compensant certains de ses avantages, et qu’il entraîne des frais supplémentaires de maintenance. Eichinger, F. (1986) “Coal Injection Into Blast Furnaces” in: AIME Ironmaking Conference Proceedings, Vol 45, p. 493.

1) Diffusion:

Le graphique 1.4 (voir 1.2) présente une bonne synthèse de la dynamique de développement des injections au haut fourneau dans le monde, à partir du cas du Japon. L'espace entre les deux courbes correspond à la part de l'énergie prise en charge par les injections dans la production de fonte.

Diffusion des injections au haut fourneau. Le cas du Japon



Source: d'après Iwamaru et Haru (1972) in Standish, Blast Furnace Injection et Inaba, S. (1996) in: IISI, Injection technology in Ironmaking and Steelmaking. Le trait pointillé représente la consommation de coke (graphique 1.1). Le trait plein représente la quantité totale d'énergie consommée pour produire une tonne de fonte au hf. La différence représente l'influence des injections au haut fourneau.

2) Création de diversité, compétition et standardisation

Création de la diversité

La vision synthétique déployée dans la description de *l'espace technologique* fait naître le sentiment d'un cheminement logique, très ordonné du développement technologique. L'étude approfondie des circonstances de la 'phase exploratoire' ne laisse guère de place à ce sentiment. Les premiers essais d'injection ont eu pour principal effet de mettre en évidence une série de problèmes, dont la résolution a demandé aux sidérurgistes plusieurs décennies et un changement radical de contexte.

Ainsi, dans la première moitié du siècle, plusieurs usines européennes, et plus particulièrement allemandes, se sont aventurées dans l'exploration des injections de charbon et de fuel. Ces expériences n'ont pas été couronnées du succès attendu. Elles se sont le plus souvent soldées par la formation de suies, ou par le blocage (hanging) du haut fourneau, et ont été abandonnées. Les analyses récentes de ces

échecs mettent en avant les températures de flamme très basses caractérisant les hauts fourneaux de l'époque: “*the main reasons for the initial failures encountered were too low flame temperature, incomplete combustion of the injected fuel and the formation of soot*” (¹⁹⁸).

Dans les années 1950, une nouvelles vague d'expérimentations a vu le jour aux Etats Unis, en Union Soviétique et en Europe. Sans concertation, plusieurs usines de part le monde ont tenté d'injecter du charbon, du gaz ou du fuel. Ces expériences, essentiellement *localisées* (¹⁹⁹), ont donné lieu à un bouillonnement exploratoire formé de divers réplicats (multiples). Pour l'essentiel, les entreprises ont été menées à l'initiative d'ingénieurs des sites, selon une logique tatonnante et pragmatique: “*Initially the developments of injection methods and techniques was largely empirical and many designs of injection equipment evolved from experience.*” (Standish, 1972).

A la fin des années 1950 et au début des années 1960, un ensemble de sites a commencé à injecter des hydrocarbures aux tuyères des hauts fourneaux de manière industrielle. En URSS, l'usine de Petrovsky a mis en oeuvre une installation industrielle d'injection de gaz naturel dès 1957. Aux Etats Unis, Colorado Fuel and Iron Corp. a lancé la première installation d'injection de gaz en juillet 1959. En France, l'usine de Pompey a été la première usine européenne à injecter commercialement du fuel, en 1959. Au Canada, une première installation d'injection de fuel a été mise à feu par Dofasco en 1961. Aux Etats Unis, l'usine d'Ashland de la société Armco a mis en service une installation commerciale d'injection de charbon en 1964. En Chine, enfin une installation commerciale d'injection de charbon était lancée en 1965 par la SISC.

Cette dynamique quelque peu désordonnée a eu trois effets principaux. Premièrement, la période 1945-1957 a constitué une *exploration du spectre* (Foray 1996) centrée sur fuel, gaz et charbon. Deuxièmement, la dynamique exploratoire a contribué à faire émerger une série de *solutions techniques* industrielles, créant ainsi une forte diversité. La création de cette diversité technologique s'est articulée étroitement à un premier dispositif de sélection par l'usage et par la pratique. Les solutions techniques 'industrielles' ont ainsi représenté des compromis technico-économiques viables (²⁰⁰). Troisièmement, la

¹⁹⁸ Decker, A., Poos, A. (1972) “Future development in blast furnace injection” in: Standish, N. op cit.

¹⁹⁹ Le caractère localisé des expériences signifie entre autre que les contextes locaux ont eu une influence considérable sur la forme des expérimentations. Ainsi, Armco a été l'une des premières usines à explorer l'injection de charbon sur son site d'Ashland. L'une des raisons de ce choix est l'isolement de ce site, lequel rendait les coûts du coke externe et des matières énergétiques plus élevés qu'ailleurs. De plus, le site est situé à proximité d'une mine de charbon dont l'entreprise est propriétaire. Le même raisonnement vaut pour le site de Petrovsky situé en Ukraine dans une région productrice de gaz naturel.

²⁰⁰ Le cas du charbon est illustratif. Dès 1948, des essais ont pris place en URSS. En 1960, des essais furent conduits aux Etats Unis par Bethlehem et National Steel. En 1962, une première installation était mise en place à Weirton, mais elle fut rapidement stoppée du fait de plusieurs remontées de fonte liquide dans les tuyères. Les essais de Stanton en Grande Bretagne furent arrêtés pour raison économique: l'injection de charbon était plus coûteuse que le coke remplacé.

multiplication des essais a fédéré l'attention - *awareness* ou *reverse salient*- de la communauté sidérurgique sur l'importance de ce thème. Les expériences menées ont contribué à former quelques premiers repères collectifs autour des principaux problèmes communs rencontrés.

Changement de contexte, et mise en place de la compétition

“In the late fifties, when adequate equipment became available and when a better knowledge of the blast furnace process helped to determine operating conditions favourable to successful tuyere injection, this technique could be applied on a world-wide basis without any difficulties” (Decker et Poos, 1972).

Le démarrage véritable de la dynamique d'adoption des technologies d'injection n'est pas intervenu avant le début des années 1960. Jusque là, les injections au haut fourneau appartenaient à la famille plus large des différentes méthodes de contrôle de la température de flamme.

Le changement de *fonction* ayant présidé à l'ouverture de *l'espace technologique* des injections au haut fourneau tient à l'apparition d'un besoin de coke à cette période. L'un des facteurs fondamentaux de cette transformation est lié aux avancées réalisées en matière de productivité des hauts fourneaux dans l'immédiat après-guerre, lequel s'est traduit par une certaine pénurie de coke: *“That fuel injection became available to industry at an ideal time had much to do with its rapid adaptation. Certain furnace operations were using high moisture injection, others had the capacity for higher hot blast temperature, beneficiated burdens were being increased, and furnaces were being enlarged during rebuilding. With these various improvements, some operators were finding their maximum pig iron production well beyond the capacity of existing coke oven capacity. Fuel injection was an immediate answer to a means of avoiding the high costs of purchasing coke or the large capital expense of building additional coking facilities.” (Melcher & Mahan, 1972, p. 2.2)*

Entre janvier 1960 et octobre 1965, l'extension du nombre d'installation a été extrêmement rapide. Si l'on prend l'exemple représentatif des Etats Unis, seulement deux hauts fourneaux (soit environ 1,5%) étaient équipés au 1er janvier 1960 contre 89 (soit 66,5%) en octobre 1965 et 102 (76%) en 1971. Il en résulte que la première moitié des années 1960 a été déterminante dans la compétition technologique.

Le positionnement de ce ‘narrow window’ entre 1960 et 1965 (²⁰¹) a eu pour résultat que la concurrence a essentiellement mis aux prises l’injection de gaz naturel et l’injection de fuel. Deux facteurs essentiels semblent avoir joué dans cette concurrence: la *disponibilité* et les *prix relatifs* des facteurs. Les prix relatifs ont constitué une variable à la fois globale et locale de la compétition. En fonction des zones géographiques, en effet, le caractère plus ou moins incitatif du fuel et du gaz ont varié. La *disponibilité* marque que, du point de vue de la dynamique d’adoption, la compétition ne peut jouer à un moment donné, qu’entre des alternatives disponibles sur le marché. L’existence d’une première installation commerciale représente une approximation satisfaisante de la date à partir de laquelle une alternative technologique devient disponible.

La dynamique de diffusion semble s’être organisée par grande zone géographique, ce qui suggère une certaine segmentation du marché international. Il semble dans ce cas, que la segmentation ait été liée à des variations dans les prix relatifs des matières et dans les disponibilités technologiques des premières installations commerciales. Cela rejoint les travaux classiques de Griliches et Mansfield déjà mentionnés.

Aux Etats Unis, la première réussite industrielle utilisait l’injection de gaz et elle fut pratiquée en 1959 par la Colorado Fuel and Iron Corp. Elle fut suivie de très près par la première installation d’injection de fuel qui vit le jour en 1960 chez Dofasco. Environ la moitié des hf américains injectaient une énergie auxiliaire au début des années soixante-dix (Standish 1972). Au milieu des années soixante, l’injection de gaz naturel représentait environ 45% des pratiques d’injection, et l’injection de fuel environ 40% (Melcher et Mahan 1972).

A peu près à la même période, suite aux essais réalisés à Petrovski en 1957, l’injection de gaz s’est répandue en Ukraine, où le gaz était abondant, pour ensuite conquérir l’ Union Soviétique où cette technologie est devenue dominante. Au début des années soixante-dix, l’Union Soviétique utilisait l’injection de gaz naturel pour environ 75% de sa production de fonte (Chatterjea 1972 in Standish).

²⁰¹ Le concept de narrow window a été forgé par David pour rendre compte de l’étroitesse de la fenêtre d’action efficace de la politique publique. “*First is the problem which I refer to as the Narrow Policy Window Paradox. Increasing returns in systems scales makes available ‘windows’ for effective public policy intervention at modest resource costs - involving the manipulation, with high-leverage effects, of private sector technology adoption, by means of taxes and/or subsidies, or informational programmes and announcements designed to shape expectations about the future adoption decisions of other agents. (...) But for public agent to take advantage of these ‘windows’ while they remain open is not easy; the point at which such interventions can have maximum leverage over the course of diffusion and development of network technologies tends, under natural conditions, to be confined towards the very beginnings of the dynamic process, and to have an uncertain but generally brief temporal duration.*” (David, 1987, p.228-9)

En Europe, la première installation industrielle était un système d'injection de fuel qui fut réalisé aux Acéries de Pompey en 1961. En 1971, environ la moitié des hauts fourneaux européens injectaient des hydrocarbures, majoritairement du fuel.

Le Japon, ayant pris part tardivement à cette dynamique, n'en est pas moins devenu le champion incontesté des injections. Au début des années 70, tous les hauts fourneaux japonais étaient équipés et tous utilisaient l'injection de fuel (Iwamura et Haru, 1972).

Lock-in

Au niveau mondial, une étude portant sur les 130 hauts fourneaux de grande taille en Europe, en Amérique, au Japon et en Australie montrait que plus de 85% d'entre eux étaient équipés pour les injections au hauts fourneaux en 1970. A partir de là, la dynamique d'adoption s'est donc largement essoufflée. Or la même étude montre que 70% des hauts fourneaux équipés utilisaient l'injection de fuel et 15% l'injection de gaz. L'accession à cette position dominante, et l'essoufflement de la dynamique d'adoption ont alors contribué à l'affirmation toujours croissante de la domination du marché par le fuel, à l'exclusion des autres alternatives - *lock-in*.

Ainsi, aux Etats Unis, pays où le marché a été le plus partagé, le niveau d'injection de gaz a tendu à s'infléchir rapidement à partir de la seconde moitié des années 1960, et certaines usines ont entrepris des conversions du gaz au fuel, en conservant l'injection de gaz en 'backup' (Standish 1972). A partir de 1966, la part de marché du gaz a rapidement décliné: "*The first fuel to be used was natural gas. Figure 3 illustrates how the use of natural gas increased, reached a peak in 1966 and then began to decline.*"⁽²⁰²⁾.

La standardisation du pétrole a été renforcée par un double phénomène, intervenu à la fin des années 1960: l'effet accélérateur de la pénurie générale de coke, et la mise sur le marché de fuel bon marché.

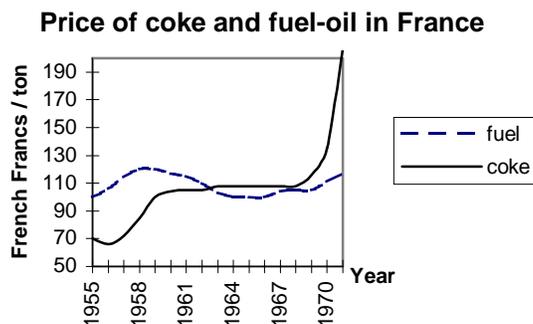
A partir des années 60 et plus particulièrement de la seconde moitié des années 60, la pénurie générale de charbon à coke de qualité satisfaisante a obscurci de son ombre menaçante, les horizons sidérurgiques (Inoue, et Al (1972) in Standish): "*After a slow beginning the practice of injection gained momentum and by the mid 1960's many countries were injecting one or the other auxilliary fuel into their*

²⁰² Ostrowski, E. (1975) "Future Trends in Blast Furnace Fuels" in: AIME Ironmaking Conference Proceedings, Vol 34, April 1975, pp.35-45.

blast furnaces. This rapid adoption of injection has been largely brought about by the economic considerations of rising coke prices and the necessity to maintain the cost of hot metal production at a reasonable low level.” (Standish, Blast Furnace Injection, 1972).

Parallèlement, les sidérurgistes ont constaté l’arrivée de fuel à des prix extrêmement attractifs sur les marchés: *“Bon il faut dire qu’à ce moment, on a vu arriver du fuel lourd à des prix défiant un peu toute concurrence, parce que comme il y avait de plus en plus de voitures, il fallait faire de l’essence, et qu’en faisant de l’essence, il y avait du fuel dont on ne savait pas quoi faire etc... donc des fuels bradés qui étaient beaucoup plus faciles...qu’on a su injecter au hf dans des quantités, pas énormes, mais enfin qui allaient”* ⁽²⁰³⁾.

Le graphique 1.5 résume la situation à partir du cas de la France:



Reproduit d’après L. Coche, “Why injection? Some facts and figures”1972, Chap. 1, p.1 (en francs courants).

Cette situation a eu pour effet de stimuler la standardisation et l’accroissement des taux d’injection de fuel au haut fourneau: *“Je crois disons que le prix du fuel donc est devenu extrêmement attractif - () et donc c’est pour cela que l’on a commencé à dévelo... par contre à pousser les injections de fuel en sachant que la technologie était quand même plus simple que le charbon, et on a effectivement développé le fuel sur les fourneaux avec des niveaux de l’ordre de, selon les cas 30, 40, 50, 60, 80 kilos..”* ⁽²⁰⁴⁾.

Cette tendance économique a eu pour effet, selon de nombreux observateurs, de renforcer l’intérêt des injections, à des taux nettement plus substantiels, de l’ordre de 100 kg par tonne de fonte et plus. Pourtant, certaines expériences à taux d’injection élevé se sont accompagnées de production de suies caractéristiques d’une combustion incomplète, faisant ainsi éclater une série de controverses autour de la question des limites d’injection.

²⁰³ Entretien Institut de Recherche de la Sidérurgie, Metz, janvier 1996.

²⁰⁴ Entretien, Site de D., F.Steel, France, janvier 1996. Ces deux prix étaient à peu près équivalents en France et en Allemagne en 1965, mais en 1970, le coke atteignait le double du prix du fuel (Coche (1972) et Heynert (1972) in Standish)

3) Trajectoires, rendements croissants et externalités de réseau

Quels ont été les principaux facteurs influents sur le développement technologique des injections au haut fourneau au cours de la période considérée (1945-1980)? Quels ont été les éléments déterminants de la sélection du fuel comme injectant standard du haut fourneau?

3.1) Prix relatifs et économies d'échelles

Nous avons largement commenté l'influence des prix relatifs sur le processus de diffusion des technologies. L. Coche (1972) estime que le fuel a constitué la forme d'énergie la moins coûteuse dans la plupart des pays. Cependant, il paraît important de noter que, dans le cas qui nous intéresse, cet effet n'a pas joué d'une façon pure et homogène sur l'ensemble de la période. Dans la période exploratoire, l'effet des prix relatifs semble avoir été minime. Cela tient en partie au caractère localisé des expérimentations menées, ainsi qu'à la volonté de transformer les prix en coûts - réduire l'incertitude sur les attributs économiques et techniques des différentes alternatives. Les échelles de production limitées n'ont pas constitué un effet de levier suffisamment important pour justifier l'exclusion *a-priori* de certaines alternatives. A l'inverse, au moment de la mise à disposition des alternatives, l'ouverture de la fenêtre compétitive s'est accompagnée d'un effet renforcé des prix relatifs. Les craintes de pénurie de certaines matières, ou les variations importantes de prix relatifs entre le coke, le gaz et le fuel ont constitué un facteur déterminant du drame qui s'est noué autour de la standardisation de l'injection de fuel. Le passage à une étape de diffusion, provoquant un changement d'échelle au niveau individuel -des entreprises- et collectif - de l'industrie- a conféré aux prix relatifs et à leurs variations un effet de levier important. Dans un troisième temps, enfin, avec la standardisation, et les *irréversibilités* fortes qui l'ont accompagné (*'base installée*), le jeu des prix relatifs a été compensé par une forte *inertie* (David 1985), démultipliant les effets et les temps de réaction aux fluctuations des prix sur le marché. Les comportements économiques se sont alors calés sur les tendances des prix relatifs à moyens termes.

3.2) Disponibilité

Dès 1963, les ingénieurs pouvaient affirmer "*the injection of natural gas and oil into the Blast Furnace has been extensively reported upon and is now an established technique.*"⁽²⁰⁵⁾. Les différentes alternatives n'ont pas toutes bénéficié de cette disponibilité rapide au moment de l'ouverture de l'espace technologique. Nous allons distinguer deux formes de disponibilité ayant influencé le processus de diffusion: une forme technologique, et une forme matière.

²⁰⁵ Summers, E et Alii (1963) "Coal injection into n°5 blast furnace at Stanton and Steveley Ltd" in: Journal of the Iron and Steel Institute, August 1963, pp. 666-677.

Disponibilité des matières

La disponibilité des matières est fort bien illustrée par le cas du goudron. Le goudron est un sous produit des cokeries. Son coût de production est donc ‘attractif’ pour une usine intégrée. Mais jusqu’au milieu des années 1960, il était d’usage de l’utiliser dans les acéries de types open-hearth. Après cette date, lorsque le BOF a progressivement remplacé l’Open-hearth, le tarissement de cette source d’usage a ouvert la porte au développement de l’injection de goudron. Ce type d’injection a alors connu un certain succès, à partir de 1965, d’autant qu’au prix de quelques adaptations, l’injection de goudron pouvait être pratiquée sur les installations d’injection de fuel. Mais la domination étant déjà largement affirmée, l’avance acquise dans le domaine des injections à taux élevé étant considérable, la technologie est demeurée marginale. Le gaz de cokerie, autre sous-produit du coke, a connu une trajectoire similaire, ce combustible pouvant, de plus, être valorisé sur le marché des matières énergétiques pour une valeur proche de celle du gaz naturel. Dans ce cas, on peut souligner la complexité des arbitrages en jeu, les équivalences valant, outre le cas du haut fourneau, dans des catégories de relations entre matières énergétiques plus larges que le seul univers du haut fourneau. L’emboîtement des réseaux définissant la valeur d’une matière pour le haut fourneau ne peut être analysé ni indépendamment, ni en référence exclusive au contexte du haut fourneau.

Disponibilité des solutions techniques

Le rôle de la *disponibilité* technologique est parfaitement illustré par le cas du charbon. Ayant pris le départ sensiblement au même moment que le fuel et le gaz, et considéré par les experts comme promis à un bel avenir, -“*les calculs montraient quand même que le charbon pouvait être plus intéressant que le fuel*”- (206), le charbon n’est jamais réellement entré dans la course, du fait qu’aucune technologie considérée comme fiable ne permettait de l’injecter (Rosenberg 1982). Comparativement, l’injection de gaz et surtout de fuel se sont révélés être d’une grande flexibilité, et presque totalement réversibles. Historiquement, l’injection de gaz ou de fuel à des taux de l’ordre de 20-40 kg/tonne de fonte, se sont révélés être relativement simples, et n’ont pas posé de problèmes techniques difficiles à surmonter, ni en matière d’ingénierie, ni en matière de conduite du hf (Benson et Ryan (1972) in N. Standish). En l’espace de quelques mois, des *solutions techniques* ont permis d’injecter le gaz et le fuel de manière industrielle. Alors que ses concurrents ont connu des développements rapides, la complexité technologique de l’injection de charbon s’est traduite par une disponibilité tardive - 1966 pour la version stabilisée du

design Armco. Les alternatives disponibles dans les premières étapes du processus de diffusion ont acquis un avantage considérable sur l'ensemble de la période.

Les premières tentatives de passage à l'industrialisation se sont systématiquement soldées par des échecs entre 1960 et 1964, que ce soit sous la forme d'usure des tuyères⁽²⁰⁷⁾, de remontée de la fonte dans les tuyères ou de blocage du haut fourneau: *“nous n'étions pas les seuls dans le monde sidérurgique à étudier le charbon, il y a avait aussi des essais en Grande Bretagne, aussi aux Etats Unis, peut-être en Russie, sûrement, enfin je pense, et ces essais qui ont quand même duré assez longtemps, qui étaient des essais industriels - c'est à dire qu'on injectait vraiment du charbon au haut fourneau - se sont soldés par un échec (...) on avait conclu à un échec parce qu'effectivement, on n'arrivait pas à faire marcher le haut fourneau correctement avec du charbon, c'est à dire qu'à partir d'un moment (la charge) donc ne descendait plus, il y avait des blocs qui passaient dans les tuyères, enfin... autrement dit, il ne marchait plus. (...) Alors ensuite est venue la période fuel.”*⁽²⁰⁸⁾

Sur le papier, le charbon aurait dû connaître un développement similaire à ses concurrents. En réalité, les ingénieurs ayant tenté de l'injecter dans les hauts fourneaux se sont heurtés à des difficultés pratiques justifiant des développements technologiques importants⁽²⁰⁹⁾. Les difficultés rencontrées se sont traduites, outre un délais de mise au point excluant le charbon de la compétition, par la complexification des objets techniques et l'allourdissement des coûts d'investissement.

“The reason probably is that, in spite of its theoretical advantages, coal handling and injection cause some major problems. Coal easily leads to the formation of build-ups composed of unburnt coal particles and primary slag. In fact, coal particles as injected often were too fine to remain in the raceway until complete combustion (they could be carried along by the ascending gas) but too coarse for instant combustion. Complete combustion of coal particles to carbon monoxide in the very limited space of a tuyere raceway is only possible by an extremely fine grinding of the coal. This in turn leads to a handling problem and , in order to avoid dust explosions such coal has to be ground, stored and handled in a neutral atmosphere (eg combustion fumes). This increases the cost of the equipment and of injection and,

²⁰⁶ “Coal with its higher carbon hydrogen ratio of 33 to 1 for anthracite coal and 16 to 1 for bituminous coal [à comparer avec 7,5 pour 1 pour le fuel lourd et 3 pour 1 pour le gaz naturel] should allow more coke to be saved for a particular change in blast moisture content or in hot blast temperature than either natural gas or fuel oil.” (Melcher et Mahan, 1972)

²⁰⁷ Ostrowski (1983) “Factors influencing optimization of blast furnace coal injection” in: Ironmaking and Steelmaking, Vol 10, n°5, pp. 215-221.

²⁰⁸ Entretien, Direction département Fonte Dunkerque, Dunkerque, janvier 1996.

²⁰⁹ Farnsworth J. MacDonald S. (1962) “Koppers high-pressure solids injection system” in: ASME 62-Fu-3; Ostrowsky E. (1966) “Design and maintenance consideration for blast furnace fuel injections systems” in: AIME Ironmaking Conference Proceedings, vol 25, pp. 160-165; Summers E. (1964) “Engineering and design considerations of coal injection.” In: AIME Ironmaking Conference Proceedings, Vol 23, pp. 69-96.

in many cases, the difference between the price of injected coal and blast furnace coke is not sufficiently attractive to make the blast furnace operator adopt the complication of coal injection.” (Poos et Decker, 1972)

Le charbon, comme candidat de substitution au coke, s’est trouvé fort désavantagé économiquement, dans la bataille qui l’opposait au fuel et au gaz, lorsque, en 1966, les ingénieurs d’Armco ont finalement livré un design satisfaisant d’injection industrielle de ce combustible: *“The greatest restraining influence on future coal injection installations at Armco is the relatively large capital investment required”* ⁽²¹⁰⁾.

Un second exemple, d’une logique sensiblement différente, est offert par le cas des ‘matières hybrides’. Ces matières, COM et les Slurries, sont nées de l’imagination des ingénieurs cherchant à contourner les difficultés de mise au point d’une technologie d’injection de charbon. L’incorporation des particules de charbon dans des liquides, fuel ou eau, visaient à combiner les avantages de l’injection du charbon, et la simplicité technologique de l’injection de fuel. Dans ce cas, à un moment où les alternatives technologiques sont entrées en compétition, la rencontre d’obstacles s’est traduite par une diversification locale des alternatives, une ramification des branches de l’espace technologique. L’indisponibilité technologique du charbon a stimulé le développement de plusieurs solutions techniques.

La disponibilité, étroitement liée aux trajectoires technologiques, agit comme un élément important de la concurrence entre alternatives. Pour représenter le développement technologique, il est possible d’utiliser l’image d’un flux, un mouvement, traçant progressivement les sillons de son écoulement. Les premières installations - artefacts ou exemplar - forment autant de cheminements possibles. Lorsque le flux rencontre un obstacle, il tend à se ramifier localement, engendrant d’une part, une complexification de la technologie autorisant un dépassement de l’obstacle, et d’autre part, un contournement de l’obstacle par la multiplication des solutions autour de ce point de tension.

3.3) Rendements croissants d’adoption et externalités de réseau.

La dynamique du modèle d’Arthur repose sur les rendements croissants d’adoption. Dans le cadre de l’espace des injections au haut fourneau, ce mécanisme a en effet joué un rôle central, notablement différent, cependant, en fonction de phases de la compétition, et des matières considérées.

²¹⁰ Bell, S., Pugh J., Snyder B. (1968) “Coal Injection - Bellefonte Furnace” in: Journal of Metals, vol 20, n°4, pp. 85-88.

L'un des résultats majeur du cas pci tient à la démonstration que les rendements croissants d'adoption, et les externalités de réseau, tout considérables qu'ils soient, ne peuvent jouer leur rôle que lorsqu'une solution technique commerciale émerge -('technologie vivante'). Cela rejoint le thème de la disponibilité, précédemment développé.

D'autre part, la complexité relative de la technologie d'injection de charbon a stimulé la dispersion des efforts d'amélioration sur différentes alternatives. Les divergences locales engendrées par les obstacles rencontrés ont rendu difficile la capitalisation des apprentissages réalisés localement ('*distance critique*' Foray et Grübler 1990).

Ces deux constats confirment, d'une part, l'idée arthurienne selon laquelle, seule l'*adoption* permet de cristalliser les réseaux et les effets de rétroaction positive, et autorise leur transformation en avantage économique. Le même constat conduit pourtant d'autre part à préciser et à distinguer la formation des réseaux et des rendements croissant, d'un côté, et leur révélation économique, de l'autre. Les *solutions techniques* permettent la capitalisation des réseaux (Zuscovitch 1985), mais les réseaux se forment préalablement. D'importants investissements se sont ainsi mis en place, dans le cas des injections, par l'intermédiaire d'alliances formées autour de certaines caractéristiques des objets techniques (David 1985).

3.3 a) Rendements croissants d'adoption

Si l'on suit le raisonnement d'Arthur, le coeur des *rendements croissants* est la dynamique d'*apprentissage* générée par l'*adoption* massive d'une alternative technologique, et la série d'améliorations qui en découlent.

Le design de l'injection de gaz, relativement simple, s'est rapidement stabilisé. L'équipement était, à la limite tout à fait réalisable par des équipes locales d'ingénierie. Il n'a pas véritablement donné lieu à une dynamique d'apprentissage intensive. Les installations d'injection de gaz ont ainsi assemblé une série de composants, représentant des techniques considérées comme connues.

Le design des équipements d'injection de fuel semble avoir fait l'objet d'améliorations et de changements incrémentaux nettement plus nombreux (Summers et Al. 1963). Parti d'un schéma relativement simple - "*Pour le fuel, c'était comme si, à chaque tuyère on mettait un tuyau et on ouvrait un*

robinet”- inspiré de celui de l’injection de gaz (²¹¹), les objets techniques se sont progressivement complexifiés, en particulier, à partir de la seconde moitié des années 1960, avec la généralisation des injections de fuel à taux élevés. Outre le développement de systèmes de purge répondant au problème fréquemment rencontré en pratique, d’accumulation de liquide et de bouchage des lignes, des systèmes de régulation et de contrôle des débits plus précis ont remplacé les systèmes élémentaires des premiers temps. Avec l’arrivée des injections massives, la présence de soufre au sein de certaines catégories de fuel a justifié le développement d’ateliers de désulphurisation. Mais les améliorations technologiques les plus marquantes ont pris pour cible prioritairement le système d’interface entre l’installation d’injection et les tuyères. Les lances d’injection situées entre les tuyères et les conduites de transport, leurs formes, leurs positions ont donné lieu à de multiples élaborations, destinées à optimiser le mélange liquide-vent. Parallèlement, des dispositifs de plus en plus sophistiqués d’atomisation et d’homogénéisation du fuel sont venus s’agréger à proximité des lances. Au début des années 1970, les tuyères ont fait l’objet d’effort de conception - les tuyères soniques ou ‘ondes de choc’ devaient faciliter la pulvérisation du fuel et sa combustion dans les foyers.

Le design des injections de charbon a également été l’objet d’évolutions importantes. Ainsi que nous l’avons indiqué, ce design a d’emblée évolué selon un modèle distinct de celui de l’injection de gaz, justifiant la mise en place de dispositifs de manutention originaux. Contrairement au cas du gaz et du fuel, les technologies de base n’étaient pas clairement établies *“further extensive work was plainly necessary to adapt the systems described to commercial work and even if the basic techniques were satisfactory the engineering effort would require considerable time”* (Summers et Alii (1963) p. 670). Les designs ont donc considérablement évolué au cours des premières années, sous l’impulsion de sociétés d’ingénierie comme Petrocarb, Koppers et Babcock et Wilcox et de sites comme Ashland, Weirton, Hanah ou Stanton intéressés à l’injection de charbon (Summers et Al. (1963) Bell et Alii (1968)).

Dans un premier temps, les designs ont eu tendance à se simplifier. L’expérience industrielle allant croissante a permis de valider ou d’invalider certaines composantes. L’une des évolutions marquantes tient à l’incorporation de la fonction broyage dans le système technique d’injection. La plupart des premières expériences d’industrialisation ont été réalisées avec livraison du charbon pulvérisé en provenance du marché. Le coût d’un tel système, lié en particulier aux normes de transport de produits explosifs, a incité l’inclusion d’un atelier de broyage directement sur les sites. Typiquement, le processus

²¹¹ Les premiers essais d’industrialisation du procédé ont cependant mis en oeuvre des techniques complexes pour tenter de gazéifier le liquide injecté par peur des explosions *“parce que tout le monde, tous les grands spécialistes à l’époque étaient persuadés qu’on ne pouvait pas injecter ou utiliser le fuel directement, qu’il fallait le gazéifier d’abord”* Entretien pionnier des

d'apprentissage s'est traduit par la mise en place d'un atelier de broyage composé d'un silot de charbon brut, d'un broyeur et d'un système de séchage graduellement incorporés, d'un système de filtrage et de reprise des particules les plus importantes, et d'un silo tampon permettant d'isoler la partie préparation de la partie injection. La seconde évolution notable est la mise au point du concept de 'tour d'injection'. L'importance de la continuité du débit d'injection a abouti au concept de tour d'injection, composé d'une série de silos- trois ou quatre suivant les versions - hermétiquement connectés les uns aux autres par des systèmes de vannes: la tour d'injection assume les fonctions de stockage, de dosage et d'injection du solide. Il s'agit en quelque sorte de l'équivalent fonctionnel de l'ensemble compresseur, réservoir, et vanne dans le cas des injections de gaz.

L'une des originalités du développement technologique de l'alternative charbon tient à la mise au point progressive de systèmes de distribution entre le dernier silo de la tour et les différentes tuyères du haut fourneau, destinés à assurer l'équirépartition entre les tuyères. Plusieurs systèmes ont développé des solutions à partir de différentiels de pression entre le silo et les tuyères, utilisant les propriétés d'un gaz transporteur pour 'fluidiser' le charbon. Une variante hybride a consisté à contrôler le débit individuel sur chaque ligne par l'intermédiaire d'extracteurs rotatifs, la fluidisation par le gaz intervenant après la répartition 'mécanique' par ligne. La seconde originalité est liée à la déclaration de multiples incendies et explosions ayant sévèrement perturbé l'injection de charbon au haut fourneau. Les aspects 'sécurité' ont fait l'objet d'importants apprentissages: ainsi, après un incendie ravageur, sur la première installation mise en service en 1964, Armco a considérablement renforcé ses dispositifs anti-explosion: normes de fonctionnement, inertage par exclusion de l'oxygène, système d'alarme, renforcement de la résistance des équipements...(212).

3.3 b) Externalités et réseaux.

Le second pilier des *rétroactions positives* consiste en *externalités de réseau*. Le concept et le phénomène pointé par ce terme ne sont pas absolument exempts d'ambiguïté comme il a été souligné. Pour faciliter leur traduction opérationnelle, nous admettons qu'ils désignent l'ensemble des investissements, non directement liés à une alternative, possédant néanmoins un effet important sur la dynamique d'adoption. Nous distinguerons deux modalités essentielles de ce phénomène: la formation de réseaux institutionnels d''information' (David 1985, David et Foray 1996), et la formation de liens

injections en France, Aix, février 1996. En France, c'est un ingénieur de site, accordant peu de crédit à ces théories, qui a commencé à injecter le fuel directement, avec un appareillage 'rudimentaire'.

²¹² National Fire Protection Association of America, Standard n°69, 1973, Standard n°60, 1973.

technologiques entre l'alternative technologique et d'autres capitaux physiques (*'interdépendance technologique'* David 1987).

Interdépendances technologiques

Ainsi que nous l'avons précédemment signalé, l'objectif des injections au haut fourneau a consisté à dénouer une interdépendance forte établie entre les cokeries et le haut fourneau, en permettant une flexibilisation de l'économie du haut fourneau. Globalement, les injections ont remplacé cette interdépendance par une autre, puisque, particulièrement dans le cas du fuel, les injections, de quantité importante, ont pu contribuer à créer un déficit durable des capacités en coke des usines. Les injections - particulièrement les injections de fuel représentant une économie massive de coke- se sont donc inscrites durablement dans le capital physique des usines sous forme de déficit structurel en capacité de cokerie.

Un second volet de cette flexibilisation concerne la possibilité offerte aux sites éloignés des sources énergétiques - du fait de l'histoire et de la localisation de nombreux sites à proximités des mines par opposition à la modernité des sites au fil de l'eau- de diversifier leur approvisionnement en fonction de leur environnement local. Dans la bataille livrée entre sites anciens, et sites récents, relocalisés au bord de mer (Jolivet 1999), les injections ont donc fourni aux sites anciens des arguments économiques supplémentaires.

Un troisième élément important tient à l'évolution du haut fourneau. Les technologies d'injection se sont historiquement développées en relation étroite avec un mouvement de modernisation des hauts fourneaux. Le contrôle amélioré de la température de flamme et la meilleure utilisation de leur potentiel de vent chaud ont autorisé d'importants gains de productivité, et l'accroissement continu de la taille des appareils. En facilitant le contrôle de la température de flamme et la stabilisation de la marche de hauts fourneaux de grande taille, réputés plus instables, les technologies d'injection se sont liées inexorablement avec les pratiques modernes de production de fonte. Le fuel a tiré un bénéfice considérable de cette interdépendance avec la température de flamme. Du fait d'un ratio carbone/ hydrogène faible, en effet, les possibilités d'injection de gaz ont été plus rapidement limitées que celles de l'injection de fuel.

Le destin commun des hauts fourneaux modernes et de l'injection de fuel ont paru se sceller un peu plus encore lorsque les pratiques de haute injection de fuel ont autorisé le développement conjoint de quantités importantes d'oxygène. La combinaison de ces deux techniques complémentaires a abouti à de nouveaux gains de productivité. Les pratiques d'injection de fuel à taux d'injection élevé ont donc

contribué à tisser une série d'interdépendances privilégiées entre cet injectant, la technologie et l'économie des grands hauts fourneaux 'modernes': haute productivité, température de vent très élevée, vent suroxygéné ...

Réseaux institutionnels d'information

L'histoire de la standardisation du fuel met en scène d'importants réseaux institutionnels d'information'. A l'inverse des tendances impulsives et atomiques des usines, les centres de recherche, associations techniques, et fédérations professionnelles ont eu tendance, lors des premiers pas, à promouvoir une certaine cumulativité des expériences, une certaine systématisation des explorations, une certaine accumulation-distribution de l'information (David et Foray 1996). La publication d'articles relatant les différentes expériences menées en matière d'injection au haut fourneau a été l'un des moyens privilégié de cette mise en commun.

Parallèlement à la profusion un peu chaotique d'expériences diverses menées dans les usines sidérurgiques, des démarches et études plus systématiques ont été entreprises par deux institutions collectives des communautés sidérurgiques européenne et américaine. Le Bureau des Mines aux Etats Unis, le centre d'essai de la CECA en Europe. Tous deux, dotés de hauts fourneaux expérimentaux (hot model) ont testé, de façon systématique et sur un matériel identique, une série d'injectants variés. Ces études ont cherché à dégager des lois générales de fonctionnement des injections. Celles-ci ont contribué à fournir, à un moment où les risques pris étaient élevés, une série d'éléments d'analyse et une série de modèles et d'indicateurs facilitant la prise de décision et la sélection à un moment où les effets de l'information étaient maximum - *narrow window policy* (David 1987)-. Vis à vis d'explorations locales, dont la tendance a été d'approfondir une voie technologique, les institutions de recherche ont ouvert une fenêtre sur la diversité de l'espace technologique, en favorisant une exploration systématique et réversible du spectre des possibles.

Un second type de réseau mérite d'être décrit. Il s'agit du réseau constitué par les industriels du secteur pétrolier. Dès les premières étapes du développement des injections, ces derniers ont consenti d'importants investissements - *'sponsorship'* (Katz et Shapiro 1986) - favorisant l'injection de fuel, que ce soit en France ou en Amérique, où ce type d'injection a débuté. Certains textes attribuent même l'impulsion originale de l'injection de fuel aux ingénieurs du secteur pétrolier: "*In 1960, the idea of injecting heavy fuel oil was first proposed to Dofasco Research by A Purdy, of Imperial Oil, as a possible*

means of achieving low cost coke replacement”⁽²¹³⁾. Plusieurs grosses compagnies pétrolières ont en effet participé, dès les toutes premières phases de développement des injections, aux expériences menées: soit par une participation au financement de certaines études et expériences, soit en s’associant à des équipes mixtes composées de sidérurgistes et de pétroliers, autour de projets de développement d’installations commerciales d’injection de fuel, assurant ainsi le transfert de certaines compétences dans la maîtrise du pétrole vers la sidérurgie, soit en menant des expériences au sein de leurs propres laboratoires de recherche, et en distribuant les résultats dans la communauté sidérurgique. Outre les efforts déployés pour favoriser l’émergence rapide d’une technologie d’injection de fuel, avant le développement d’autres alternatives, ces sociétés ont, à partir de la seconde moitié des années 1960, activement participé au financement de recherches sur le développement d’injection de taux élevés de fuel.

A la fin des années 1960, l’effet conjugué de la volonté d’accroître notablement les taux d’injection de fuel au delà de 100 kg par tonne de fonte, et l’apparition de limites liées à la combustibilité du fuel - formation de suies- a provoqué la mise en place d’une vague importante de recherche et développement. Un ensemble de sidérurgistes, de spécialistes des phénomènes de combustion, de pétroliers ont joint leurs efforts dans le but d’améliorer la combustibilité du fuel. Parmi les développements les plus remarquables, la mise au point d’un dispositif d’homogénéisation de mélanges fuel-eau, provoquant des micro-explosions dans les tuyères, a été le fruit d’une collaboration entre Esso et l’usine sidérurgique de Hamborn Thyssen, en Allemagne. La mise au point d’une nouvelle tuyère, la tuyère sonique ou onde de choc par l’Irsid, a formé un autre développement technologique remarquable. L’un des chercheurs de l’équipe se souvient des rapports privilégiés entretenus avec les groupes pétroliers:

“Notre sujet principal de recherche, vers mi-68, quelque chose comme ceci, est devenu l’injection de fuel au haut fourneau et on a fait effectivement des recherches tout à fait importantes dans le domaine. (...) Je crois disons que le prix du fuel donc est devenu extrêmement attractif - à l’époque, je me souviens, sur ce sujet on avait beaucoup de contacts avec les pétroliers, on avait en particulier pas un accord, mais du moins des relations privilégiées avec ESSO- et le souci des pétroliers était comment faire pour écluser tout ce fuel lourd que nous avons à écluser, dont les cuves vont déborder, on ne sait pas qu’en faire...et donc c’est pour cela que l’on a commencé à dévelo... par contre à pousser les injections de fuel en sachant que la technologie était quand même plus simple que le charbon, et on a effectivement développé le fuel sur les fourneaux avec des niveaux de l’ordre de, selon les cas 30, 40, 50, 60, 80 kilos, même 100 kilos à D. dans les années 70, on a injecté 100 kg sur le fourneau 3 de D., mais l’objectif des recherches, c’était de passer à 150 () et à partir donc de 74-75 les essais, qui étaient pratiquement terminés, les essais pilotes, les essais pilotes disons sur le champ expérimental étaient là pratiquement terminés, avec des conclusions d’ailleurs: des formes de tuyères, de forme de tuyère ‘onde de choc’ en particulier qui devait permettre, qui devait permettre de brûler, enfin de faire une combustion rapide du fuel par une pulvérisation très fine etc...”⁽²¹⁴⁾.

La technologie d’injection de charbon a également bénéficié de la constitution de réseaux de recherche et de la formation de bases de connaissances, bien que le contexte de leur formation ait été sensiblement différent du cas du fuel.

²¹³ Ashton, J. (1975) “Homogenized Oil at Dofasco” in: AIME Ironmaking Conference Proceedings, April 1975, p. 261. “Esso Research and Engineering Co, through co-operative work with the US Bureau of Mines, the US Steel Corp. and Dominion Foundries and Steel Ltd, promoted the use of heavy Bunker ‘C’ oil for injection”(Melcher et Mahan 1972, p. 4).

Aux Etats Unis, le problème de l'injection du charbon a mobilisé une série d'acteurs puissants et expérimentés: le bureau des Mines a soutenu et encouragé les développements de l'injection de charbon, et pas moins de trois sociétés d'ingénierie se sont attelées au problème en collaboration avec des sociétés aussi puissantes que US Steel, National Steel ou Armco Steel, lesquelles figuraient parmi les plus importantes du monde, à cette période. En France, les Charbonnages de France et le Cerchar, se sont associés à l'Irsid et à la société Usinor pour développer l'injection de charbon. La CECA a financièrement soutenu les opérations.

L'un des points fondamentaux pour comprendre le développement et l'orientation de ces réseaux tient au mystère qui a entouré les échecs successifs rencontrés dans l'industrialisation du procédé. Bien que le charbon, à travers sa cokéfaction, n'ait pas été totalement inconnu des sidérurgistes, en pratique, les raisons des échecs successifs rencontrés avec le charbon pulvérisé n'ont pas été bien compris. Le charbon pulvérisé et sa manipulation pour l'injection a ouvert une zone technologique largement inconnue, une zone d'incertitude pour les sidérurgistes. Comment se comporte le charbon pulvérisé? Comment le stocker sans qu'il explose? Comment le transporter sans qu'il bouche les lignes? Comment le doser avec précision? Autant de questions ayant nécessité le développement et l'accumulation de connaissances et la construction de repères collectifs ad hoc.

Outre le fait que ces réseaux ont subi une série de revers dans l'injection de charbon, les ingénieurs impliqués dans le développement du charbon n'ont pas réussi à se mettre d'accord sur une interprétation des échecs constatés. Ceux-ci ont conservé leur mystère. Tantôt, d'étranges phénomènes se produisaient au coeur du haut fourneau, dans d'autres cas, des remontées de fonte liquide sont venues sectionner les tuyères et provoquer des dégâts, enfin, des incendies et explosions ont endommagé certains équipements. Cette incertitude a agit comme une incitation efficace.

Au milieu des années 60, la clé essentielle du problème a été formulée: pour maîtriser le charbon, il fallait avant tout maîtriser sa granulométrie. La granulométrie est devenue la variable essentielle tenant à la fois les dimensions économiques et techniques de l'injection de charbon. Une pulvérisation trop fine entraîne des coûts de broyage élevés, des risques d'explosion supplémentaires, des difficultés de manutention. Une pulvérisation trop grossière entraîne un risque d'usure important des tuyauteries, et une indigestion généralisée de la part du haut fourneau. Sur la base d'expériences diversifiées menées sur les haut fourneaux - le charbon ayant été broyé très finement dans certains cas et grossièrement dans d'autres

²¹⁴ Entretien Direction Département Fonte de Dunkerque, Dunkerque, janvier 1996.

cas - un certain nombre de symptômes ont été associés à la taille des particules de charbon. Mais la véritable solution est intervenue lorsque, sur la base de travaux publiés par des chercheurs spécialistes des questions de combustion (²¹⁵), la question de la granulométrie a pu être simplifiée pour donner lieu à l'établissement d'une formule et à un calcul d'optimisation.

III.C. Lock-out et osbolescence

“However, such an economy is also based on the use of raw materials and, in particular, cheap sources of energy. The disappearance of such windfalls, particularly a main source of energy, will shake this economy and accelerate certain changes..() As performance are improved, the productive system becomes increasingly sensitive to every minor change in the prices of factors of production” (Cohendet et Alii, 1991, p. 377)

1) Lock-out.

²¹⁵ La formule lie le temps de combustion à la taille initiale optimale des particules de charbon. $t = 12.5d^2$. Field, M. et Alii (1967) “Combustion of Pulverised Coal” in: British Coal Utilisation Association, pp. 350-355; Essenhigh, R. (1963) “The influence of coal rank on the burning times of single captive particles” in: ASME Conference Proceedings, pp. 183-190.

Le concept de lock-out a été, à notre connaissance, élaboré et utilisé exclusivement par Foray et Grübler (1990). Avec ces auteurs, nous considérons qu'il est essentiel, en complément d'une théorie du lock-in, de développer une théorie du lock-out. On peut définir le lock-out comme le phénomène inverse au lock-in, à savoir comme une dé-standardisation. Le phénomène de lock-out correspond à la réversibilisation des réseaux, à l'obsolescence des technologies et des savoirs. Foray et Grübler, dans leur travail, montrent qu'une situation de lock-in peut être chassée par une autre : un standard peut se substituer à un autre, à partir du moment où la nouvelle technologie trouve une situation de niche qui lui permet de se développer à la marge de l'espace technologique, sur un marché localisé, le temps que les effets asymétriques créés par les rendements croissants et les externalités de réseaux dont bénéficie l'ancienne technologie, soient compensés par des développements similaires au profit de la nouvelle technologie. Les conditions de lock-out décrites par Foray et Grübler correspondent donc à une forme de lock-out par lock-in : ils rejoignent fondamentalement la question des conditions de substitution des technologies, dans des conditions de rendements croissants. Plus radicalement, la situation que nous présentons correspond à un lock-out sans lock-in, c'est à dire à une situation de réversibilisation pure : elle invite à penser le lien entre mécanismes de réversibilisation lié au marché, aux ajustements liés au caractère flexible de l'économie telle qu'elle est décrite dans la littérature néo-classique, en relation avec les mécanismes institutionnels, organisationnels, et cognitifs liés aux mécanismes d'accumulation, aux irréversibilités liées au caractère cumulatif de l'économie, telle qu'elle est décrite dans la littérature néo-institutionnaliste ou néo-schumpétérienne. Les conditions dans lesquelles les ressources construites deviennent obsolètes représentent une clé d'analyse essentielle de ces phénomènes.

Virage

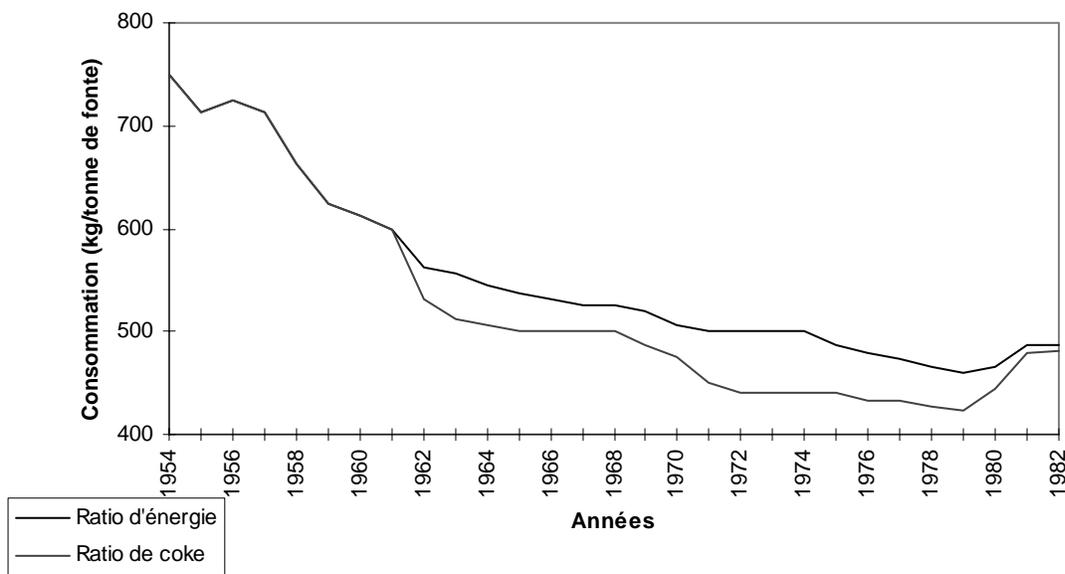
Dès la fin des années 60, le développement des injections de fuel a été tel que certains experts pensaient pouvoir rapidement défaire totalement le lien entre haut fourneau et coke: *“Some voices have raised and provide and provide a radical solution of the problem by suggesting the complete abandonment of the classical blast furnace and BOF route and to further develop steel industry on the direct reduction / arc furnace - route with or without application of nuclear energy. This way they believe to make steel industry once for all free of its dependence from coking coal and metallurgical coke”* ⁽²¹⁶⁾

Les années 1970 ont formé le cadre d'un retournement de situation extraordinaire. Ainsi que nous l'avons vu, pendant la première moitié des années 1970, l'injection de fuel est devenue le standard

²¹⁶ Poos A., Ponghis N., De Woot P., Thirion A. (1974) “Injection of hot reducing gas into the bosh of blast furnace n°3 of the Seraing E plant of Cokerill.” in: AIME Ironmaking Conference Proceeding, Vol 33, 1974, pp. 306-321.

incontournable des pratiques de production de la fonte. La part du fuel dans la mise au mil d'énergie totale utilisée pour produire une tonne de fonte a atteint des records, et parallèlement, de nouveaux records d'économie de coke ont été battus. Pourtant, à partir de la fin des années 1970, la tendance s'est rapidement inversée, au point où l'injection de fuel est redevenue une technologie d'appoint dédiée au contrôle de la température de flamme. Vingt ans de développement technologique ont soudain semblé s'évanouir. Le graphique 1.4 présentait le renversement de situation en matière de pratique des injections. Le graphique 1.6 indique l'effet de ce renversement sur la dynamique de diffusion.

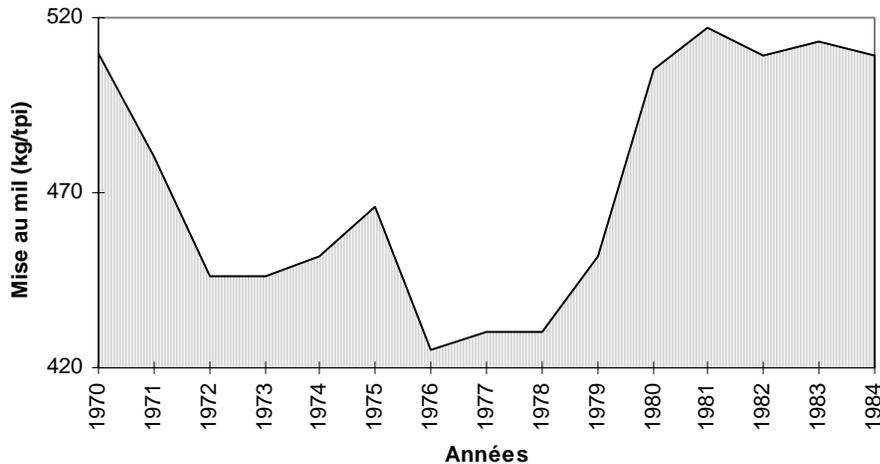
Diffusion des injections au haut fourneau. Le cas du Japon



Source: d'après Iwaru et Alii (1972) et Inaba (1996)

Graphique 1.6, évolution de l'économie de coke dans le monde sous l'influence du lock out des injections de fuel.

Economie de coke



Source: IISI,

(1993) *World Cokemaking Capacity*. IISI

A la fin des années 1970, un phénomène de réversibilisation rapide des investissements est intervenu. En quelques années les équipements construits, les connaissances accumulées, les réseaux tissés semblent être devenus largement obsolètes. L'obsolescence technologique n'est pas un phénomène nouveau (Frankel 1955). L'originalité tient ici à la fois à l'ampleur du phénomène, et au fait que cette réversibilisation n'a pas été le fruit d'une compétition, ou de la substitution d'une technologie 'nouvelle' à une technologie 'ancienne'. A la fin des années 1970 et au début des années 1980, les sidérurgistes ont repris les pratiques de production de fonte semblables à celles qui se pratiquaient dans les années 1950. Les usines les plus avancées en matière technologique ont ainsi développé des pratiques de conduite de haut fourneau en marches dites 'tout coke' ⁽²¹⁷⁾, que ce soit au Japon ou en Europe: "*Worried by the sky rocketing oil prices after the oil crisis in 1974 and 1978, Japanese steelmakers decided to exclude oil from the plants. The blast furnace stopped injecting oil into the tuyeres and ended up operating without any auxiliary fuel. It is now a total coke operation.*" ⁽²¹⁸⁾. Les taux de mise au mille de coke ont eu tendance à remonter rapidement. Cependant, les progrès technologiques réalisés ont permis de limiter l'augmentation de la mise au mille globale d'énergie pour la fabrication d'une tonne de fonte aux environs de 500 kg (Steiler et Schneider 1994, p. 1194).

Le coke a donc retrouvé rapidement sa place comme source d'énergie privilégiée du haut fourneau et de la production de fonte.

²¹⁷ Thirion, C. Jusseau, N., Bouget, J. (1981) *Revue de métallurgie*, Vol 78, n°11, pp. 857-868.

²¹⁸ Inaba S. (1996) "Successful development and future prospect for injection technology of blast furnace in Japan" in IISI (1996) op cit. p. 47.

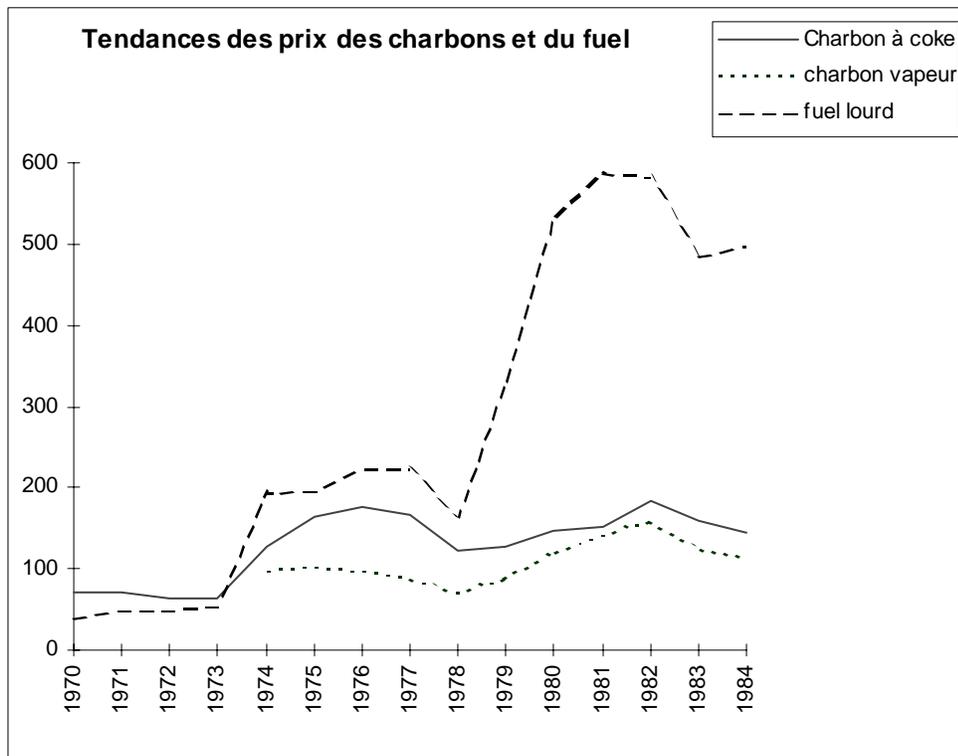
Forte dépendance du haut fourneau vis à vis de son environnement

Comment expliquer un tel retournement de situation? Le lien tissé entre le fuel et le haut fourneau a rendu celui-ci sensible aux fluctuations des prix de cet injectant. La crise géopolitique intervenue au Proche-Orient, a donné le hoquet aux hauts fourneaux. Le prix de la fonte s'est envolé avec la flambée des prix du pétrole. Les événements ont constitué un véritable 'choc' traumatique pour les hauts fourneaux: *"puis il y a eu le choc pétrolier, 73-74, et euh, d'un seul coup, on était parti dans une direction avec une certitude, et puis on s'est brisé net sur un obstacle économique extérieur. Le pétrole est devenu beaucoup plus cher. Donc pendant un moment, on a fait semblant de pas y croire {rire}, ça s'est confirmé, par la suite, je crois, il y a eu le 2ème choc pétrolier.. c'était pas une solution viable...Les chercheurs ont eu du mal à l'admettre parce que.... que c'était quelque chose de durable."* (219).

L'injection de fuel, dont la fonction de principal consistait à substituer une forme d'énergie flexible et économique au coke, est devenue une pratique extrêmement coûteuse, et une source d'instabilité importante. Il est devenu beaucoup plus économique pour les usines de s'en tenir à l'utilisation du coke. A titre d'illustration, le graphique 1.7 indique le jeu des prix relatif pendant la période charnière 1975-1985 dans le cas de la sidérurgie japonaise. Les mêmes tendances ont été observées en Europe. Aux Etats Unis, la situation énergétique a été un peu différente.

Graphique 1.7. Evolution des prix relatifs du charbon à coke, du charbon vapeur et du fuel 1970-1985, l'exemple du Japon

²¹⁹ Entretien Direction Technique F.Steel, Paris, janvier 1996.



Source: Matsumoto, T. et Alii (1986) "Present condition of pulverized coal injection for blast furnace in Japan" in: *European Ironmaking Congress Proceeding, Vol II, Session IV.4, September 1986, Aachen. VDEh p 15.*

Dès le premier choc pétrolier, l'injection de fuel a perdu son intérêt économique du point de vue des prix relatifs des matières. Les irréversibilités mises en place et une certaine inertie technologique expliquent que les pratiques d'injection de fuel se sont perpétuées malgré tout pendant les années 1970. Comme le souligne la citation ci-dessus, une forte incertitude demeurait sur la durabilité du phénomène. Le second choc pétrolier s'est accompagné d'une véritable flambée des prix du pétrole laissant peu de place aux doutes. Ce choc s'est alors accompagné d'une réversibilisation rapide des pratiques de production de fonte. Nombre de haut fourneau ont continué à injecter de faibles quantités de fuel, dans le but de réguler la température de flamme. Mais l'injection de fuel n'a plus assumé sa fonction d'économie de coke.

2) Le retour du charbon

Vers la clôture de l'espace technologique des injections au haut fourneau?

L'éviction du fuel s'est accompagnée d'une forte dépendance des hauts fourneaux vis à vis du coke. Après que la standardisation du fuel ait abouti à l'exclusion des autres types d'injection, avant d'être

à son tour disqualifié, l'espace technologique des injections au haut fourneau semblait bel et bien menacé de n'avoir été qu'une brève parenthèse dans l'histoire technique de la sidérurgie.

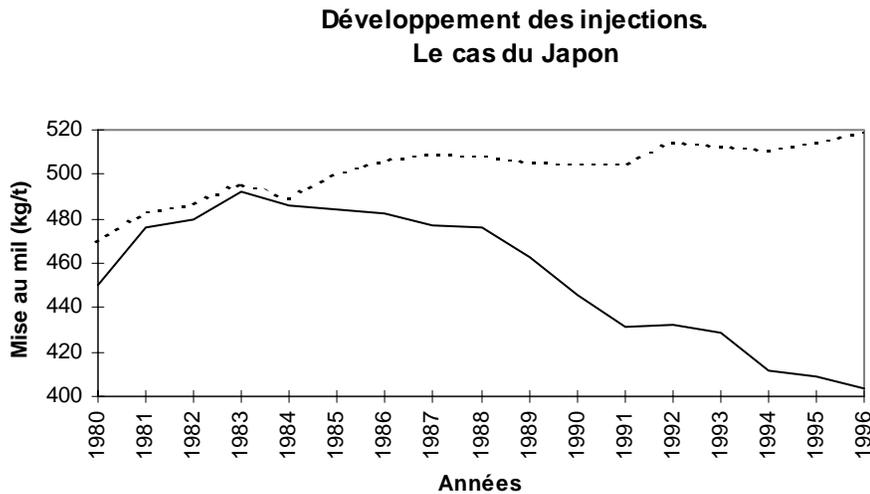
Pourtant, dès la fin des années 1970, nombre de hauts fournistes ne se sont pas satisfaits des marches tout coke. Ils ont entrepris de chercher un substitut au fuel. Une nouvelle phase de compétition a donc été réouverte. Cette nouvelle phase a débuté par une dynamique exploratoire proche de celle connue à la fin des années 1950: *“Finalement, à la fin des années 70, l'injection all-coke posait beaucoup de problèmes, et en particulier, il en résultait une destabilisation du fonctionnement des hauts fourneaux. Les sidérurgistes cherchaient, dans toutes les directions, des solutions qui leur permettraient de remédier à cette situation. Quasiment tout le monde sidérurgique était engagé dans cette quête.”* ⁽²²⁰⁾

En fait, deux principales voies ont été suivies face à l'augmentation drastique du prix du pétrole. Certaines usines, souvent à la pointe de la technologie, ont entrepris avec succès de pratiquer les marches tout coke.

Nombre d'usines, éprouvant des difficultés à maîtriser des marches tout coke à forte productivité, ont continué à injecter de petites quantités de fuel pour conserver la maîtrise de leur haut fourneau. Les injections de fuel avaient permis une meilleure maîtrise de la température de flamme, un niveau de performance productive élevé, une régulation du fonctionnement du haut fourneau difficile à atteindre sans elles. Beaucoup se sont lancées dans la recherche de substitut au fuel dans l'objectif de prendre en charge cette fonction stabilisatrice. Dans certains cas, les investissements dans les installations d'injection de fuel avaient permis de limiter les investissements en cokerie. Certaines usines, comme D. en France, O. au Japon, ou Ijmuiden aux Pays bas, connaissaient d'importants déséquilibres en matière de capacité de cokerie. Les deux candidats les plus sérieux, le gaz et le fuel, culminant à des prix peu attrayants, le goudron, et le gaz de cokerie, ont fait leur réapparition. Le charbon, les produits hybrides, les slurries et le COM, ont fait l'objet de nouveaux essais d'injection et de développements technologiques.

²²⁰ Entretien retraité, ancien responsable du Département Ironmaking Process, J Steel, novembre 1995, Tokyo.

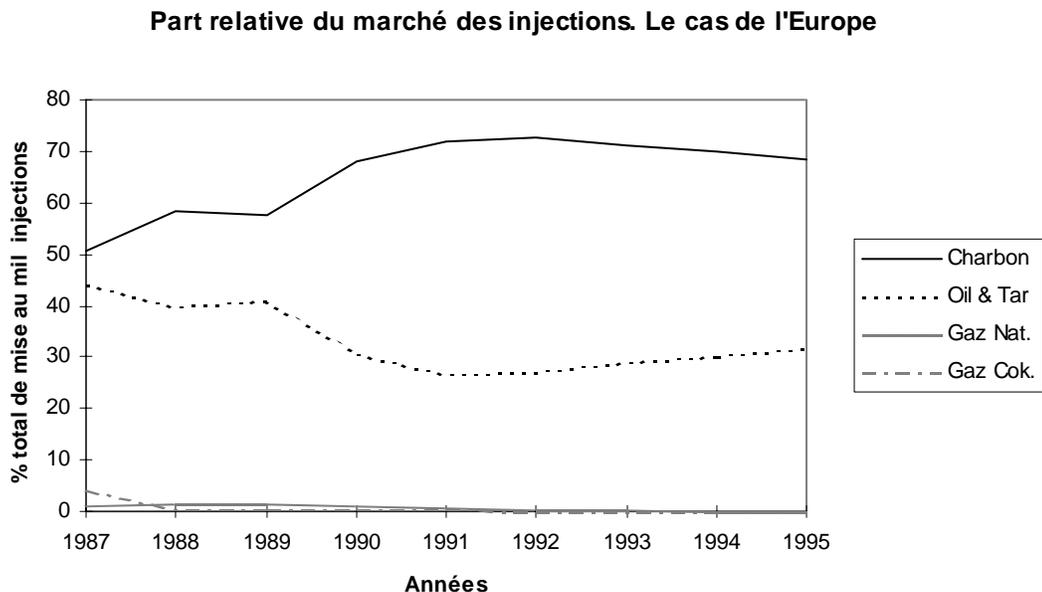
Le graphique 1.8 illustre le développement des injections au haut fourneaux dans la période 1980-1995, dans le cas du Japon:



Source: Données compilées d'après documents du Japan Iron & Steel Institute. Le trait pointillé représente la mise au mil globale. Le trait plein représente la mise au mil de coke.

Au Japon, le charbon a rapidement dominé le marché. En Europe, la compétition entre les différentes alternatives a été nettement plus ouverte. Dans l'ensemble, on note une standardisation par pays, soit du fuel et du goudron, soit du charbon. Globalement, cependant, le charbon a commencé à dominer le marché à partir de la seconde moitié des années 1980.

Le graphique 1.9 représente les parts relatives des différentes alternatives dans le marché des injections au haut fourneau, en Europe:



Source: Données compilées à partir de documents du European Blast Furnace Committee. Vdeh.

Sour

Création de diversité

Une nouvelle dynamique exploratoire a vu le jour, fondée sur des logiques localisées d'adoption de l'une ou l'autre alternative. La réouverture n'a cependant été que partielle, dans la mesure où l'exploration a été nettement plus limitée que dans les années 1950, d'une part, et d'autre part, du fait que la création de diversité s'est largement appuyée sur les premiers développements réalisés dans les années 1950-60. Il n'est pas rare que les adopteurs aient combiné plusieurs alternatives dans une même usine.

Parmi les différentes alternatives redécouvertes, les injections de charbon sont apparues comme des solutions attractives pour les usines connaissant d'importants déséquilibres en matière de capacité de cokerie. Ijmuiden en Hollande, O. au Japon, D. en France, Scunthorpe en Grande Bretagne ont pour la plupart injecté des taux élevés de fuel au haut fourneau dans les années 1970, et se sont trouvées à l'origine de développement importants des pratiques d'injection de charbon dans les années 1980. Du fait de son prix relatif attractif, et des niveaux d'injection théoriquement élevés qu'il autorisait, le charbon est devenu un candidat sérieux à l'injection, bien que contrairement à d'autres solutions techniques, il requérait d'importants investissements.

Sous l'impulsion de quelques usines, le charbon s'est révélé, en pratique, après un redémarrage controversé, un injectant susceptible de remplacer très avantageusement le fuel, y compris pour des injections à taux élevé.

Changement de contexte et standardisation du charbon

A partir de la seconde moitié des années 1980, de nouvelles craintes sont apparues en matière de pénurie de coke. Ces craintes se sont traduites par un écart croissant entre le prix du coke et le prix du charbon vapeur. Le déclin progressif de la capacité globale de cokerie à l'échelle mondiale amorcé dans les années 70 s'est poursuivi. Du fait de l'évolution à long terme de l'investissement dans la sidérurgie, le parc de cokerie dans les pays anciennement industrialisés a eu tendance à vieillir à compter des années 1970. La question du remplacement des batteries de coke les plus anciennes s'est posé avec une acuité croissante à partir de la fin des années 1980. Dans le même temps, les exigences en matière de qualité chimique et physique du coke n'ont cessé de s'accroître. L'ensemble de ces éléments ont eu tendance à relancer l'intérêt des injections à taux élevés.

L'injection de charbon, plus avancée par rapport aux autres alternatives dans ce domaine, a alors connu un succès croissant, pour devenir progressivement le nouveau standard des injections au haut fourneau. Cela a permis à certains experts, de déclarer dès 1988 : *“Blast furnace coal injection is one of the most rapidly expanding ironmaking developments worldwide with about 50 furnaces currently having coal injection equipment outside the centrally planned economy (CPE) countries”*. (Gathergood, 1988).

Avec la standardisation et la diffusion massive des injections de charbon, les taux d'injection n'ont cessé de croître pour atteindre environ 20 % de la mise au mille totale d'énergie à la tonne de fonte en moyenne au Japon, au Pays Bas, en Belgique, en Italie, et en France en 1995.

3) Rendements croissants et externalités de réseau

“donc du charbon qui a commencé dans les années 50-60, qui a été chassé par le fuel, qui a lui même été chassé par le charbon. L'histoire c'est pas un éternel recommencement mais il y a quelques aller-retours comme ça...quelquefois il y a des facteurs qu'on ne maîtrise pas comme ça!” ⁽²²¹⁾.

Quels ont été les principaux facteurs de la standardisation du charbon? Bien entendu, comme dans le cas du fuel, le charbon a bénéficié d'un avantage en matière de prix relatif sur ses principaux rivaux. Dans la première moitié des années 1980, période clé de la compétition, le charbon a bénéficié de prix extrêmement attractifs par rapport au fuel et au gaz naturel. Lorsque le prix du fuel a retrouvé un cours comparable à celui du charbon, dans la seconde moitié des années 1980, la standardisation était déjà largement engagée. A cette même période, l'écart entre le prix du coke et le prix du charbon n'a cessé de grandir en faveur du charbon.

Contrairement à ce qui s'était produit dans les années 1960, le charbon n'a pas souffert d'une indisponibilité technologique. A l'inverse, les expériences menées sur les matières hybrides n'ont jamais été véritablement étendues aux usines industrielles. Les niveaux de valorisation de matières comme le gaz de cokerie et le goudron ont limité leur disponibilité. Les expériences originales d'Armco et de Shoudu et Donietzk, longtemps considérées comme des curiosités technologiques, ont eu un rôle incubateur essentiel ('développement quasi in vitro' Foray et Grübler, 1990), permettant en particulier aux développements de s'appuyer sur une première base de connaissance, sur une technologie vivante (Zuscovitch 1985, Willinger Zuscovitch 1993). A partir des expériences réussies, et en particulier de celle d'Armco, des transferts de technologie ont été effectués au Japon, en Hollande.

²²¹ Entretien Direction Technique, F.Steel, Paris, janvier 1996.

Si la compétition n'a pas été très virulente entre les différentes matières injectables, elle a au contraire été féroce entre les différentes alternatives et solutions techniques d'injection de charbon. Au Japon, une véritable compétition s'est organisée entre 3 grandes sociétés proposant différentes variantes de l'alternative d'injection de charbon. En Europe, plusieurs sociétés d'ingénierie se sont associées à des usines sidérurgiques pour développer des systèmes d'injection de charbon, que ce soit en Allemagne, en Grande Bretagne ou au Luxembourg. Deux alternatives technologiques principales sont nées de ce mouvement, l'une fondée sur l'injection de charbon pulvérisé, l'autre sur l'injection de charbon grenu. La CECA a très tôt encouragé l'émergence de ces développements, et s'est trouvée associée à la mise au point du premier prototype d'injection européen conçu par Paul Würth, devenu depuis, le principal fournisseur mondial d'installations, avec une cinquantaine d'installations de part le monde.

Les rendements croissants d'adoption ont été importants, tant du point de vue de la dynamique d'apprentissage technologique, des rendements informationnels croissants, que du point de vue des économies d'échelles. L'un des principaux enjeux technologiques résidait dans la transposition de la technologie américaine à des hauts fourneaux 'modernes' de grande taille. Ce transfert a nécessité la mise en place de nombreuses améliorations et adaptations, que ce soit en matière de distribution, de transport, ou de régulation des débits. Le succès des premières entreprises ayant adapté cette technologie, les performances exceptionnelles réalisées par les premiers adopteurs ont permis de réduire rapidement les incertitudes qui pesaient encore sur la faisabilité de l'injection de charbon en début de période. Des réseaux d'échanges de connaissance se sont rapidement formés entre les adopteurs pour favoriser l'établissement de règles d'optimisation des pratiques.

L'établissement des pratiques d'injection de charbon, leur diffusion, ajoutés aux incertitudes technologiques et aux difficultés pratiques rencontrées dans les injections à taux élevés ont provoqué la mise en place de nombreux programmes de recherche, portant en particulier sur les phénomènes de combustion du charbon dans les foyers. Les organisations professionnelles ont largement participé à l'établissement des échanges et de la circulation des informations entre les équipes. La formation de ces bases de connaissance et de ces réseaux de relation a permis à une dizaine de sites dans le monde d'atteindre des taux d'injection supérieurs à 180 kg/tonne de fonte, grace en particulier à une meilleure maîtrise du chargement des hauts fourneaux. Aucun des concurrents du charbon n'a bénéficié d'un tel déploiement de moyens en R&D dans les années 1980.

Le charbon a pu à la fois profiter de rendements croissants d'adoption et d'externalités de réseau qui lui ont permis d'asseoir sa domination, y compris lorsque les prix relatifs lui sont devenus nettement moins favorables, dans les années 1990. Les irréversibilités créées ont été importantes.

Conclusion

Notre question, au début de ce chapitre, consistait à nous demander par quels phénomènes, un processus d'innovation exploratoire, imprévisible, chaotique, désordonné se transforme en mouvement stabilisé, canalisé, ordonné. L'économie de la standardisation, héritière de l'économie du changement technique, offre un cadre théorique permettant de prendre en charge cette question. Ce courant de recherche explique pourquoi une dynamique de développement technologique d'abord dominée par une forte atomisation des actions et des décisions, tend à s'organiser en compétition entre un nombre restreint d'alternatives, avant de sélectionner une alternative dominante, propre à profiter pleinement des effets d'approfondissement et d'accumulation. Cette théorie met en particulier en valeur l'importance de la dynamique d'adoption, des effets des comportements collectifs et de la création d'irréversibilité sur les décisions individuelles. Elle met en évidence la centralité du phénomène de standardisation -ou *lock-in*- dans le renversement de la dynamique et dans le passage du désordre à l'ordre technologique.

Le cas des injections au haut fourneau confirme largement la qualité explicative des modélisations et des concepts de l'économie de la standardisation. Nous avons pu y observer deux cycles de développement technologiques ayant chacun débouché sur la standardisation d'une alternative technologique: l'injection de fuel dans les années 1960, puis l'injection de charbon, pulvérisé une vingtaine d'années plus tard. A ce titre, il représente une excellente illustration des phénomènes de "*lock-in by historical event*" (Arthur 1989), mais aussi de standardisation multiples intervenant dans le cadre d'un *espace technologique*.

Le cas des injections au haut fourneau nous invite également à formuler un certain nombre de propositions complémentaires à l'égard du cadre posé par Arthur et ses successeurs. Il s'agit en particulier de reconnaître la nécessité du concept de '*lock-out*', et de la distinction à effectuer entre *appropriation* et *standardisation*.

De la nécessité du concept de lock-out

Le cas des injections au haut fourneau illustre bien à la fois la portée et les limites de l'économie de la standardisation et plus globalement, des approches trajectorielles de la technologie. La genèse et le développement des technologies d'injection au haut fourneau soutiennent à la fois les théories cycliques du développement technologique - cycles composés d'une phase exploratoire et d'une phase de standardisation- et l'idée d'une compétition technologique débouchant sur la sélection d'un standard dominant, sous l'influence de rendements croissants d'adoption et d'externalités de réseau. Le cas des injections illustre à merveille le rôle des bases de connaissances partagées accumulées par la communauté des adopteurs et des producteurs d'une alternative technologique, à l'origine des rendements croissants.

L'un des résultats essentiels à retenir est la nécessité d'intégrer le concept de '*lock-out*' (Foray et Grübler, 1990), ou de 'dé-standardisation', à la théorie de la standardisation. En effet, le modèle d'Arthur met l'accent sur l'importance des irréversibilités et de l'inertie créées par l'adoption massive d'une technologie. Mais il ne nous dit rien des phénomènes de substitution, ou de réversibilisation qui permettent aux phases exploratoires, créatrices de la diversité, puis à la compétition technologique de se mettre en place. Dans le cas de l'automobile naissante, présenté par Abernathy (1978), les seuls mécanismes d'irréversibilisation sont satisfaisants. Le cas des technologies d'injection au haut fourneau met en scène non seulement des mécanismes d'irréversibilisation, mais également des phénomènes de réversibilisation et d'obsolescence technologique rapide dont il nous paraît essentiel de pouvoir rendre raison.

Il nous semble indispensable avant d'aller plus loin, de distinguer deux types de compétition usuellement distingués dans la littérature (Le Bas, Sylvestre-Baron, 1995). La première forme de compétition est une compétition arthurienne. Arthur met en relation des alternatives émergeant simultanément sur le marché. En ce sens, la compétition décrite par Arthur est synchronique. Son modèle éclaire les mécanismes de sélection à partir desquels une alternative devient dominante en excluant ses rivales, au terme d'une compétition. Une autre série de modèles, que l'on peut nommer diachroniques, met en scène une compétition dite de '*substitution*', dans laquelle une technologie 'nouvelle', émergente, entre en concurrence avec une technologie 'ancienne', déjà en place (Farell et Saloner 1986).

Deux lignes de travaux ont ainsi illustré la nécessité de compléter le concept de *lock-in*, par celui de *lock-out*.

Rosenbloom et Abernathy (²²²) ont présenté un cas intéressant de lock-out technologique. Au moment où Sony a commencé à produire des téléviseurs, le marché américain était dominé par des postes de grande dimension. Les études marketing menées par la General Electric ont confirmé l'orientation du marché vers les téléviseurs de taille importante (supérieurs à 17 pouces), et condamnaient par avance toute autre design. En conquérant d'importantes parts de marché aux Etats Unis avec un poste modèle de poste noir et blanc de très petite dimension, Sony a créé une surprise en mettant en cause la domination oligopolistique de ce marché par les grandes compagnies américaines. Dans ce cas, la dé-standardisation du marché en faveur des postes de petite dimension semble donc bien avoir tenu à une *disponibilité* des petits écrans. La stratégie de distribution de Sony semble ainsi avoir joué une part importante dans le succès remporté. La compétition ne peut jouer que lorsque des solutions techniques commercialisables sont effectivement mises sur le marché. Cette proposition d'apparence tautologique vise à souligner le rôle fondamental, bien que souvent négligé, de la disponibilité comme condition essentielle de la compétition.

Foray et Grübler (1990), à qui nous devons le concept de *lock-out*, ont présenté un cas tout à fait différent. Les auteurs décrivent le développement technologique récent de la fonderie. Dans ce secteur, deux alternatives principales sont entrées en concurrence. Une première alternative, à 'modèle durable', constituait la technologie ancienne bénéficiant d'une large base installée et d'une optimisation reposant sur une longue courbe d'apprentissage. Une seconde alternative, dite à 'modèle perdu', s'est développée plus récemment, mais n'a pu faire valoir ses avantages potentiels, du fait de sa faible diffusion. La nouvelle technologie, potentiellement supérieure, n'était, dans les premiers temps pas suffisamment compétitive pour rivaliser avec la technologie canonique, et pas suffisamment développée pour être appliquée sur une grande échelle: *"the lock-in theory allows us to explain how a new and intrinsically superior technology may be impeded from supplanting an older technology () New inventions are typically very primitive at the time of their birth. Their performance is usually poor, compared to existing technologies as well as to their future performance' Thus, when a new technology is introduced in its initial (and therefore primitive) form, it has virtually no chance of imposing itself, even if the old technology is 'inherently inferior. The latter has profited from its monopolistic period to entrench itself materially (via technological interrelatedness) and intellectually (via sui generis evaluation norms) as the dominant productive paradigm."* (Foray et Grübler, 1990, p. 548).

Toute la question pour la technologie émergente a alors consisté à s'inscrire dans des réseaux 'institutionnels', à trouver une niche, un marché spécialisé, lui permettant d'atteindre une 'maturité' suffisante pour entrer en compétition avec la technologie installée: *"In this first period the new*

²²² Rosenbloom, R. et Abernathy, W. (1982) "The climate for innovation in Industry." In: Research Policy, Vol 11, pp. 209-225.

technology, 'protected' by a high value-added differential, may improve within a 'quasi in vitro' development, so to speak. Thus shielded, the new technology may acquire industrial properties via the mechanism related to the increasing returns to adoption, gradually armouring itself for competition" (Foray Grübler, 1990, p. 548). Sur son marché spécialisé, la technologie émergente a pu profiter d'une série d'investissements stimulant un processus d'apprentissage et l'organisation de la capitalisation et de la distribution des savoirs "*this pattern of diffusion generated a process of accumulation of knowledge, through adequate institutional arrangements: a technological foundation was created in Ludwigshaffen am Rhein, with strong participation by german firms (foundries and chemical industries)"* (Foray Grübler, 547). Elle a progressivement pu être adaptée à la production de masse, et devenir le nouveau standard technologique.

Cette étude de cas et la précédente militent en faveur d'un assouplissement des hypothèses exclusives posées par Arthur, et d'une intégration du concept de *lock-out*. Sans remettre en question l'importance des rendements croissants et des externalités de réseaux, Foray et Grübler montrent comment ces mécanismes peuvent jouer en faveur ou en défaveur d'une technologie alternativement, en faveur du maintien d'une technologie ou de son obsolescence rapide. L'un des points essentiels de cette analyse tient à sa rupture avec une vision monolithique du marché comme un espace unique et homogène.

Le cas des injections au haut fourneau présente une originalité. Le phénomène de *réversibilisation* qui s'est produit dans les années 1970 n'est pas lié à des mécanismes de rendements croissants et d'externalités de réseaux. Le phénomène de *substitution* ne peut pas être invoqué pour justifier l'obsolescence rapide des réseaux d'injection de fuel. Dans ce cas, la *réversibilisation* s'est déclinée par un 'bond en arrière' technologique. Vingt années de développements technologiques ont simplement été gommées, sans qu'un *progrès technique* alternatif ne soit intervenu pour l'expliquer. L' injection de fuel, après avoir éliminé ses principaux concurrents dans la course au remplacement du coke, et avoir fait l'objet d'une importante capitalisation, s'est trouvée disqualifiée. Le pari collectif des hauts fourneaux ayant misé sur cette technologie a été perdu. Nous touchons ici à la limite de l'efficacité des mécanismes de rendements croissants: les avantages acquis par la capitalisation peuvent être considérables, comme le souligne Arthur, mais ils demeurent toujours fragiles, comme l'indique le cas des technologies d'injection, dès lors que les hypothèses –anticipations - fondatrices sur lesquels ils reposent se trouvent invalidées. Non seulement les rendements croissants et les externalités de réseaux peuvent aboutir à la sélection d'une alternative jugée 'inférieure' (Arthur 1988), mais ils peuvent mener le marché à une impasse, s'accompagnant d'une perte massive de ressources investies. L'ordre peut parfois s'évanouir dans le

désordre qu'il a lui même généré, en limitant la diversité. Ce nouveau dilemne, symétrique au dilemne davidien, fait pesé une tension plus grande encore sur les mécanismes de passage de l'ordre au désordre.

Les phases de lock-out et de lock-in sont intéressantes du point de vue analytique, car pour paraphraser Gurvitch, elles constituent des moments de "cristalisation", de construction d'une réalité économique qui ensuite paraît immuable. Si l'on souhaite comprendre en profondeur les mécanismes au fondement du développement technologique, ces deux étapes constituent donc des observatoires privilégiés, deux dispositifs pivots de la création-destructrice.

Dans le cas des injections au haut fourneau, quels sont les phénomènes qui ont fait basculé l'ensemble de l'édifice technologique?

Les réseaux tissés autour du fuel, comprenant une forme de 'sponsorship' (Farell et Saloner, 1986, Katz et Shapiro 1986) de la part des pétroliers, répercutée sur les prix relatifs des matières, et les recherches indiquant sa potentialité supérieure en matière d'injection élevée ont constitué des facteurs essentiels du *lock-in*. Cela rejoint donc la question classique de la formation des anticipations : dans les années 1960, les sidérurgistes ont entrevu la possibilité d'une pénurie de coke. Dans les années 1970, la guerre a éclaté au Proche-Orient. Cette guerre a provoqué une modification des rapports de force entre producteurs et consommateurs de pétrole. Le prix du pétrole a augmenté. Les calculs technico-économiques des années soixante comparant différentes solutions d'injection se sont trouvées invalidées. Il est devenu non-économique pour un haut fourneau de la fin des années 1970 d'injecter du pétrole en remplacement du coke, étant donné la situation en matière d'offre et de demande de coke. La fonction essentielle ayant donné le jour à *l'espace technologique* des injections - l'économie de coke - n'était plus assurée à des conditions satisfaisantes.

Les victoires ont pu être de courte durée, tant pour le coke, triomphant au début des années 1980, que pour les injections d'hydrocarbures au haut fourneau, et pour le fuel en particulier, dont nombre d'experts pensaient qu'il allait enfin permettre de dénouer à jamais, le lien séculaire noué entre haut fourneau et coke. Comme le notait l'un d'eux dans un entretien qu'il nous a accordé, s'il est une chose que les sidérurgistes ont appris, c'est l'instabilité et l'imprévisibilité du marché des matières premières.

Dans un étonnant retour dont l'histoire a le secret, la conversion réussie des capitaux – capitaux humains en particulier - mis en place pour l'injection de fuel dans certaines usines a constitué un facteur déterminant du succès remporté par l'injection de charbon, contre ses concurrents, dont l'injection de fuel!

La standardisation arthurienne est donc nettement plus fragile que cet auteur ne nous le laisse entendre. Lorsque tous les éléments calculés de la supériorité des performances du fuel réalisent les prédictions, le fuel est indétronable, irrésistible, cristallisé, il fait partie du haut fourneau, et il appartient au paysage naturel du haut fourneau : le fuel est devenu un facteur institué d'une nouvelle fonction de production construite autour de lui. Mais il suffit d'un grain de sable, un imprévu pour que l'objet technique se réversibilise totalement et sombre dans les limbes d'une obsolescence rapide: ce que l'on croyait durable, éternel, universel se révèle n'avoir été qu'un feu de paille. L'imprévu est la partie immergée d'un iceberg trop largement ignoré: le monde économique n'est pas un monde spontanément stable. Comprendre le développement technologique nécessite de comprendre comment les acteurs transforment patiemment cette instabilité en un univers où l'accumulation est possible. Les acteurs économiques, particulièrement lorsqu'ils ont à faire avec le développement technologique, oeuvrent donc sans répit à la stabilisation de leur 'environnement': le succès de Ford a reposé en bonne part sur sa capacité à stabiliser un environnement chaotique. En simplifiant, en standardisant, en rendant maîtrisables les conditions de reproduction et d'utilisation de l'automobile, Ford et ses consommateurs ont contribué à transformer profondément le marché de l'automobile: "*Standards can be thought of in an evolutionary framework as being codes for replication of products and processes. Their role is to prevent the production process itself from being uninterpretable, or critical elements of its output from varying randomly*" (Metcalf, Miles 1994 p. 246).

Propositions pour une reformulation du phénomène de standardisation

Les lignes qui précèdent incitent à proposer une approche plus nuancée de la standardisation et des phénomènes de *lock-in*. Nos propositions tiennent en trois points.

Premièrement, il s'agit de prendre en considération le caractère relatif du *lock-in*. Arthur propose une théorie de la standardisation qui "*conduit avec une probabilité de 1 à l'adoption unanime*" de l'une des technologies en compétition (²²³). Dalle (1995) avance une vision plus nuancée de la standardisation: s'il est vrai que dans de nombreux cas, les rendements croissants aboutissent à la domination du marché par un standard, il n'est pas rare que cette domination s'accompagne de la subsistance d'une ou de quelques autres alternatives 'dominées'. L'adoption est rarement unanime et absolue. Le cas présenté par Foray et Grübler illustre la possibilité de survivance d'alternatives technologiques sur des niches

²²³ JM Dalle (1995) "Dynamiques d'adoption, coordination et diversité: la diffusion des standards technologiques" in: Revue économique, Vol 46, n°4, juillet 1995, pp. 1081-1098.

spécialisées. Des travaux plus récents mettent en avant, plus largement, l'importance de la 'géographie' du marché, c'est à dire l'inscription des marchés dans des territoires (Rallet et Torre 1995²²⁴). Dalle (1995), David et Foray (1994), David (1992), Callon (1992) proposent de représenter le marché comme un ensemble de relations localisées entre des adopteurs. En fonction des réseaux constitués, des informations échangées, des biens mis en circulation, le marché globale se compose d'un ensemble de marchés locaux, structurés chacun autour de standards spécifiques.

Le cas des injections au haut fourneau fournit un ensemble d'éléments relatifs à cette question. Le caractère géographique du marché y est largement attesté. Dans les années 1960, le Japon et l'Europe ont rapidement adopté les injections de fuel. La chine a constitué un terrain spécifiques où les injections de charbon se sont développées. L'Union soviétique a formé le cadre privilégié du développement et de la standardisation des injections de gaz naturel. Les Etats Unis ont offert un lieu de compétition intense entre le gaz et le fuel. Le même phénomène de segmentation géographique du marché est observable dans les années 1980, avec la standardisation du charbon. La domination globale du charbon a couvert une multitude de situations. Au Japon, le charbon a rapidement et largement dominé le marché. En Europe, les Pays Bas, ou la Suède ont massivement adopté le charbon à l'exclusion d'autres technologies. D'autres pays, l'Espagne, la Finlande, le Luxembourg, l'Autriche ont suspendu puis repris exclusivement l'injection de fuel. En France, en Allemagne, en Grande Bretagne, en Italie, et en Belgique plusieurs type d'injection ont coexisté au cours des années 1980. Certaines usines ont pratiqué différents types d'injection sur différents hauts fourneaux, ou parfois, ont combiné deux catégories d'injections sur le même haut fourneau. La coexistence de technologies de différentes 'générations' sur le même site a été souligné dans la littérature (Cohendet et Alii 1991, Maurice et Alii. 1986).

Le marché n'est donc pas l'entité monolithique et homogène que nous présente Arthur. Le phénomène de lock-in d'une technologie à un niveau macro-économique peut fort bien émerger dans une situation micro-économique très complexe, formée d'une multitude de marchés localisés. De même, la 'technologie' - une alternative technologique - peut être adoptée sur de multiples marchés sous forme d'un nombre important de variantes différentes, correspondants aux préférences variées des utilisateurs et aux ressources spécifiques des producteurs. Aussi longtemps qu'une certaine distance critique n'est pas franchie, et que des rendements collectifs croissants d'adoption lient ces différentes niches et les différents objets techniques entre eux, les effets de lock-in jouent à un niveau global.

²²⁴ Rallet, A., et Torre, A., (dir.) (1995) *Economie industrielle et économie spatiale*. Economica.

Deuxièmement, il est essentiel de rendre compte du caractère réversible des irréversibilités. Callon note que les processus d'innovation sont emplis d'exemples de 'dissidence', de grains de sables, de phénomènes imprévus menaçant la stabilité des solutions techniques patiemment élaborées. Ces imprévus contribuent pour beaucoup à l'instabilité des technologies en voie d'émergence et à l'incertitude initiale qui caractérise tout processus d'innovation. Nous utiliserons ici le terme de '*black-boxing*' pour désigner le travail de stabilisation des éléments composant un objet technique, et de '*black-deboxing*' pour désigner une situation dans laquelle l'un des éléments qui compose une technologie se rebelle, après s'être conformé, et avoir contribué à la cristallisation d'une technologie donnée (Latour 1989, Callon 1986).

L'histoire des technologies d'injection s'organise autour des prix relatifs des matières. On peut comprendre les prix relatifs comme des valeurs calculées représentant une série agrégée de réseaux d'usage et formant un marché global. A ce titre, il peut se produire des événements indépendants de la relation spécifique entre le fuel et le haut fourneau, et affectant néanmoins cette relation. On peut proposer la notion d'interdépendance limitée pour caractériser cette relation à la fois de dépendance et d'autonomie relative, liée à la multiplicité des réseaux de production et d'usage.

De multiples exemples montrent que les imprévus aboutissant à des lock-out ne sont pas strictement limités aux effets des prix (Callon 1986, Latour 1989). Une illustration est donnée par Akrich (²²⁵) à propos d'une technologie mise au point pour un pays en voie de développement. Après une longue élaboration, une machine à fabriquer des briquettes destinées au chauffage individuel, à partir du recyclage et de la valorisation des plants de coton, a été mise au point au Nicaragua où elle a commencé à connaître un large succès. Pourtant, après deux années de fonctionnement, un insecte vivant dans un massif de bambou proche du champs de coton responsable de la production de la matière première des briquettes a entrepris de coloniser les plants de coton. Les plants de cotons colonisés sont devenus subitement impropres à la production de briquettes. "*Amphiserus Cornutu, en étendant son espace de l'univers des bambous à celui des tiges de coton, spécifie la nature et les conditions d'utilisation de ces dernières (...il) en défait l'une des articulations principales. De ce fait le partage des compétences prévu initialement entre la sphère de production, au sens strict, des briquettes se trouve remis en cause par l'action de ce prédateur*" (Akrich, 1989, p. 49). L'ensemble de l'édifice technologique échafaudé a été menacé par un changement imprévisible de régime alimentaire d'*Amphiserus Cornutu*, dont l'effet sur la fonction de production avait été totalement ignoré.

²²⁵ Akrich, M. (1989) "la construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques" in: *Anthropologie et Sociétés*, Vol 13, n°2, pp. 31-54.

Pour qu'une standardisation arthurienne intervienne, il est indispensable que l'environnement des solutions techniques soit et demeure stabilisé. Il est possible d'ajouter le concept de '*black-deboxing*' à côté de celui de '*lock-out*', et celui de '*black boxing*' à côté de celui de '*lock-in*' pour signifier la nature profondément instable de l'innovation technologique, y compris après standardisation. Les imprévus nous rappellent que ces processus de stabilisation sont toujours relatifs.

Troisièmement, ce qui précède suggère de dissocier *appropriabilité* et *standardisation*, et plus largement, de distinguer différents niveaux de standardisation. La standardisation peut-être au sens d'Arthur, la domination d'un espace technologique par une alternative technologique: l'injection de fuel vis à vis de l'injection de charbon, le VHS vis à vis du Betacam. Elle peut-être, au sens de David, la stabilisation ('Freezing' Freeman 1994) de certaines caractéristiques d'un *design dominant*: le clavier QWERTY ou la Ford T stabilisent une série de caractéristiques qui les identifient par rapport à leurs concurrents. Elle peut, enfin, identifier une structure de marché, caractérisée par la domination d'une entreprise: Douglass dans l'aéronautique, IBM dans l'informatique, Ford dans l'automobile.

Le cas des injections de charbon offre un support à la réflexion sur ce point. L'injection de charbon a dominé le marché à partir de la fin des années 1980. Pourtant, il n'existe pas à proprement parler de design standard d'injection de charbon. Il serait plus juste de dire que les injections de charbon se composent d'une série de variantes modulaires, assemblées spécifiquement par les adopteurs en fonction de leurs préférences. Les usines utilisent des systèmes de broyage, de stockage, de contrôle, de distribution différents. Tout se passe comme si pour chaque fonction (broyage, distribution, injection) les adopteurs avaient le choix entre un catalogue de modules à 'customiser'. Chacun des modules est relativement bien identifié et stabilisé, simplement, l'offre demeure multiple. L'entreprise Paul Würth, principal fournisseur d'installation à ce jour, propose différentes variantes, différentes solutions techniques: distribution pneumatique ou mécano-pneumatique avec vanne ou striction, module à trois ou quatre silos, contrôle du débit global ou par ligne etc.

L'une des pistes d'interprétation de ce phénomène a trait à la question de l'*appropriation*. Dans un cas comme celui du DC-3, ou de la Ford T, une firme particulière a réussi à imposer son design à partir d'un succès commercial de son produit. Le design dominant réussit à capter les forces du marché, externalités de réseau et rendements croissants d'adoption, en s'appuyant sur un dénominateur commun aux différentes demandes. Les injections de charbon ont en commun d'utiliser le charbon comme combustible. Cela leur permet de bénéficier des effets du prix relatif de cette matière. Les caractéristiques de l'objet technique peuvent varier en fonction d'arbitrages à réaliser entre coût de l'investissement,

fiabilité de l'ensemble, précision de la répartition et mécanisme de contrôle. Mais toutes exploitent cet avantage.

La variété des designs d'injection de charbon observables est expliquée, par les experts d'aujourd'hui, par la relative simplicité technologique. Certains experts notent ainsi qu'aucune entreprise n'a pu réellement imposer son design, du fait que la technologie est relativement simple: *“on est pas allé loin dans la standardisation car c'est techniquement simple”* (²²⁶). A la limite chaque firme possédant une certaine capacité d'ingénierie a eu la possibilité de construire son propre système d'injection: *“la plupart des gens se sont montés leur base dans le monde”* (²²⁷). Plusieurs firmes se sont trouvées en mesure de s'approprier cette technologie, sans violer outrageusement le droit de la propriété intellectuelle, en créant des variantes technologiques. A l'inverse, on peut citer le cas des aciéries à l'oxygène, considérées comme nettement plus complexes techniquement, cas dans lequel les tribunaux internationaux ont eu à mettre un terme à certaines pratiques d'imitation. Parce que les bases de connaissances dans lesquelles puisent la technologie d'injection de charbon sont des bases communes, l'appropriation de la technologie par la création d'un design spécifique a été rendue délicate.

Une seconde ligne d'explication tient à la nature des savoirs et des incertitudes relatifs à la technologie d'injection de charbon. Contrairement au cas du fuel, il n'existe pas d'accord sur les lois régissant l'optimisation du procédé d'injection de charbon *“on a pas encore stabilisé... chacun a sa petite idée...() mais on ne sait toujours pas..il existe 10 dessins de base possibles”* (²²⁸). L'aspect technique du transport, du broyage, de la distribution semblent désormais bien maîtrisés - 'c'est pas compliqué' -, mais l'optimisation du procédé d'injection forme un sujet d'interrogation. Cette incertitude tient donc aux savoir-faire technologiques, aux réglages pratiques de l'injection, aux petits détails qui semblent interdire à certains hauts fourneaux d'injecter des quantités de charbon de l'ordre de 180 kg/t alors que d'autres ont déjà passé l'étape des 200 kg/t: les brevets protègent ainsi des savoir-faire plus que des idées *“ce sont des brevets de savoir faire technologique plus que des brevets protégeant des idées, ils touchent aux know how de mise en oeuvre”* de l'injection (ibid). Par conséquent, un arbitrage existe entre une stratégie consistant à concevoir son installation, et une stratégie d'acquisition sur le marché. L'intérêt de l'acquisition est que ça marche: *“tout calcul fait, c'est intéressant d'acheter du tout fait qui marche plutôt que de partir à zéro.”* (ibid.).

²²⁶ la question de la complexité de la technologie s'avère extrêmement importante dans la détermination du degré de standardisation. Posons à titre de réflexion que cette complexité entretient des relations étroites avec (a) l'état de l'espace technologique (b) la question des compétences et des savoir. La complexité n'a pas de sens en soi. La complexité introduit un point de vue comparatif et dépend étroitement de la rareté des compétences susceptibles de prendre en charge la question.

²²⁷ Entretien Direction Fonte, Association Technique de la Sidérurgie, Paris, janvier 1997.

²²⁸ Entretien Direction Fonte, Association Techniques de la sidérurgie, Paris, janvier 1997.

Pour clore ce premier chapitre, il paraît intéressant de présenter la position de Cohendet et ses collègues qui consacrent un article à la description de l'émergence d'un nouveau paradigme du développement technologique (Cohendet et Alii 1991). Cohendet et Alii inscrivent le débat dans un cadre plus large, portant sur l'émergence de nouveaux modes de compétition technologique. Les auteurs défendent l'idée que dans le nouveau paradigme, en voie d'émergence, la domination du marché par un standard unique sera de moins en moins possible. Selon eux, on s'oriente vers la constitution de listes de technologies modulaires stabilisées rendues disponibles aux adopteurs -économie de variété-. Ainsi, prenons l'exemple de l'habitacle des automobiles. Abernathy nous montre que l'acier a supplanté le bois et l'a éliminé. Ce mécanisme d'exclusion totale semble voué à disparaître. Aujourd'hui, il existe une compétition qui se calcule plutôt en part de marché, en degré de participation à la composition hybride de l'habitacle. La compétition se déplace donc dans ce nouveau paradigme, d'une compétition entre firmes, au sein d'une même industrie, à une compétition dans laquelle les concurrents offrant des alternatives technologiques se situent transversalement dans plusieurs secteurs industriels.

La création d'innovation nécessite souvent la mise en relation de savoir technologiques traditionnellement séparés (*'technology fusion'* Kodama 1991). Ainsi, le haillon composite de la Bx Citroën, très innovateur et économique a nécessité la coopération de PSA, Billion équipement, Rhône Poulenc, Vetrotex fibre: *"These and many other example demonstrate that wide varieties of disciplines and skills can be assembled for such projects. Although the principle is by no means new, the proliferation of such co-operation agreements certainly represents a new phenomenon"* (Cohendet et Alii 1991, p. 383). Quel est donc la nature des savoir technologiques générés dans ce cas (bien public, bien privé, collectif)? Quels sont les mécanismes incitatifs qui motivent la création de connaissances partagées, à la formation d'externalités de réseau? *"Appropriability, already a problem within a firm, was manageable, intra-firm, because, as long as profits increased, the firm could pursue a simple objective as a coherent unit"* (Cohendet et alii 1991, p. 384).

La question de la standardisation n'est elle plus pertinente dans le nouveau paradigme compétitif? Nous défendons l'idée que la standardisation constitue plus que jamais un élément essentiel dans ce monde en émergence: les questions de la stabilisation, de la simplification, de la reproduction valent autant pour les nouveaux matériaux que pour les anciens. Les modalités de la capitalisation peuvent changer, le besoin de capitaliser demeure. Le concept de standardisation doit cependant être considérablement modifié, par rapport à la définition arthurienne, et il est nécessaire en particulier d'abandonner son caractère de mécanique absolue et totalement irréversible. Un nouvel ancrage empirique

doit être recherché. Le relâchement du caractère rigide de la standardisation contribue à inscrire celle-ci dans le cadre plus large des processus d'innovation: *“One important point to emerge from this account of an emergent technological paradigm, is that standardisation of behaviour may go well beyond what is normally discussed under the rubric of standards. De facto and de jure standards are particularly visible instances of more general processes of standardisation that continually unfold in the course of economic development. Beyond formally standardised rules of behaviour and characteristics of products and processes, there are phenomena which bring uniformity to the ‘common sense’ expectations and rules of thumb of scientists, engineers, R&D managers, and other innovators.* “ (Metcalfe, Miles 1994, p. 259 souligné par nous). Dans la suite, nous parlerons donc plus volontiers de degré de standardisation, conçu comme un certain état de stabilisation des relations entre les éléments hétérogènes qui composent une innovation technologique donnée. Une solution technique se définira par un arbitrage entre des caractéristiques standardisées et des caractéristiques variables.

Toute une série de travaux récents, en économie de la standardisation, ont ouvert des perspectives de dépassement du cadre arthurien. Ces réflexions mettent davantage l'accent sur le rôle des acteurs (David 1985, Antonelli 1994), et sur la question du marché et de sa construction (David 1992, David et Foray 1994). Le cas PCI nous invite à ‘descendre d'un cran’ en généralité, au prix, bien entendu, d'une portée plus limitée du discours, mais au bénéfice d'une analyse vivante et dynamique de l'économie, et de la technologie en train de se construire. C'est cette orientation que nous avons suivie dans les deux dernières parties de cette thèse. Nous y présentons une nouvelle analyse focalisée sur le cas des injections de charbon, à partir d'un point de vue profondément renouvelé, qui place l'accent sur les acteurs et leurs échanges comme moteur principal de construction des phénomènes économiques.

Partie II:
Au cœur de la trajectoire technologique (1) :
Espaces d'innovation, apprentissages localisés,
investissements innovatifs et création technologique

“How do objects, artifacts, and technical practices come to be stabilized ? And why do they take the shape or form they do?” (John Law, 1987, p.111²²⁹).

Changement de perspective, vers une approche microéconomique de l'innovation et de la standardisation

²²⁹ Law, J. (1987), “Technology and Heterogeneous Engineering: The Case of Portuguese Expansion” in, Bijker, Hughes, Pinch, op cit. p.111.

(²³⁰) “ *We will never know until we look beneath the obvious*” (Strauss & Corbin, Basics of Qualitative Research

Nous avons choisi d’entamer cette introduction en dénonçant, avec Strauss et Corbin, les dangers de l’évidence, et l’obscurcissement qui en résulte le plus souvent. Il paraît incontestable que la technologie possède un caractère cumulatif et manifeste une série d’interdépendances géographiques et temporelles. Le terme même de technologie, ne peut se comprendre que comme l’évocation d’une cohérence durable et générale.

Le chapitre premier a contribué à informer ce point de vue d’une façon que nous espérons convaincante. Nous y avons développé une perspective globale sur la technologie et son évolution à long terme, prenant place au sein d’espaces technologiques, et structurée par des trajectoires technologiques. Les travaux néo-schumpétériens (Nelson et Winter 1977, 1982, Dosi 1982, 1988, 1992) se trouvent au centre de cette théorisation cyclique et trajectorielle du développement. Par ce biais, ce courant de pensée est l’un des premiers à avoir proposé une théorie dynamique du développement économique conciliant une analyse micro-économique de l’accumulation et son ancrage au sein de territoires économiques : laboratoire de R/D, firme, région, industrie, nation, monde (Nelson et Winter 1982, Pavitt 1984, Dosi et Alii 1988, Nelson et Rosenberg 1993). Le concept de trajectoire technologique complété par les mécanismes de sélection – dépendance du sentier (David 1985, Arthur 1988, Dosi et Metcalfe 1991) – et d’apprentissage cumulatif (Nelson et Winter 1982, Pavitt 1984, Dosi 1988) ont permis d’offrir un cadre cohérent pour décrire le développement économique et pour expliquer son inscription localisée et hétérogène au sein de territoires (Nelson 1990, Nelson et Rosenberg 1993).

Imaginons maintenant un étudiant ayant raisonnablement assimilé les enseignements des travaux économiques menés depuis les années 50 sur la question du changement technique. Transportons l’étudiant en question de l’amphithéâtre où il prend ses cours jusqu’au cœur d’une entreprise, où il pourrait à loisir observer le déroulement d’un projet d’innovation en cours. Il est fort probable qu’il subira un choc relativement important et qu’il cherche désespérément les signes d’un progrès technique cumulatif. Il concevra sans doute un sentiment de grande confusion, un sentiment de singularité et d’ambiguïté des événements (March 1988 ²³¹). S’il est observateur, il sera envahi par la multiplicité, le caractère ponctuel, le foisonnement de signes qui apparaîtront sous ses yeux. Il sera le témoin de conflits et de tâtonnements caractéristiques de l’univers de la conception : “*Someone from development thinks that if one out of 100 is good, that is a clear sign for going ahead. Someone from production thinks that if one out of 100 is not good, we ve got to start all over*” (²³²). S’il reste un peu plus longtemps et s’intéresse au

²³⁰ Strauss A., Corbin, J. (1990) *Basics of Qualitative Research. Grounded Theory Procedures and Techniques*. SAGE Pub. P. 76.

²³¹ March, J. (1988) *Decisions and Organisations*. Oxford UP.

²³² Imai, K., Nonaka, I., Takeuchi, H. (1985) “Managing the New Product Development Process: How Japanese Companies Learn and Unlearn” in: Clark, K., Hayes, R., Lorenz, C. *The Uneasy Alliance. Managing the Productivity-Technology Dilemma*. HBS

projet d'innovation, un second phénomène s'imposera radicalement à lui au fur et à mesure qu'il progressera dans l'élaboration du sens de l'innovation : l'incertitude radicale du processus. Pas une bonne et rassurante incertitude causale (incomplétude de l'information) et identifiable à laquelle on peut remédier aisément, non, une incertitude irréductible, imbriquée dans l'univers de l'innovation. La multiplicité des interprétations possibles (Bijker 1992), l'imprévisibilité et l'ambiguïté des directions suivies (Law et Callon 1992), les questions restées sans réponses, et par-dessus tout, la question inclassable du succès ou de l'échec du projet formeront la base de sa nouvelle expérience. Il sera passé du monde confortable des évidences à l'univers étrange du 'progrès' en train de se faire. Et dans le monde instable des innovations en train de se faire, le caractère continu et cumulatif de la technologie paraît tout sauf évident.

La périphrase précédente éclaire la nature de l'écart existant entre les phénomènes micro-économiques de création et de diffusion de technologie et les représentations synthétiques qui en sont faites en économie du changement technique. La trajectoire technologique procède de sa propre logique, elle déroule un potentiel marqué par une forte cohérence et par la continuité. La trajectoire technologique n'est, si on n'en explicite pas les fondements micro-économiques, qu'un artifice, une illusion d'optique liée à un point de vue comprimant le temps et l'espace, gommant le travail des acteurs de l'innovation et l'incertitude fondamentale dans laquelle celui-ci se déroule, et simplifiant les dynamiques en ne s'intéressant qu'à leurs résultats institués. Du fait de leur caractère agrégé et ex-post, les approches trajectorielles de la technologie offrent de bonnes synthèses relativement aux champs technologiques étudiés, mais elles le font au détriment d'une compréhension de la création technologique et de ses modalités, et en négligeant les questions posées par la diffusion des innovations. En nous approchant plus près des phénomènes en jeu dans l'espace des hauts fourneaux à injection, nous allons constater qu'une trajectoire, comme celle de l'injection de charbon au haut fourneau, qui paraissait de prime abord unifiée et lisse est en fait composée d'une multitude d'innovations élémentaires plus ou moins hétérogènes. La trajectoire va se révéler n'être que la partie visible à l'analyste ou à l'expert à partir de leur point de vue agrégé, l'apparence faussement tranquille d'un entrelacs de processus désordonnés formant une dynamique innovatrice débordante et complexe, composée d'une multitude d'essais et d'expérimentations diverses dont la plupart sont rendues d'autant plus invisibles qu'elles aboutissent à l'échec et ne sont pas inscrites dans les grands livres de l'histoire technologique.

Les deux dernières parties de la thèse cherchent à donner un contenu à la notion de trajectoire technologique. Elles sont organisées autour de deux questions principales : la question de la création technologique – pourquoi et comment une innovation technologique voit le jour à un certain moment, en

Press. Citation tirée d'un entretien mené avec l'un des membres de l'équipe Canon ayant développé le premier appareil 'compact' (Auto Boy).

un certain lieu, et sous une certaine forme- et la question de la diffusion technologique – pourquoi et comment une innovation inscrite dans un contexte local spécifique déborde ce contexte et se généralise à l'économie dans son ensemble -. Pour ce faire nous nous sommes intéressés aux phénomènes élémentaires de la création technologique, et au rapport qu'ils entretiennent avec le développement technologique plus global. De manière à éclaircir les relations entre innovations élémentaires et espace technologique constitué autour de trajectoires, nous allons plonger, dans la seconde partie de cette thèse, dans le détail de deux processus de création et de diffusion technologique dont nous allons pouvoir suivre les circonvolutions sur une période d'une quinzaine d'années. Nous étudierons analytiquement les processus de diffusion de ces innovations singulières et leur inscription au sein d'un espace technologique concurrentiel dans la troisième et dernière partie de cette thèse. La comparaison reposera sur la description de deux processus de création et de diffusion de la technologie d'injection de charbon au sein de deux entreprises sidérurgiques, l'une française et l'autre japonaise, formant un véritable cas d'école, les deux processus s'étant déroulés symétriquement, au même moment.

L'ensemble de ces développements nous a incité à proposer la formulation d'un modèle conceptuel susceptible de décrire les processus de création et de diffusion technologique à partir d'une analyse des phénomènes micro-économiques qui s'y jouent.

Présentation de la partie II

La seconde partie de cette thèse se compose de trois chapitres.

Le premier chapitre sera l'occasion de mettre en question l'hypothèse de continuité technologique, en montrant que la création technologique, considérée comme la source élémentaire de la technologie, prend appui sur un processus *d'apprentissage localisé*, organisé autour de la production d'un nouvel objet technique, d'une nouvelle fonction de production. En conséquence, les innovations sont profondément marquées par les contextes locaux dans lesquels elles voient le jour (Callon 1986, Callon et Law 1989, Latour 1989). La forme prise par la technologie est profondément et durablement marquée par le contexte local dans lequel elle a émergé : un exemple célèbre développé par David concerne la forme QWERTY durablement revêtue par les claviers américains (David 1985).

Cela implique de questionner la naturalité de la continuité et de la cumulativité de la technologie : la création technologique voit le jour en relation avec un territoire économique. Elle s'articule à une fonction de production (Gaffard 1990). La technologie n'est en aucun cas une variable autonome, affranchie de toute dimension sociale, économique et institutionnelle (Carlsson et Jacobsson 1992,

Dahmen 1989, Carlsson 1995, Lundvall 1993, Freeman 1988). La mise en évidence de la spécificité des apprentissages localisés est liée au développement, dans les années 80, de la théorie de la firme et de l'organisation. Le point d'ancrage de la firme comme lieu pertinent des processus d'innovation a tenu à l'affirmation que la technologie n'est pas mû par un mouvement indéfini, fut-il impulsé par une dynamique d'adoption fortement incitative, mais repose sur les innovations générées par des entreprises. L'innovation qu'elle soit de produit ou de procédé constitue le moteur essentiel des apprentissages localisés.

L'ensemble de ces avancées théoriques nous amènerons à revisiter le concept de *trajectoire technologique*. Si les innovations forment des apprentissages localisés et spécifiques, fortement dépendantes des contextes divers dans lesquels elles voient le jour, la trajectoire technologique est alors composée d'une multitude de points élémentaires dont la continuité et la cohérence ne sont pas automatique. Le concept de '*technologie vivante*' (Zuscovitch et Willinger 1993) nous amènera à considérer que la tension entre continuité et discontinuité se joue autour de l'objet technique. Chaque processus d'innovation pose alors le dilemme essentiel des frontières entre continuité et discontinuité technologique et rouvre la question de la cumulativité et de ses modalités.

Le second chapitre est consacré à la formulation d'un modèle conceptuel permettant de décrire, d'analyser et de comprendre comment la question de la continuité technologique se règle, et au-delà le rapport entre contexte local et contexte global de l'innovation. Nous nous risquons donc à un essai de formalisation d'une théorie de la création technologique dans laquelle les acteurs définissent et négocient les frontières de la continuité et de la discontinuité. Pour ce faire, nous nous sommes attachés à restituer les conditions localisées de temps et d'espace au sein desquelles l'innovation se développe. Nous proposons d'analyser la dynamique des processus de création technologique à partir de trois moments clés : la problématisation, l'engagement, et la mise en projet.

Le concept d'*espace d'innovation* s'efforce de saisir les conditions spécifiques de production de l'innovation. Ce cadre d'action s'articule autour d'une double logique, l'une processuelle, liée à la formulation spécifique d'un problème, la seconde organisationnelle, liée à la mobilisation d'une série de ressources appartenant à des réseaux existants. La collision de ces deux logiques se cristallise autour de l'engagement pris entre acteurs de contexte et acteurs de l'innovation. Dans le cadre ainsi défini, prend place un processus d'investissement innovatif. Ce processus permet la production d'un objet technique doté d'une cohérence forte, à partir de la mise en relation d'éléments hétérogènes. L'investissement vise à stabiliser les relations entre les éléments en s'efforçant de définir leurs conditions de production et d'utilisation.

Notre troisième chapitre sera consacrée à l'étude comparative de deux processus d'innovation d'injection de charbon au haut fourneau. Armés d'un outillage conceptuel adéquat, nous serons en mesure de comparer les processus d'innovation tels qu'ils sont intervenus simultanément au sein de deux entreprises concurrentes, une française et l'autre japonaise. Les deux firmes sont à la fois productrices et adoptrices de la technologie, ce qui constitue une illustration assez marquante de la thèse de la firme productrice de son environnement présentée par Amendola et Gaffard (Amendola et Gaffard, 1986). Nous pourrions alors argumenter sur l'existence, la pertinence, et les enjeux représentés par les apprentissages localisés dans les processus d'innovation ayant pris place au sein des firmes. Nous démontrerons ainsi que les situations d'innovation constituent les lieux privilégiés et singuliers dans lesquels sont mises en jeu les continuités et les discontinuités technologiques. En fonction de la formation de l'espace d'innovation et de sa dynamique d'investissement, la question de la continuité technologique a été arbitrée de manière très différente d'une firme à l'autre. Pour une même technologie, les stratégies des firmes ont radicalement différencié, ouvrant la voie à une compétition fondée sur des modes d'apprentissages spécifiques. La production d'une première 'installation industrielle' marque une étape fondamentale à partir de laquelle les mécanismes de généralisation et de mise en commun des apprentissages deviennent possibles. Mais c'est là une autre histoire, et elle nous amènera à notre troisième partie.

Chapitre 1 : **La continuité technologique en question**

“Technologies do not compare in the literal sense. Only firms compete, and they do so as decision-making organizations articulating a technology to achieve specific objectives within a specific environment . The outcome of their decisions is precisely what determines the economic significance of rival technologies and how this changes over time” (Metcalf, 1988, p. 568).

La tension entre ordre et désordre au cœur des processus d'innovation

Il est bon de rappeler le point précis d'où nous sommes partis : *“The kernel of the problem posed for private and public decision-making with regard to the setting of technology standards may be construed to be nothing more and nothing less than the fundamental issue with which all social organizations are confronted: where to position themselves on the terrain between the poles of ‘order’*

and 'freedom'” (David, 1995, p. 18). Notre première exploration de ce paradoxe, centrée autour du concept de trajectoire technologique, nous a amené à concevoir cette dernière comme l’expression d’une tension paradoxale entre deux ‘forces’, l’une créatrice de variété technologique, et l’autre sélective et favorable à la cumulativité technologique. Reformulée à partir de notre nouveau point de vue, cette interprétation présente une difficulté qui peut alors se résumer ainsi : cette vision des choses prend la définition de l’ordre et du désordre, de la continuité et de la discontinuité pour acquise. Nous proposons au lecteur dans ce qui suit de prendre la peine de regarder cette question de plus près, en plongeant au cœur des mécanismes de définition de la continuité et de la discontinuité, au sein des processus micro-économique, au fondement du développement technologique. La question centrale de la continuité/discontinuité, représente le second volet de notre reformulation du paradoxe de David : comment se tracent les frontières de la continuité et de la discontinuité en matière technologique ?

Dans un domaine aussi diversifié et spécialisé que l’économie de l’innovation et du changement technologique, les frontières entre théorie standard, théorie standard étendue, théorie standard expérimentale et théorie non standard (Favereau 1989²³³) semblent perdre une partie de leur validité. Les oppositions conceptuelles classiques entre généricité/ spécificité (Williamson 1981²³⁴), endogénéité/exogénéité (Rosenberg 1982) et réversibilité/ irréversibilité (Boyer et Al. 1991) permettent de rendre compte d’un débat fondamental sur la nature de la cumulativité technologique, elle même au cœur de la question du ‘progrès technique’, de la croissance économique, et finalement de la ‘richesse des nations’ (Smith 1776 ; Foray & Freeman 1992). La question centrale concerne la nature de la dynamique technologique et de ses sources.

Les thèses présentées dans la première partie de cette thèse n’occupent pas une position unique dans l’espace défini par ces trois axes d’opposition conceptuelle. Pourtant, elles partagent un postulat commun : celui de la généricité de la technologie - au fondement du cycle cumulatif -. Expliquons-nous sur ce point : les modèles de cumulativité technologique de la première partie partagent l’hypothèse que la technologie est un bien relativement indépendant des contextes dans lesquels elle voit le jour, des entreprises singulières qui les produisent et de celles singulières également qui les utilisent. Elles se situent d’emblée à un méta-point-de-vue, celui d’une technologie apatride, rendue indépendante des contextes et des territoires où elle émerge et de ceux où elle s’inscrit. La technologie semble mue par sa propre logique, répondant à une dynamique autonome, externe par rapport au tissu économique, au sens

²³³ Favereau, O. (1989a) “Vers un calcul économique organisationnel” in: Revue d’Economie Politique, Vol 99, n°2, mars -avril 1989, pp. 322-354.

²³⁴ Williamson, O. (1981) “The Economics of Organizations: The Transaction Cost Approach” in: American Journal of Sociology, Vol 87, pp. 548-577.

où elle n'a ni lieu de création, ni lieux d'inscription. Dans ces conditions, l'analyse du développement technologique s'interdit de comprendre les mécanismes insufflant une dynamique de développement.

La première partie ne nous parle pas des *processus d'innovation*. En ouvrant la boîte noire de la technologie, Rosenberg a fermé celle de l'innovation. Que les trajectoires technologiques soient déterminées par des paradigmes, ou des dynamiques d'adoption, ou encore par des mécanismes de diffusion, le résultat paradoxal demeure identique: la cumulativité s'impose automatiquement aux innovations individuelles, indépendamment des contextes de leur production. Sahal a parfaitement montré (Sahal 1985) que lorsque l'on extrait les objets techniques de leurs contextes pour les comparer, il apparaît que ces objets, bien que produits en différents lieux et dans différents contextes locaux, partagent un certain nombre de caractéristiques et tendent à approfondir certaines voies. Reste que cette vision toute aussi frappante que séduisante ignore nécessairement les limites et les conditions de construction de cette cumulativité, inscrite dans la nature des choses. Un véritable débat traverse ainsi l'économie du changement technique et de l'innovation, partagée sur la question de la continuité- discontinuité. Des auteurs comme Nelson et Winter (1982), Abernathy (1978), Rosenberg (1982) soulignent volontiers que les innovations considérées comme majeures ont le plus souvent consisté en un assemblage ingénieux d'éléments préexistants. D'un autre côté, d'autres auteurs soulignent avec raison que si les innovations n'étaient qu'un prolongement continu du passé, elles perdraient leur caractère d'innovation ou de création (Gaffard 1990): l'innovation suppose la discontinuité. Nous nous efforçons dans cette thèse de proposer une tentative de dépassement de ce débat en rendant aux acteurs leurs prérogatives : en pratique ce sont eux et non les analystes qui sont confrontés à la radicalité de la question de la continuité –discontinuité, et nous allons montrer que cette question marque profondément l'activité de création technologique.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter une série de travaux ayant proposé une critique de l'hypothèse de continuité technologique. Il nous semble essentiel d'aller au delà de la démonstration morphologique de la cumulativité, et de préciser analytiquement à la fois ses conditions et ses limites. Les processus d'innovation sont supposés être cumulatifs et capitaliser les uns sur les autres. Ne s'agit il pas là d'un renversement théorique discutable? Les trajectoires ne sont elles pas le résultat agrégé d'une série d'innovations? C'est le long de cette ligne d'hypothèses que se situe la frontière d'un débat essentiel, la ligne de tension fondamentale entre théories de l'innovation et théories du changement technique.

Dans le chapitre qui suit, nous allons évoquer les fondements d'une théorie micro-économique de l'innovation. Cela signifie à la fois que l'innovation y sera considérée comme le mécanisme élémentaire de création de technologie, que la technologie n'est pas considérée comme une variable exogène dont on

ne s'intéresserait qu'aux effets, mais comme une variable endogène, produite par les acteurs économiques et à ce titre justiciable d'une analyse économique, que celle-ci n'est pas autonome mais émerge au sein de contextes locaux et s'inscrit dans des contextes locaux, que l'entreprise forme l'un des substrat économique essentiels dans lequel l'innovation est produite. Dans la suite de ce travail, nous proposons donc au lecteur d'explorer la question qui nous a animé jusqu'à présent, celle des dispositifs permettant l'accumulation technologique, à partir d'un point de vue radicalement nouveau, intégrant les processus d'innovation. Au lieu de considérer la continuité technologique comme une donnée, un phénomène externe s'imposant aux innovations ponctuelles, nous allons en chercher les traces au cœur mêmes des processus de création technologique : la tension entre continuité et discontinuité, entre ordre et désordre se posera comme une forme d'arbitrage auquel sont confrontés les acteurs de l'innovation. Cet arbitrage donne donc lieu à la mise en place de dispositifs de régulation dont nous étudierons différentes modalités. Il ne s'agit pas de rejeter ou d'invalidier les enseignements nombreux tirés des analyses présentées jusqu'ici, et dont nous espérons avoir montré la pertinence dans une approche globale de la technologie. Mais il nous semble essentiel d'aller plus loin, et pour cela de descendre en généralité vers des phénomènes micro-économiques qui jusqu'à présent n'ont pas été considérés sérieusement.

On pourra aisément nous rétorquer, et avec juste raison, qu'il n'est pas indispensable de connaître les détails des processus d'innovation individuels pour repérer une trajectoire technologique. Les travaux de Rosenberg, d'Arthur, de Dosi et de Nelson et Winter ont brillamment illustré tout le profit qu'il est possible de tirer d'une approche globale de la technologie négligeant les détails de l'innovation, les *petits événements* à l'origine du caractère stochastique des trajectoires. L'analyse est simplifiée et purifiée lorsque l'on s'en tient à un point de vue global sur la trajectoire. Pourquoi alors volontairement compliquer l'analyse et entrer dans les détails d'innovations élémentaires complexes ?

Nous avançons néanmoins que l'obscurcissement des processus d'innovation fait peser une hypothèse forte sur la compréhension du développement technologique, et empêche l'approfondissement, et la découverte des dispositifs opérationnels à l'origine de la cumulativité. En particulier, ainsi que l'on montré Amendola et Gaffard (1988) l'adoption d'un point de vue global postulant la continuité technologique suppose de renoncer à l'analyse de la création technologique. Nous proposons de substituer l'investigation aux hypothèses, l'étude aux certitudes. Si l'on s'intéresse aux dispositifs d'articulation de l'ordre et du désordre, aux phénomènes de création de diversité et aux mécanismes de sélection qui se mettent en place, il n'est plus possible de se satisfaire d'hypothèses sur les phénomènes d'innovation. Il est certes intéressant de suggérer que l'équipe Ford a procédé à des assemblages, de nouvelles combinaisons partant des meilleures inventions de la concurrence. On peut intuitivement supposer qu'elle

a été influencée par la formation mécanique commune et par la base de savoir partagée avec les autres ingénieurs et techniciens de l'industrie automobile naissante. On peut déduire d'un grand schéma théorique que la diffusion très large du modèle a permis aux ingénieurs de faire évoluer le modèle et de bénéficier de rendements d'échelle croissant. Mais tant que l'on n'ouvre pas la boîte noire de l'innovation, tant que l'on ne va pas vérifier dans les faits, rien ne nous dit ce qui s'est effectivement passé, ni comment l'équipe Ford a effectivement travaillé, ni quels ont été les ingrédients qui ont forgé la Ford T et son succès. Les connaissances générées de cette façon sont ainsi structurellement hypothétiques, en ce qui concerne la question de la création technologique : pourquoi et comment une innovation naît à un certain moment, à un certain endroit, et sous une certaine forme ?

I.A Technologie vivante et apprentissage localisé

La question du développement économique, ou selon les termes d'Adam Smith du fondement de la richesse des nations est indissociable du développement de l'économie comme discipline scientifique autonome, et il n'est pas étonnant de constater qu'elle s'est, d'une certaine manière, posée de façon toujours renouvelée au fur et à mesure que les économistes y apportaient des éclairages nouveaux. La réponse d'Adam Smith lui même, prolongée ensuite par les théories économiques de la firme, a été résolument moderne, en ce qu'elle a consisté à ancrer, par rapport à celle des physiocrates, l'économie dans une fonction de production organisée en étroite relation avec l'extension du marché.

Le concept de district avancé par Marshall poussait le raisonnement en dotant le territoire d'une fonction de production élargie comprenant, outre l'accumulation collective de moyens de production, une théorie de la valorisation fondée sur la qualité des liens tissés entre les différents acteurs économiques (Rallet et Torre 1995).

Le parti pris épistémologique de l'économie de l'innovation peut être compris comme l'attribution d'une place centrale à la création technologique et à ses modalités d'accumulation, dans l'articulation des liens entre acteurs économiques et dans la formation de la fonction de production (Zuscovitch 1985, Atkinson et Stiglitz 1969, Gaffard 1990). L'innovation n'est alors pas autonome mais toujours inscrite au sein d'un territoire économique qui lui donne sa forme et sa valeur : elle émerge et fonctionne au sein de contextes spécifiques. Le concept de technologie vivante avancé par Zuscovitch et Willinger (Zuscovitch et Willinger 1993) marque l'importance de cette inscription. Elle souligne que tout objet technique cristallise un certain arbitrage entre continuité et discontinuité, entre conditions locales de production et d'utilisation et espace technologique. En ce sens, toute création technologique s'articule autour d'un processus d'apprentissage localisé matérialisé dans la production d'un objet technique. Elle implique la modification de la fonction de production du territoire dans lequel elle s'inscrit et qui lui donne son efficacité.

C'est à partir de cette grille de lecture que nous allons aborder une littérature insistant sur le caractère spécifique et localisé de la création technologique. Ce mouvement de recherche s'est intéressé en priorité à la firme, comme théâtre privilégié des processus élémentaires de création de technologie. Nous reprendrons pour l'essentiel cette position, bien que, comme nous l'envisagerons dans la troisième partie de cette thèse, le territoire économique d'émergence et d'inscription des innovations ne soit pas nécessairement limité à la firme et à son laboratoire de R/D (Dahmen 1989, Carlsson 1995). Nous allons d'abord évoquer les fondements théoriques de la spécificité technologique – comprise comme l'inscription locale de la technologie dans un territoire –, à partir de la présentation des théories de la firme innovatrice. Nous en déduisons que l'innovation ne peut être considérée comme une variable autonome, indépendante de ses contextes de production. Nous présenterons ensuite la littérature, et en particulier le travail d'Amendola et Gaffard qui se sont intéressés à une théorisation de la création technologique comme processus d'apprentissage localisé. Les auteurs offrent donc un cadre analytique à partir duquel il devient possible d'analyser les processus singuliers de création de technologie et leur inscription dans une fonction de production.

1) Spécificité technologique et théorie de la firme innovatrice

“One can not study the computer industry sensitively without paying attention to the peculiarities of IBM” (Nelson 1990)

Dans nombre de textes présentés jusqu'ici, il existe une ambiguïté certaine dans le type de phénomènes décrits sous le terme générique de 'technologie': s'agit il de phénomènes industriels, relatifs à la compétition entre plusieurs voies technologiques promues par différentes firmes, ou de processus

d'innovation, prenant place au sein d'une firme donnée, firme à laquelle plusieurs voies technologiques sont ouvertes? Nous avons volontiers accepté cette ambiguïté, dans la mesure où nous considérons primordialement la question du développement technologique à partir d'un point de vue global structuré autour de trajectoires. Mais à partir d'ici, nous allons nous trouver en demeure de distinguer scrupuleusement ces différents niveaux de réalité.

Nous avons étudié l'émergence aux Etats Unis du début du siècle d'une industrie radicalement nouvelle, prenant en charge d'une façon originale la question du transport des personnes, l'industrie automobile. Nous avons considéré comme un tout cohérent les évolutions connues par "l'automobile", laquelle s'est transformée sous nos yeux, en intégrant d'abord un moteur à explosion à essence, un châssis comprenant des arbres de transmission et positionné relativement bas, un volant se décalant sur la gauche, un habitacle fermé composé en acier, des phares venus orner la carrosserie, un confort intérieur amélioré. Tous ces éléments se sont agencés et fixés sous nos yeux dans le récit convainquant d'Abernathy, comme dans un film tourné en accéléré décrivant la lente métamorphose de quelque espèce animale, ou la croissance de quelque plante. Ce point de vue est fascinant et synthétique. Mais à un certain degré, il est radicalement biaisé car il construit de la cohérence là où les acteurs de l'époque ont certainement perçu de l'incohérence, il construit de la linéarité, là où les acteurs de l'époque se sont probablement trouvés confrontés à des virages technologiques radicaux, il construit un consensus, là où de nombreuses controverses ont inmanquablement éclatées. Abernathy est l'auteur d'une histoire relatant du point de vue des gagnants, une fois que la compétition a joué son rôle sélectif, une histoire 'agrégée' de l'automobile. Mais où sont donc passés les firmes, les centaines de firmes qui ont contribué à ce tableau idéal (Thompson 1954 ²³⁵)? Où est donc passé la concurrence chère à Arthur? Et d'où sont donc venues toutes ces idées, ces innovations qu'Abernathy a habilement mises en scène?

Jusqu'ici, notre regard a suivi assez fidèlement celui du courant dominant en économie de la standardisation, largement influencé par les premiers travaux d'Arthur et de David. Cette vision diffusionniste tend à externaliser et exogénéiser l'innovation en instrumentant le concept de 'technologies'. Que sont donc ces technologies, dont Arthur nous explique qu'elles sont en compétition? Comment des technologies entrent-elles en concurrence? Le terme technologie est employé comme un masque conceptuel, une métaphore chargée de représenter une réalité complexe. Comme le note Metcalfe –citation présentée en tête de chapitre-, la compétition est avant tout une affaire d'*entreprise*, des entreprises qui conçoivent, élaborent, utilisent les technologies pour fabriquer et vendre des produits.

²³⁵ Thompson, G. (1954) "Intercompany Technical Standardization in the early American Automobile Industry" in: The Journal of Economic History, Vol XIV, Winter 1954, n°1, pp. 1-20.

Cowan (1991), s'efforçant de clarifier la position d'Arthur, souligne de son côté que les adopteurs acquièrent des *biens ou des machines* dans lesquels sont incorporés les technologies auxquelles se réfère Arthur. Lorsque l'on soulève le voile du masque conceptuel, apparaît donc la question de la firme. L'intégration de la firme dans le schéma de la standardisation invite nécessairement à en nuancer la rigidité, car, de la même manière que la diffusion ressortit d'une dynamique d'adoption, les technologies ressortissent d'une dynamique de production par des firmes en compétition. C'est ainsi et ainsi seulement que les technologies peuvent entrer en concurrence.

1.1) Vers une théorie du progrès technique endogène: théorie néo-schumpétérienne et désignation de la firme comme lieu essentiel de production de l'innovation

“Economists are interested in how the automobile industry works, and its performance in various dimensions, and not in General Motors or Toyota per se, but only insofar as the particularities of these firms influence the industry more broadly. (...) My objective in this essay is to make a strong case for the economic significance () of discretionary firm differences” Richard Nelson, *Why do firms differ, and how does it matter?* (236)

Une question a été totalement éludée dans le fil du premier chapitre: d'où vient l'innovation, la création technologique? Où prend elle place?

Dans sa *Theory of Economic Development*, Schumpeter (1934) a mis l'innovation technologique au coeur du système économique. Selon lui, l'innovation - qu'il distingue de l'invention - représente l'acte économique essentiel de mise en relation d'une idée avec un marché. Elle correspond à l'acte élémentaire de création du changement technologique, à la source du progrès technique et de la croissance économique. Où l'innovation prend elle place? Schumpeter a mis en avant le rôle de l'*entrepreneur*, devenu, dans les versions ultérieures de ses travaux, la 'firme innovatrice' (Akrich, et Alii 1988).

Depuis une quinzaine d'années environ, l'économie de la firme et l'économie de l'innovation ont réalisé d'importantes avancées mutuellement fertiles dans l'approfondissement des idées schumpétériennes. L'une des questions irritantes adressée à la théorie de la firme concernait la question de la dynamique et du changement: comme le notait Sydney Winter dans un trait d'humour *“In the past half*

century, it has been clearly demonstrated that the economy is much better at changing itself than economists are at changing their minds () But after wasting at least a third of a century by not taking ‘the nature of the firm’ seriously, the discipline now shows signs of a notable acceleration of progress. Perhaps the gap between our understanding and an increasingly complex reality is at last beginning to close”⁽²³⁷⁾⁽²³⁸⁾. D’un autre côté, il manquait aux théories de l’innovation un lieu de réconciliation entre invention et imitation. Le travail de Nelson et Winter (Nelson et Winter 1982) peut être saisi comme un effort de résolution de cette double tension. Le point essentiel de leur théorie évolutionniste a consisté à développer une théorie de la firme innovatrice. Nelson et Winter ont en effet désigné la firme comme le lieu essentiel de l’innovation, et l’innovation, comme la dynamique essentielle au fondement des performances des firmes, reformulant ainsi en des termes actualisés, les idées de Schumpeter: “In our book, *An Evolutionary Theory of Economic Change* (1982) Winter and I spent quite a bit of space presenting a ‘theory of the firm’ which is consistent with, and motivates, a schumpeterian or evolutionary theoretic view of economic process and economic change” (Nelson, 1990, p. 67). Ces avancées importantes du point de vue théorique, ont permis d’intégrer le changement comme source du développement économique et de poser l’inscription de la création technologique au sein de la firme comme la source élémentaire de progrès technique.

1.1a) Théorie de la firme innovatrice et endogénéité du progrès technique.

La question de l’*endogénéité* du progrès technique traverse le champ disciplinaire de l’économie du changement technique et de la croissance (Romer 1986). Dans l’histoire de la pensée économique, l’endogénéisation de la technologie au cœur de l’activité économique a représenté une avancée considérable, chèrement acquise. Nous considérons que ce progrès a été rendu possible dans une large mesure, par les progrès réalisés dans l’intégration d’une théorie de la firme innovatrice. Nelson et Winter (1982) ont fait partie des auteurs ayant largement œuvré à la définition d’une firme innovatrice. Les auteurs ont formulé quatre critiques essentielles à la théorie orthodoxe de la firme, l’une d’elle dénonçant le caractère exogène et statique de la technologie.

La firme de Nelson et Winter peut être décomposée en deux principales fonction, une fonction de production et une fonction d’innovation.

²³⁶ Nelson, R. (1991) “Why Do Firms Differ, and How Does It Matter?” in: *Strategic Management Journal*, Vol 12, pp. 61-74.

²³⁷ Winter, S. (1993) “On Coase, Competence and the Corporation” in: Williamson, O. (ed) *The Nature of the Firm. Origins, Evolution and Development*. Oxford UP. Pp.179-195.

²³⁸ Ménard C. (1990) *L’économie des organisations*. Ed La Découverte.

La fonction de production est “une description de l'état du savoir de la firme en matière de fabrication de produit”. Chaque firme peut ainsi être caractérisée par une fonction de production qui correspond à l'accumulation de savoirs spécifiques sous forme de compétences et de routines organisationnelles. Le caractère routinier des décisions et de l'activité sont rendus nécessaires par la complexité de la coordination des activités de production, par la rationalité limitée des individus, et par le caractère conflictuel de l'activité collective. Le fondement de la fonction de production est la reproduction et la stabilité, symbolisée par les *routines* organisationnelles.

A l'inverse, la fonction d'innovation est le lieu où sont générées de nouvelles ressources et de nouvelles routines. La fonction d'innovation représente la capacité d'évolution de la firme, et sa faculté d'adaptation à son environnement. Les processus d'innovation sont mis en œuvre dans un environnement incertain, et visent, dans une logique procédurale à construire une série de ressources dans un effort de projection vers l'avenir. Comme le soulignent Dosi et Metcalfe (1991) “*La question essentielle ne porte pas sur le mécanisme de l'optimisation mais sur la façon dont les agents construisent les univers de choix dont découlent leurs options*” (Dosi et Metcalfe 1991, p. 52). L'organe essentiel de cette fonction est le laboratoire de R&D.

Endogénéisé au sein de la firme (²³⁹), la création technologique perd son caractère abstrait: la technologie devient une ressource qui comme les matières premières, les compétences, et les règles de fonctionnement collectif est construite dans une certaine cohérence donnant lieu à des apprentissages idiosyncrasiques: “*Les investissements antérieurs d'une entreprise et son répertoire de routines (son' histoire') contraignent son comportement futur. Cela vient de ce que l'apprentissage tend à être local. C'est à dire que les opportunités d'apprentissages sont 'encloses' dans des activités antérieures et sont spécifiques des transactions et des productions effectuées*” (Dosi, Teece, Winter, 1990, p. 244 ²⁴⁰).

En conséquence, chaque processus d'innovation est spécifique à la firme dans laquelle il prend place: “*Where company strategies and associated capabilities differ significantly, their patterns of innovation are likely to differ significantly as well*” (Nelson, 1990, p. 68)(Aoki & Rosenberg 1989). Aussi, la constitution des conditions cognitives et organisationnelles favorables aux innovations nécessite des investissements, et demande du temps. “*Firms need to learn to get good at certain kinds of innovation and*

²³⁹ Aoki, M., Rosenberg, N. (1989) “The Japanese Firm as an Innovating Institution” in: Shiraishi, T., Tsuru, S. (eds) *Economic Institutions in a Dynamic Society: Search for a new Frontier*. Mc Millan. P. 137-155.

²⁴⁰ Dosi, G., Teece, D., Winter, S. (1990) “Les frontières des entreprises: vers une théorie de la cohérence de la grande entreprise” in: *Revue d'Economie Industrielle*, n°51, 1er trimestre 1990, pp. 238-254.

at the things needed to take advantage of these, and this requires concentration or at least coherency, rather than random spreading of efforts” (Nelson, 1990, p. 68).

Chaque firme diffère significativement des autres - *“Firms differ”* - en fonction des processus d’innovation qui la traverse. L’identité particulière des firmes résulte de l’histoire singulière de leurs apprentissages innovatifs: les firmes sont ce qu’elles font, ou plus exactement, ce qu’elles ont fait.

Il résulte de la mise en avant de ces deux logiques, évolutive et reproductrice, une tension profonde entre normalisation et innovation. Pour Nelson et Winter, le paradoxe de David se traduit donc au cœur de l’activité de la firme innovatrice. Un arbitrage existe au cœur de l’activité de R&D, dans la stratégie de *“search”* et de *“sélection”*, entre les décisions d’exploration et choix d’innovation. Cette tension explique la mise en place de règles de gestion des ressources: *“A good decision rule for allocating research and development resources obviously must attend both to factors on the demand side and to factors that influence the ease or cost of invention. It is no good to pick out projects that are technically exciting and doable but have no demand, or to undertake a project that if successful would have high payoff but that would have no chance for success. The question is: what kinds of decision rules have evolved that are responsive to these criteria? In the view of the great size and uneven topography of the set of all possible projects, R&D decision makers must have some simple guidelines for homing in on plausible regions. (...) Since all alternatives cannot be considered, there must be some rather mechanical procedures employed for quickly narrowing the focus to a small set of alternatives and then homing in on promising elements within that set.”* (Nelson et Winter, 1982, p. 255).

1.2) Economie des organisations et spécificité des ressources

En posant les fondements de la théorie de la firme (²⁴¹), l’économie des coûts de transaction s’est trouvée confrontée à la nécessité d’expliquer ce qui différencie les modes de coordination, en fonction des institutions considérées. Williamson, dans un article consacré à cette question (²⁴²), exprime ainsi la différence entre le marché de l’entreprise en termes de *“types de gouvernance”*, c’est à dire les modes d’incitation, de contrôle et de coordination du cadre institutionnel régissant l’exercice des contrats. Williamson propose une typologie comprenant trois axes, le degré de standardisation des produits, la spécificité des investissements productifs, et la fréquence des échanges. L’auteur estime que le marché constitue la structure institutionnelle la plus efficace lorsque les produits échangés sont très standardisés,

²⁴¹ Voir Maman, C. (1994) *“L’organisation: de l’indivision vers l’individuation en devenir d’un concept”* in: Economies et Sociétés, n°8, Décembre 1994, pp. 61-88.

quelque soit par ailleurs la fréquence des échanges. Lorsque les transactions sont occasionnelles mais que les produits requièrent des investissements spécifiques, le recours à un tiers comme arbitre de la transaction est la solution la plus efficace. L'organisation enfin correspond à la meilleure solution institutionnelle lorsque les produits nécessitent des investissements spécifiques, et que les transactions sont durables et fréquentes.

Ce modèle, très schématique, met au demeurant en évidence un point éclairant sur la question essentielle de la spécificité des actifs. L'internalisation de la fonction de production au sein de l'organisation est liée à la spécificité de sa technologie et à la régularité de son utilisation.

Aoki et Rosenberg admettent que l'innovation peut avoir plusieurs sources, dont la recherche scientifique. Mais selon eux, dans la majorité des cas, c'est au sein même de la firme qu'il faut chercher les sources de l'innovation, et que prennent place les processus d'innovation (Freeman 1994). Ainsi, pour Aoki et Rosenberg, le succès de la firme japonaise doit être recherché dans sa capacité à générer des innovations à caractère spécifique: *“New technological knowledge is produced within the individual firm. It is often a knowledge of a highly activity-specific, as well as a firm-specific nature () More generally, the firm's research agenda is powerfully shaped by the motivation to exploit the accumulated stock of in-house engineering knowledge.”* (Aoki & Rosenberg, 1989)

Williamson fournit un argument théorique permettant d'intégrer cette perspective et la question de la propriété des ressources et de son évolution au fil du développement du capitalisme (²⁴³). S'appuyant sur le cas de l'histoire industrielle britannique, Williamson montre que l'émergence de l'entreprise capitaliste, dont la propriété a été acquise par le marchand-entrepreneur, s'est accompagnée d'une spécification et d'une endogénéisation des ressources - et en particulier des ressources techniques et humaines (²⁴⁴).

L'hypothèse posée est alors qu'avec l'approfondissement de la division du travail, la spécificité technologique des firmes devient telle qu'il n'existe souvent pas sur le marché de machines et de

²⁴² Williamson, O. (1979) “Transaction Cost Economics: the Governance of Contractual relations” in: Journal of Law and Economics, n°22, pp. 3-61.

²⁴³ Williamson, O. (1980) “The Organization of Work: a Comparative Institutional Assesment” in: Journal of Economic Behavior and Organization, n°1, pp.5-38.

²⁴⁴ Ce type d'explication linéaire possède des vertues heuristiques, mais requiert l'introduction de nuances. L'effet Smith (spécialisation-intégration) n'a pas joué de la même façon dans toutes les industries, et n'est pas nécessairement stable dans le temps (voir le retour la désintégration progressive dans l'automobile par rapport à l'idéal intégratif de Ford). Pavitt fournit des éléments de discussion sur ce point Pavitt, K. (1984) “Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory” in: Research Policy, Vol 13, pp. 343-373.

compétences répondant à l'ensemble de leurs besoins technologiques. La firme utilise des ressources spécifiques, mais également est amenée à créer une large part de ces ressources. Seule la firme réunit l'ensemble des actifs et savoir spécifiques nécessaires à la création de technologie correspondant à ses besoins. Elle seule dispose des moyens financiers suffisant et des motivations pour affronter un investissement non compensable (Metcalf 1988).

Les théories néo-schumpétériennes et les théories des organisations se complètent donc pour fonder théoriquement la spécificité de la création technologique et son inscription au sein de contextes localisés. Dans ce qui suit nous allons évoquer une théorie de la création technologique comme processus d'apprentissage localisé. Celle-ci prend appui sur une théorie de la firme innovatrice. Elle propose de concevoir la singularité de chaque processus de création, et par conséquent ouvre la possibilité théorique de penser la discontinuité.

2) L'innovation comme processus d'apprentissage localisé

“L'analyse économique standard traite du progrès technique, c'est à dire de la substitution à l'ensemble des techniques existantes d'un ensemble de techniques supérieures suivant quelque critère économique de profitabilité. Une analyse économique de l'innovation, doit, en revanche, s'intéresser au processus d'élaboration progressive des technologies.” (Gaffard, 1990b, p. 329).

Le travail de Gaffard et Amendola s'intéresse de plein droit au phénomène de création technologique, conçu comme source élémentaire de la technologie. Les auteurs montrent que la création technologique peut être analysé comme un processus d'apprentissage localisé aboutissant à la transformation de la fonction de production d'une firme singulière. Dans leur travail, les auteurs défendent l'idée que la création technologique est toujours liée à un contexte local, ou *environnement*, dans lequel elle voit le jour.

2.1) localisation de l'apprentissage et construction de l'environnement innovatif

La question de la *généricité* - “*Generic means here available for use in different kinds of processes of production*” (Amendola, Gaffard, 1986, p. 475) - de la technologie a fait l'objet d'importantes réflexions en économie du changement technique et de l'innovation.

Une double proposition a été formulée à l'encontre des visions génériques de la technologie. Elle s'appuie sur le constat que les processus d'apprentissage donnant lieu à des développements technologiques sont fondamentalement *localisés*.

Premièrement, les apprentissages technologiques portent sur un objet technique précis, procédé et/ou produit, représentant un point localisé de la fonction de production globale de la firme (Atkinson et Stiglitz (1969)). L'idée centrale consiste ici à reconnaître que l'activité inventive prend rarement pour cible un vaste ensemble de procédés et de produits, mais le plus généralement, vise à la résolution d'un problème précis relatif à un élément donné du design: "*Research activity can be directed towards the improvement of any process, but once it has been carried out, the resulting knowledge is specific to one particular process*" (Atkinson et Stiglitz, 1969, p. 575). Il peut bien entendu se produire que plusieurs processus d'innovation soient mis en place en parallèle pour élaborer différents points technologiques. Cependant, chaque processus d'innovation génère des apprentissages localisés. L'usage des connaissances générées de la sorte est *spécifique*, c'est à dire lié à une contexte local (Atkinson et Stiglitz 1969). Ces différents éléments tendent à souligner que les mécanismes au fondement des rendements croissants invoqués par Arthur ne sauraient être considérés indépendamment des spécificités des entreprises qui les mettent en œuvre.

Deuxièmement, le processus d'innovation prend place dans un *environnement* spécifique. Le terme *spécificité des ressources* ne signifie pas ici, que celles-ci ne sont pas puisées dans l'environnement de la firme. Elle signifie que celles-ci sont modifiées, déterminées, incorporées par leur intégration au sein d'un appareil de production particulier, qu'elles sont identifiées en tant que ressources productives. Chaque processus d'innovation définit ainsi un milieu, un *environnement* singulier, selon une logique à la fois processuelle et productive: "*L'enracinement de la technologie dans un milieu donné veut dire que la spécificité des ressources est un caractère acquis dans des processus qui se sont déroulés dans le milieu même et qui en représentent une histoire particulière...*" (Gaffard, 1990b, p; 345).

L'objet technique est alors l'aboutissement, le produit 'final' du processus de constitution de cette matrice, de cet environnement spécifique. Le processus d'innovation est avant tout conçu comme la mise en relation d'acteurs et de ressources dont le résultat, l'aboutissement, est en effet la création d'un objet technique. "*Le processus d'innovation est ainsi un processus d'apprentissage amorcé par des choix innovateurs et soutenu par l'expérience acquise en développant une activité productive nouvelle, et qui a comme résultat l'acquisition d'une nouvelle capacité, ou, plus précisément, l'apparition de nouvelles ressources spécifiques en travail*" (Gaffard, 1990b, p. 345). On peut rapprocher cette position de certains résultats de recherches menées sur l'innovation dans l'entreprise japonaise, par exemple de le cas de l'électronique: "*la capacité innovatrice de l'industrie électronique japonaise est définie pas ses responsables eux-mêmes comme un ensemble de discontinuités de produits fortement ancrés dans le capital technologique que chaque entreprise s'est constitué et a diffusé parmi son personnel. C'est à*

partir d'un travail technologique sur ce capital à la fois diversifié et spécifique à l'entreprise où il s'est accumulé que les innovations émergent" (²⁴⁵).

Production et innovation ne forment pas dans cette analyse, et à l'inverse des propositions formulées par Nelson et Winter, deux fonctions séparées, mais intégrées de la firme. Les chercheurs et ingénieurs, les spécialistes du marketing, les acteurs de la production œuvrent tous à la création d'une fonction productive originale, créative, évolutive. L'innovation n'a de sens qu'inscrite dans un contexte productif. La firme constitue le lieu par excellence de coordination d'un ensemble d'acteurs impliqués dans l'apprentissage collectif de nouvelles solutions productives. L'hypothèse schumpétérienne prend ainsi toute sa saveur: la firme innovatrice représente le lieu privilégié de l'innovation car elle constitue le lieu essentiel de la *production*. L'innovation fait donc partie de l'activité régulière de l'entreprise et forme un processus d'apprentissage nécessairement localisé en son sein, et en bonne partie accumulé par 'expérience'. Les conditions d'usage et de production des innovations forment un contexte décisif pour la technologie et son émergence.

IB Penser la discontinuité: les limites de la trajectoire technologique

²⁴⁵ Maurice, M., Nohara, H., Silvestre, J.J. (1988) *Organisation, compétence et créativité. Les ingénieurs et la dynamique industrielle au Japon*. Document LEST. N°461046.

“Every item or circumstance exactly fills, without supplement or residue, its unique spatio-temporal envelope” ⁽²⁴⁶⁾

Ainsi que nous l’avons vu, Nelson et Winter (1982), et plus généralement les chercheurs du courant évolutionniste défendent une vision partiellement spécifique des technologies. Le vocable spécificité possède un sens beaucoup plus radical chez Gaffard et Amendola. Chez les évolutionnistes, il est principalement fait référence, sous cette appellation, au fait que chaque firme, dans le cadre d’un problème et d’un paradigme commun, tend, du fait de son histoire, à apporter une réponse particulière déterminée par ses expériences antérieures. Chez Gaffard et Amendola (1986, 1988), chaque firme représente un environnement spécifique unique, caractérisé par une ressource humaine susceptible d’inventer de nouvelles voies technologiques, de créer et d’ouvrir de nouveaux problèmes et de nouvelles solutions techniques, de former un environnement singulier aboutissant à la mise au point d’un procédé ou d’un produit unique. Cette théorisation permet de penser la discontinuité technologique, et elle s’oppose conceptuellement aux visions globales et trajectorielles de la technologie présentées dans la première partie.

1) Trajectoire vs Création de technologie

1.1) L’innovation comme processus de création de technologie

Il découle de ce qui précède que la technologie n’est pas le point de départ de l’innovation *“mais bien son résultat”* (Gaffard 1990b). Par le biais des processus d’innovation, l’entreprise dispose d’une capacité d’action sur, et de création de soi et de son environnement. De ce point de vue, *“le processus d’innovation est au sens propre un processus de création de technologie”* (Gaffard 1990b, p. 345). *“Technology thus, no longer appears as a specific way (with its own physical counterpart) to solve a given problem, but as an environment characterized by a human resource capable of devising, and implementing, different solutions to different problems; and in the same way the process of innovation can no longer be thought of as ‘the adjustment to’ or even ‘the development of’ a given technology, but as process of research and learning resulting in the appearance of entirely new skills and qualifications which change the environment itself and hence permit to widen the existing range of problems and solutions.”* (Amendola, Gaffard, 1986, p. 478).

Cette conception de l’innovation, soumise aux méandres et à la logique processuelle de son déroulement, affranchit la technologie d’une détermination trop rigide: *“Nous ne sommes plus en effet, en*

²⁴⁶ Latour, B. (1996) “Do Scientific Objects Have a History? Pasteur and Withehead in a Bath of Lactic Acid” in: Common Knowledge, Vol. 5, n°1, pp. 74-91.

présence d'un contenu technologique potentiel donné qu'il faut mettre au jour au moyen d'un processus essentiellement quantitatif de sélection qui tend à devenir nécessairement toujours plus limité dans ces effets et doit converger vers un point donné; mais nous nous trouvons en face d'un changement qualitatif qui se définit et s'accomplit en route, et qui se traduit, pas après pas, par une modification et un enrichissement du contexte considéré comme source de technologie" (Gaffard 1990b, p. 346).

1.2) Trajectoire technologique et déterminisme

Gaffard et Amendola (1988) ont porté une critique sévère à l'encontre du concept de trajectoire technologique développé par les évolutionnistes. Les auteurs définissent les trajectoires technologiques de la façon suivante: *"A technological trajectory, whatever its character, direction and articulation through time, consists in developing a given performance potential already contained in the basic paradigm. () 'An undevelopped technology is akin to an exhaustible resource: as more is known less is left to discover' () On the other hand, to te extent that these advances require the explicit commitment of specific and generic resources, scarcities will appear sooner or later whose effects cannot be postponed indefinitely by substitution processes and induced innovations, and that will therefore exert pressures resulting in rising costs of incremental advances as the limit of the trajectory is approached. Technological and economic factors thus interact to bring about decreasing returns as the process of innovation pushes on. Nor is that all. As the technology gets more and more specified the direction of the trajectory becomes more and more uniquely determined restricting the range of options left available and hence increasingly constraining the successive choices"* (p. 8).

La dynamique se trouve radicalisée autour de deux pôles, les changements de paradigme impulsés par des innovations majeures, et une série d'améliorations incrémentales portées par une série d'innovations mineures. Les innovations radicales, à l'origine de la mise en place de nouveaux paradigmes demeurent des phénomènes largement exogènes dans le schéma évolutionniste. *"Radical innovations can in fact be defined as extraordinary exogeneous changes that bring about new technological paradigms, and marginal, or incremental innovations can be defined as endogeneous changes concerning the normal progress along the trajectory that makes it possible to bring to light the potential content of a paradigm in a given environment"* (Gaffard et Amendola, 1988, p.6). A l'inverse, les innovations mineures ne forment que le déroulement d'un programme. Dans cette perspective, la continuité résulte du fait que les innovations ne sont que les modalités d'application d'un programme plus large. Les ingénieurs sont ainsi porteurs d'une vision du monde qui s'impose à eux et qui les rend aveugles à d'autres possibilités ('exclusion effect'): *"the continuity evolves from a genuine research*

*programme adumbrated at start. The programme consists of methodological rules: some tells us what paths to avoid (negative heuristics) and others what paths to pursue (positive heuristics)” (Dosi, 1982, p.152). Le paradigme constitue une forme de cohérence économique et sociale globale établissant une correspondance vertueuse entre offre et demande, une forme de *main invisible technologique*.*

1.3) Irréversibilité et réversibilité, vers une intégration théorique

Gaffard et Amendola croisent le fer avec les évolutionnistes sur l'ensemble de cette représentation de la technologie. Selon eux, celle-ci reconnaît la création mais n'en rend pas compte “*However, in fact, nothing of the sort is contemplated inside the process itself. The Qualitative change, from the analytic point of view, takes place outside the process of innovation, before the latter starts developing: it is ‘the initial impulse’, the ‘appearance of a new technological paradigm’, a ‘change in the technological regime’ or whatever we want to call it. The process of innovation in itself is just the quantitative development of something already essentially given: the gradual bringing to the surface of an initial ‘technological content’, the realization of a ‘performance potential’, or the like” (Amendola et Gaffard, 1988, p. 10). En ce sens, les théories évolutionnistes sont marquées par une forte ambiguïté concernant le caractère endogène et localisé du développement technologique. La représentation du processus d'innovation comme une activité de résolution de problème, fut t-il ‘mal structuré’ (Dosi 1988), néglige la dimension fondamentalement créatrice de l'innovation.*

Gaffard et Amendola (1988) se démarquent nettement de l'approche évolutionniste, en proposant une approche dynamique de la question des irréversibilités: “*It underlines the character of flexibility of the innovative choice. While in fact a technological trajectory interpreted as the development of a given technology is characterized by a narrowing of the options and by diminishing returns as we proceed along it - because the potential content of any given technology is given and there is therefore limited scope for improvement - a process of creation of technology through a modification of the environment is characterized on the contrary by the opening of new paths at each successive steps. A choice to engage on an innovative path, thus, appears as the most flexible choice: that is the choice that will bring about the greater range of future options, and will hence be the best answer to research of flexibility of the producers and/or the consumers.*” (Amendola, Gaffard, 1986, p. 490). Le choix innovateur est lié à une perte de confiance dans l'ordre économique existant, accompagné d'une modification des anticipations à long terme des agents. Cette tension, créé de l'incertitude et de l'instabilité liées au renforcement de la préférence des agents pour la liquidité. En d'autres termes, le choix innovatif est par définition un choix de réversibilisation et de liquidation des réseaux existants. Cette réversibilisation est en quelque sorte le prix

à payer lorsque les agents se mettent en situation d'apprentissage. Cette perspective illustre le concept de 'destruction créatrice' avancé par Schumpeter.

D'Iribarne note bien cet élément important: *“Cette conception de l'innovation conduit également les économistes industriels à reconsidérer la théorie de la firme telle qu'elle a été établie jusque là. En effet, l'existence de la firme était justifiée (schéma coasien) par une fonction d'affectation interne de ressources internes considérées comme génériques, c'est à dire universelles, cette fonction étant elle-même commandée par des mouvements de coûts de transaction, c'est à dire de coûts d'échange. La firme se voit caractérisée dans cette nouvelle perspective, par une fonction d'organisation et de création de ressources spécifiques. Cela signifie que ces facteurs de production perdent leur caractère pré-existant et universel, pour devenir complètement individualisés au sein du processus productif lui-même. Ce réexamen de la conception de l'innovation conduit à constater des contradictions entre l'efficacité statique de la firme basée sur des capacités de création de technologies et mettant en évidence le rôle des coûts d'irréversibilité. Le problème posé pour la firme est de parvenir à un maintien d'une mobilité stratégique c'est à dire à un maintien d'une capacité à continuellement faire évoluer sa construction spécifique vers la production d'innovations non pas adaptés à des marchés mais ouvrant des marchés nouveaux puisque correspondant à des demandes potentielles non encore révélées faute d'offre”* (²⁴⁷).

Le débat engagé entre Gaffard et Amendola et les évolutionnistes se ramène à une question aussi simple que fondamentale: la question de la continuité-discontinuité technologique.

²⁴⁷ D'Iribarne, A. (1990) “La gestion de l'organisation et des ressources humaines comme facteur stratégique de la production et de la diffusion de l'innovation” in: Revue d'Economie Industrielle, n°51, 1er trimestre, pp. 166-183.

Chapitre 2: Propositions pour une théorie de l'innovation

Le premier chapitre a présenté deux idées principales. La première est qu'il existe une ligne de fracture et de tension entre une théorie de la technologie et une théorie de l'innovation. L'argument de cette tension correspond à un débat fondamental entre continuité et discontinuité technologique. Une position permet de comprendre la création technologique et la mise en place de discontinuités, l'autre éclaire les interdépendances et la continuité. La seconde idée est que toute tentative de dépassement de cette tension théorique entre continuité et discontinuité est vouée à l'échec si elle ne transforme pas cette tension en question, en d'autres termes, si la question de la continuité- discontinuité n'est pas

problématisée. Il s'agit de traquer les indices de la genèse de la discontinuité- continuité. Où se construit t-elle? Et comment? Pour ce faire, il faut réussir à penser ensemble la question de la création et de la continuité technologique (David, 1995). Cela nécessite donc l'élaboration d'un cadre théorique et de concepts appropriés.

La fin des certitudes sur les frontières 'naturelles' entre continuité et discontinuité pose alors une série de questions intrigantes: D'où vient le désordre? Comment l'ordre et le désordre sont ils définis? Par qui? et pourquoi? Qu'est ce qui les différencie? D'où viennent les interdépendances que les économistes du changement technique se sont efforcés de décrire?

Face à ces questionnements, notre position consiste à reconnaître l'innovation comme la dynamique élémentaire à la source du changement technique. Si l'on reconnaît aux acteurs de l'innovation la capacité de définir - dans une certaine mesure dont ce chapitre et les suivants vont s'efforcer de cerner les limites - les frontières entre continuité et discontinuité, le problème prend un nouveau visage: *“tout cela implique que, à la différence de la représentation du changement technique dans les modèles conventionnels de la croissance ou des cycles économiques, les agents ne sont pas limités par la “nature” dans leurs réalisations innovatrices, mais par leurs propres capacités”* (Dosi, Chiarmonte, 1992, in Foray, Freeman, p. 125-6). L'hypothèse centrale au fondement de notre thèse est alors de considérer que les acteurs n'ont pas en permanence la capacité de définir les objets technologiques mais seulement dans certaines conditions particulières. Mais quelque soit le degré de liberté des acteurs de l'innovation, celui-ci n'est réductible qu'au prix fort: poser une boîte noire sur les phénomènes d'innovation et adopter un déterminisme technologique fondé sur la cumulativité naturelle de la technologie. Nous appellerons *“situation d'innovation”*, les situations particulières dans lesquelles les acteurs définissent la continuité et la discontinuité technologique. A partir de là, nous pouvons nous risquer à une première définition: Les processus d'innovation peuvent précisément être définis comme les espaces dans lesquels l'ordre et le désordre sont en permanence définis et renégociés.

Dans ce qui suit, nous allons prendre au sérieux l'idée que l'arbitrage entre continuité et discontinuité, se joue au cœur des processus d'innovation. Il s'agit donc de considérer, en conformité avec le cadre théorique développé par Amendola et Gaffard (1988), les processus d'innovation en eux-mêmes et pour eux-mêmes. *“The analytical content of a process of creation of technology, conceived as a decision generating process whose sequential character reflects the basic uncertainty of a changing environment where more information is expected to come at (and as a result of) each successive step taken, is in fact all inside the process itself”* (Amendola, Gaffard, 1986, p. 479). En d'autres termes, le

processus d'innovation sera considéré comme le lieu où se dissolvent les irréversibilités des réseaux existants et où se forment les conditions de la mise en place de nouveaux réseaux. Symétriquement, les acteurs y définissent le poids des réseaux existants qu'ils entendent mobiliser. Si l'on souhaite dépasser l'impossibilité de penser la création, les processus d'innovation doivent donc, du point de vue instrumental, nécessairement être considérés comme une forme de "mise à plat" technologique. Il est indispensable en particulier d'abandonner toute hypothèse préformatrice sur l'interdépendance et la cumulativité. Il s'agit de reconnaître aux acteurs de l'innovation une autonomie et une capacité créatrice par rapport aux contraintes et aux schémas de l'existant. La question de la continuité doit être ouverte et laissée à l'initiative des acteurs de l'innovation - l'analyste est ici amené à céder une partie de ses prérogatives au profit des acteurs. Dans notre acception, la création technologique se traduit en particulier par des apprentissages -création de connaissance - par la création de nouveaux objets techniques et par la création de nouveaux acteurs (Eyraud et Alii 1988, Hatchuel 1994²⁴⁸).

L'attribution d'une place de choix au processus d'innovation prend acte du fait que l'orientation de l'activité inventive est incompréhensible sans référence à la dynamique d'enchaînement d'événements spécifiques aboutissant à la production d'un objet technique. Si l'interdépendance technologique est postulée *a-priori*, nul besoin de regarder le déroulement des processus d'innovation. En d'autres termes toute théorie de l'innovation part du postulat que ce processus n'est le fruit d'aucune nécessité et que les technologies "*auraient pu être autre chose que ce qu'elles sont*" (Bijker et Law, 1992). A partir de là, la question s'ouvre de savoir pourquoi les technologies sont effectivement ce qu'elles sont? pourquoi les processus d'innovation suivent-ils certains chemins particuliers? Comment au fil de ces chemins la question de la frontière entre continuité et discontinuité technologique est-elle prise en charge? Comment analyser les processus d'innovation et mettre à jour les arbitrages qui s'y jouent autour de la continuité technologique? Nous proposons d'organiser l'analyse à partir de deux concepts, le concept *d'espace d'innovation*, formant le cadre de l'action, et celui *d'investissement innovatif*, décrivant le processus d'innovation.

Premièrement, nous allons considérer que le processus d'innovation se développe, et construit un *environnement* spécifique, un *milieu* produisant l'objet technique (Amendola et Gaffard, 1986). Nous nommerons cet environnement spécifique un *espace d'innovation*. Tel que nous l'entendons, *l'espace d'innovation* est le lieu d'une double création: (a) c'est en son sein que sont spécifiées et élaborées, dans

²⁴⁸ Eyraud, F. D'Iribarne, A., Maurice, M., Rychener, F. (1988) "L'apprentissage par les entreprises des technologies flexibles: une recomposition d'acteurs et l'émergence de nouvelles professionnalités" in: Cohendet, P. et Alii (eds) *L'après-Taylorisme. Nouvelles formes de rationalisation dans l'entreprise en France et en Allemagne*. Economica. Hatchuel, A. (1994) "Apprentissages collectifs et activités de conception" in: *Revue Française de Gestion*, juin-juillet-août 1994, pp. 109-120.

le processus, les ressources formant un environnement, les conditions de production de l'objet technique (b) les acteurs y acquièrent la capacité de tracer une frontière idiosyncrasique entre continuité et discontinuité, d'arbitrer entre poids de la création et poids des réseaux existants.

Deuxièmement, nous considérons que la technologie est *vivante* (Zuscovitch 1985, Willinger & Zuscovitch 1993). Pour nous, l'objet technique constitue virtuellement l'élément central de la coordination des ressources tout au long du processus d'innovation. C'est autour de l'objet technique et de ses multiples élaborations, d'abord formulé comme une simple question, puis prenant corps dans une série de matières, que s'organise l'activité innovatrice. L'objet technique n'est pas le simple produit d'un environnement, mais est élaboré en étroite relation avec un environnement auquel il donne sens et qui lui donne vie: "*L'essence de la production devient, alors, 'la recherche spécialisée, en amont de la phase manufacturière proprement dite, des ingrédients les mieux adaptés pour trouver une solution, c'est à dire pour donner une réponse à une large gamme de questions spécifiques posées en aval de cette même phase'*"²⁴⁹). Le processus de lente mise en forme, de progressive élaboration de l'objet technique et de son environnement constituent l'essence de l'activité innovatrice, ce que nous nommerons *l'investissement innovatif*.

IIA L'espace de l'innovation

"The reversible door is the only way to irreversibly trap inside a differential accumulation of sociologists, knowledge, papers, and also, alas, paperwork; the hinged door allows a selection of what gets in and what gets out so as to locally increase order or information" (Latour (1988) p. 299)

Les réflexions amusées de Latour (1988)-(citation ci-dessus)- sur le rôle des portes et des portiers invitent à réfléchir sur la question de l'espace. La délimitation d'un espace pourvu d'un dispositif de contrôle des entrées et des sorties est seule capable de garantir l'accumulation de ressources et leur spécification, en d'autres termes l'élaboration d'un ordre. Dans ce qui suit, nous allons définir ce que nous entendons par espace d'innovation. Nous verrons comment cet espace permet aux acteurs de s'inscrire dans une dynamique créative.

Difficulté de modélisation des décisions

²⁴⁹ Gaffard, JL (1989) *Marché et organisation dans les stratégies technologiques des firmes industrielles*" in: Revue d'Economie Industrielle, n°48, pp.35-51

Le monde de l'entrepreneur schumpétérien offre cet avantage à l'analyste, d'une grande lisibilité par rapport à la complexité des organisations modernes. Il est souvent utile de retourner à l'histoire du développement industriel pour repérer les grandes lignes d'un phénomène. Lorsque Thomas Edison s'est lancé dans l'aventure de la création de réseaux d'éclairages électriques en remplacement des éclairages au gaz, il ne s'est pas aventuré seul dans cette entreprise (Akrich et Alii 1988). Il a tissé un réseau d'alliances dans différents domaines, financier, politique, journalistique. De plus, il a ouvert un espace dédié à la création de cette nouvelle technologie - le laboratoire de Menlo Park. Comme l'a parfaitement montré Hughes (1983), la création des réseaux électriques d'éclairage aux Etats Unis, puis la succès de l'électricité dans sa compétition avec le gaz, est indissociable de la création de ce laboratoire, à la fois isolé du monde et étroitement connecté avec certaines de ses composantes scrupuleusement sélectionnées.

Après avoir annoncer à toute l'Amérique son ambition qui n'était rien moins que de l'électrifier, qu'a fait Edison? Edison a patiemment et méticuleusement édifié un laboratoire, un espace de travail innovatif dédié à l'élaboration d'une première installation centrale électrique permettant d'éclairer le quartier de Wall Street. Pour créer ce prototype, Edison a engagé une série d'acteurs et d'objets dans un action innovative. En recrutant des scientifiques de haut niveau en mathématiques, physique et chimie, des spécialistes dans différents domaines, des 'bricoleurs de génie', en réunissant une série de machines, du matériel, des instruments et des prototypes, et construisant une bibliothèque sur mesure, Edison a *traduit* ses premières hypothèses sur l'objet technique en ressources, formant un milieu matriciel propre à générer cet objet technique nouveau (Akrich et Alii 1988).

Menlo Park a été structuré autour d'une série de décisions de recrutement et de dotations en ressources contribuant à lui conférer sa forme singulière. Cette dynamique de recrutement a été décisive, car en procédant de la sorte, Edison a tracé les frontières intérieures et extérieures d'un '*microcosme*' (Akrich et Alii 1988), d'un espace de travail à la fois isolé du monde, et en même temps étroitement relié à certaines composantes de la société New Yorkaise jugées stratégiques. Akrich et ses collègues soulignent ce point:

“si les portes paroles, les intermédiaires de toutes sortes ont été bien choisis, le microcosme que constitue le laboratoire représente dans toute sa richesse et sa complexité le macrocosme que forme la société américaine en sorte que les solutions acceptables pour le premier le sont également pour le second. Comme dans les cosmologies antiques, de secrètes et hypothétiques correspondances ont été tissées entre les deux. C'est d'elles, de leur validité et de leur solidité, que dépend la réussite de l'entreprise” (p. 26)

L'espace d'innovation, cadre localisé de l'action innovatrice, se caractérise donc à la fois par une forte autonomie vis à vis de la société qui l'entoure, et par son étroite relation avec cette même société (Lanciano, C. et Alii 1993²⁵⁰).

Comment décrire et analyser les espaces d'innovation? L'une des difficultés tient à la complexité des phénomènes en jeu et en particulier de la forme des décisions impliquées dans la création technologique. Comme le note James March, l'un des meilleurs spécialistes de la question de la décision, dans un trait d'humour: "If we knew more about the normative theory of acting before you think, we could say more intelligent things about the functions of management and leadership when organizations do not know what they are doing" (March, 1988, p. 263²⁵¹).

Les économistes ont cherché à simplifier les situations de décision d'investissement (Cohendet et Llerena, 1989²⁵²). La transformation des connaissances en *information*, et l'appréhension de l'investissement comme une décision ponctuelle prise par un 'entrepreneur' a permis de rendre les décisions calculables. Le prix à payer d'une telle simplification est l'incapacité à saisir les dimensions - collective, adaptative (²⁵³), imprévue (²⁵⁴), progressive, imbriquée dans l'action (²⁵⁵)- des décisions.

Or les situations d'innovation sont ponctuées d'imprévus, de surprises. L'activité innovatrice est tâtonnante, repose sur des chaînes de décisions partielles et ambiguës et sur des fragments de connaissance (²⁵⁶). Les simplifications habituelles reposant sur les normes, règles, conventions, outils de gestion, routines (Nelson et Winter, 1982; Thévenot 1985) sont au moins partiellement invalides. Il est donc strictement impossible de rendre compte de l'innovation à partir d'un cadre théorique standard, puisque la pertinence de celui-ci repose sur la mise en place d'une série d'outils de médiation permettant d'instrumenter les comportements des agents économiques (Eymard-Duvernay et Thévenot 1983), et du fait que les situations d'innovation constituent, au moins partiellement, des efforts de construction-

²⁵⁰ Lanciano, C., Maurice, M., Nohara, H., Silvestre, JJ. (1993) *L'analyse sociétale de l'innovation: genèse et développement*. Document Lest-CNRS.

²⁵¹ March, J. (1988) *Decisions and Organizations*. Oxford UP.

²⁵² Cohendet, P. et Llerena, P. (1989) "Flexibilités, risque et incertitude dans la théorie de la firme: un survey" in: Cohendet et Llerena (eds) *Flexibilité, information et décision*. Economica. Pp. 7-71.

²⁵³ Herriot, S., Levinthal, D., March, J. (1985) "Learning from Experience in Organizations" in: *American Economic Review*, Vol 75, pp. 298-302.

²⁵⁴ Harrison, J. March, J. (1988) "Decision-Making and Postdecision Surprises" in: March, J. (1988) *Decisions and Organizations*. Oxford UP. Pp. 228-249.

²⁵⁵ Baier, V., March, J., Saetren, H. (1988) "Implementation and Ambiguity" in: March, J. (1988) *Decisions and Organizations*, op cit. pp. 150-164.

²⁵⁶ March, J., Sproull, L., Tamuz, M. (1991) "Learning from samples of one or fewer" in: *Organization Science*, Vol 1, n°2, February 1991, pp.1-13.

reconstruction de ces médiations (Callon, 1986). Les situations d'innovation, dans la perspective où elles sont considérées comme des situations de création technologiques, correspondent particulièrement mal aux théories standards de la décision et appellent un cadre micro-analytique permettant de mettre en lumière la dynamique de construction des acteurs, des savoir et des objets techniques.

Espace d'innovation, objet technique et coordination des ressources spécifiques

Il est usuel en économie du changement technique de distinguer la fonction de production de la fonction d'innovation, représentée par le laboratoire de R&D (Nelson et Winter 1982). Dans cette représentation, l'espace d'innovation est en quelque sorte inscrit dans l'organisation. Si avec Gaffard (1990) on accepte l'idée que l'innovation est intégrée à l'activité productive, la question de l'ouverture d'un espace spécifique, permettant temporairement aux acteurs d'élaborer de nouvelles solutions, se pose. Pour innover, les acteurs de l'innovation doivent externaliser les réseaux existants par la création de frontières (²⁵⁷). Nous avançons que l'action innovatrice se déroule dans un cadre spatio-temporel *local* ou '*situé*', construit à cette fin. De la même manière que les organisations peuvent être comprises comme des arrangements institutionnels favorisant la mise en place d'apprentissages dans le cadre de contrats incomplets échappant au marché (Doeringer 1986, Favereau 1989b ²⁵⁸), *l'espace d'innovation* peut être considéré comme un cadre institutionnel permettant aux acteurs d'externaliser l'organisation, et d'échapper temporairement à son mode de coordination par les règles (Favereau 1991²⁵⁹). L'innovation n'est possible que par la spécification et la délimitation d'un espace possédant une autonomie partielle vis à vis de l'organisation. En d'autres termes, *l'espace d'innovation* assure aux acteurs un degré d'autonomie permettant la création d'un *milieu*, la spécification des *ressources* et leur agencement autour de l'objet technique. L'espace est le lieu dans lequel les acteurs acquièrent la capacité de s'emparer des questions de la continuité- discontinuité, et de leur apporter des réponses locales et temporaires.

Le concept *d'espace d'innovation* - tel que nous l'entendons (²⁶⁰) n'établit pas des structures rigides, mais délimite des mondes aux frontières évolutives, épousant en permanence les contorsions du processus d'innovation. Les relations de l'espace avec son contexte sont tout à fait déterminantes. L'espace est tout entier construit dans l'articulation étroite d'un contenu et d'un contexte (Callon et Law,

²⁵⁷ Nous nous inspirons librement des réflexions de Becker, H. (1957) op cit.

²⁵⁸ Favereau, O. (1989b) "Marchés internes, marchés externes" in: Revue Economique, Vol. 40, n°2, pp. 273-328

²⁵⁹ Favereau, O. (1991) "Irreversibilités et institutions: problèmes micro-macro" in: Boyer, R. et Alii (eds) op cit. p. 69-96.

²⁶⁰ Le concept s'inscrit dans une double filiation vis à vis de l'analyse sociétale et son espace d'innovation -Lanciano, C., Maurice, M., Nohara, H., Silvestre, JJ (1992) *Innovation: acteurs et organisations. Les ingénieurs et la dynamique de l'entreprise. Comparaison France-Japon*. LEST-CNRS- et de l'analyse socio-technique et son espace de négociation -Callon, M. Law, J. (1989) "On the Construction of Sociotechnical Networks: Content and Context Revisited" in: Knowledge and Society: Studies in the Sociology of Science Past and Present, Vol. 8, Pages 57-83. -

1989), d'un processus d'innovation et de son environnement pertinent. Plusieurs travaux, fondés sur des études de cas détaillées montrent que les processus d'innovation tracent des frontières entre un monde intérieur et un monde extérieur: *"In the previous section we described the way in which strategies of obduracy frequently, if not always, turn first around the creation of a distinction between inside and outside, and second upon ensuring that whatever is inside becomes an obligatory point of passage for those on the outside. We mentioned the simple case of physical exclusion - the paradigm case was the battery intended for a user in the developing world- but also talked about the arrangements that allow those inside the barriers to turn themselves into a kind of time machine and so model the outside."* (261). Tout se passe comme si le processus d'innovation consistait en un effort d'internalisation, d'appropriation dont l'espace d'innovation constituait le cadre. Les acteurs ont la possibilité d'assembler des éléments préexistants, ou d'élaborer de nouveaux éléments. L'une des questions centrales à laquelle nous allons nous intéresser concerne les facteurs déterminants en fonction desquels les éléments préexistants sont intégrés tels quels, rejetés ou transformés.

Law et Callon ont livré un texte explicitement centré sur la question de la définition d'une frontière entre intérieur et extérieur comme condition d'existence d'un objet technique (Law et Callon 1992²⁶²). Les auteurs racontent ainsi comment un projet d'abord 'rêvé' par la RAF (Royal Air Force) britannique de construire un avion militaire de combat et de reconnaissance, a progressivement donné lieu à une 'négociation de voisinage' entre différents Départements gouvernementaux concernés, et l'industrie aéronautique. Ce premier round de négociation a contribué à former un premier environnement: un nom a été attribué à l'avion - 'TSR.2' - et une identité au projet -GOR 339-, un espace a été ouvert à partir duquel une série de transactions ont été organisées. Ce premier pas a permis une identification de l'avion, des acteurs qui allaient lui donner le jour, et de l'environnement pertinent des acteurs participants à l'allocation de ressources.

En ce sens, 'le projet' TSR.2-GOR 339 s'est construit ce que nous nommons *un espace d'innovation*, une frontière entre un intérieur – représenté par le chef de projet et ses collègues- et un extérieur –représenté par les commanditaires de l'avion, les financeurs-: *" the project had created for itself a time and a space within which it might deploy the resources it had borrowed from outside. It had accordingly, achieved a degree of autonomy, a 'negotiation space"* (Law et Callon, 1992 p. 16). Le cas du TSR2 montre que le processus d'innovation tout entier, le sort et la forme de l'avion en cours

²⁶¹ Bijker, W., Law, J. (1992) *Shaping Technology/ Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press. Et particulièrement le postscript de Law et Bijker "Technology, Stability, and Social Theory" pp. 290-307.

²⁶² Law, J. et Callon, M. (1992) "The Life and Death of an Aircraft: A Network Analysis of Technical Change" in: Bijker, W. & Law, J. (eds) op cit. pp.21-52.

d'émergence, ont été suspendus aux relations établies entre acteurs de l'innovation et ceux du contexte. L'ouverture du processus d'innovation, son déroulement, et sa fermeture, ont été orientés par les négociations entre ces deux types d'acteurs. Les managers du projet ont dû se soumettre à une double exigence: l'avion devait être compatible avec les attentes des acteurs du contexte, tout en étant soumis aux contraintes de cohérence interne du projet.

1) Essai de théorisation de l'espace d'innovation

L'espace d'innovation, tel que nous l'entendons, est avant tout un cadre institutionnel temporaire, constitué autour de la création d'un objet technique particulier. Ce cadre échappe au marché et à l'organisation, il forme un espace économique propre, dans lequel l'activité innovatrice peut se développer de manière idiosyncrasique. La création technologique est avant tout le résultat d'un travail, d'une activité créatrice mise en œuvre par des acteurs. L'espace d'innovation forme donc, en ce sens, un cadre à l'action. Ce cadre est, conformément aux propositions de Callon et Law (Callon et Law 1989, Law et Callon 1992), délimité par la définition d'acteurs de l'innovation, et d'acteurs de contexte.

Nous proposons d'analyser la dynamique de l'espace d'innovation à partir de trois moments clés de définition de ses frontières : la problématisation, l'engagement, et la mise en projet.

La *problématisation* (Callon 1986) consiste à formuler un problème collectif auquel l'objet technique doit apporter une solution (Dosi 1988). Pour nous, la problématisation signe l'ouverture d'un espace d'innovation. Sa formulation identifie une série d'acteurs et propose une première formulation problématique de l'objet technique (Callon 1986, Law et Callon 1992). Il s'agit de la recherche d'une question qui va 'tenir' ensemble les acteurs autour d'un problème 'collectif'. Nous verrons que la question des frontières de l'espace est indissociable d'un travail de définition et d'*identification* d'une zone de connaissance technique à élaborer (Callon 1981), pour répondre à ce problème, et d'un travail de *simplification* du monde destiné à rendre celui-ci opérable (Star 1983, Pickering 1995). L'ouverture de l'espace se traduit donc par a) la formation d'un contenu et d'un contexte à l'action b) la formation des conditions favorables à la mobilisation de ressources et à la création d'un objet technique. Comme le notent judicieusement Callon et Law (1989), c'est l'objet technique en constitution - les coquilles St

Jacques dans leur cas - qui *articule* les acteurs ensemble (²⁶³). L'ouverture de l'espace délivre la première impulsion, pose les fondements de la *motivation*, au sens de la mise en mouvement de l'activité innovative au sein de l'espace. Pour innover, les acteurs ont besoin d'un espace d'innovation. Ils ont besoin d'externaliser, de contextualiser certains éléments de leur environnement, et d'en internaliser d'autres, pour les rendre *manipulables*. L'espace d'innovation crée des conditions locales spécifiques favorables à l'action, en dehors des ordres existants. La création technologique peut être comprise comme un effort de constitution d'un espace favorable à l'action, dans lequel contenu et contexte sont patiemment imbriqués. Cette logique processuelle de formation de l'espace percute une logique organisationnelle tout aussi déterminante.

L'*engagement* (Schelling 1955, Becker 1960) correspond assez bien à ce qu'il est convenu d'appeler la *décision* en économie. L'engagement consiste pour les acteurs de contexte et les acteurs de l'innovation à formuler les termes d'un accord ad hoc liant la décision d'allocation de ressources à la formulation d'objectifs à atteindre, singulièrement à travers la création d'un objet technique plus ou moins défini (Hatchuel 1994, 1996). Le moment de l'engagement met analytiquement en scène la rencontre d'une dynamique processuelle, ouverte par la problématisation, et l'espace organisé et régulé des règles spécifiques régissant l'allocation de ressources et l'instrumentation des transactions et des dispositifs d'évaluation du retour sur investissement, propres à l'organisation dans laquelle l'espace d'innovation voit le jour. L'engagement correspond à l'entrée en collision de deux logiques distinctes, celle de la création portée par un milieu (Gaffard 1990) et celle de l'organisation et de ses routines (Nelson et Winter 1982). C'est à notre sens au moment de l'*engagement* que se négocie le caractère organisé de la création (Lanciano et Alii 1993). Cet arrangement institutionnel repose sur la négociation *d'engagements mutuels* entre acteurs du contexte et acteurs de l'innovation. Ces contrats, uniques par leur caractère temporaire et incomplet dotent l'espace d'un degré d'*autonomie* négociée, d'un *plan* structurant le déroulement et les limites de l'action innovative et sa capacité à créer, d'une inscription de l'action dans une certaine durée et dans un certain espace. Callon et Law ont parfaitement souligné cet aspect: "*Il ne suffit pas de souligner cette interdépendance constitutive du contenu et du contexte. L'essentiel est ailleurs. Il est dans la délimitation d'un espace de négociation, c'est à dire d'un territoire à l'intérieur duquel les trois scientifiques disposent d'importantes marges de manœuvre tout en bénéficiant du soutien (relativement) inconditionnel des acteurs qu'ils ont placés dans leur contexte. Grâce à leurs premières traductions rondement menées, les chercheurs se sont créé cet environnement favorable. Ils vont pouvoir s'enfermer dans la baie de St Brieuc, consacrer toutes leurs énergies aux coquilles et aux marins pêcheurs, sans*

²⁶³ Corbin, J. et Strauss, A. (1993) "The Articulation of Work through Interaction" in: *The Sociological Quarterly*, Vol 34, N°1, pp. 71-83.

avoir à constamment remobiliser leurs alliés extérieurs. Ceux-ci sont avant tout, et presque exclusivement, intéressés au résultat final, c'est à dire à la possibilité de faire circuler dans les vastes réseaux de l'économie, de la politique et de la science, les produits qui sont arrachés localement à la baie de St Brieuc." (Callon et Law, 1989, p. 83)

La *mise en projet* correspond à l'inscription de l'objet technique dans un territoire économique, dans une matérialité. Le projet formule outre des objectifs à réaliser, des conditions de production et d'utilisation de l'objet technique. Les conditions de production comprennent à la fois les ressources en temps, en argent, en hommes, mais aussi les compétences, l'organisation du travail (Von Hippel 1990), l'instrumentation de l'action collective et de son évaluation (Hatchuel 1996, Midler 1993). La mise en projet organise la cadre de l'action et y place une série de ressources. La mise en œuvre du projet peut être comprise comme un exercice de traduction (Callon 1986) progressive d'hypothèses et d'équivalences en objet matériel, capable de domestiquer (Callon 1986) certaines forces de manière stable, de structurer de manière fiable un ensemble de ressources en produit, et donc de produire certaines performances. Elle est l'occasion d'une spécification progressive des ressources (Gaffard 1990), de leur mise en forme progressive afin de former un contexte de production et d'utilisation stable et reproductible à l'objet technique. L'aboutissement de la mise en projet est la construction d'une première installation en fonctionnement dans un territoire localisé.

1.1) Logique processuelle et formation de l'espace d'innovation

Selon la formule de Gaffard et Amendola (1988) la création technologique peut être assimilée à une réversibilisation, à une perte de confiance dans les réseaux existants, à une préférence pour la liquidité et la flexibilité. Le *choix innovatif* correspond ainsi au pari que la création de technologie ouvrira des options supérieures dans l'avenir à celles existantes aujourd'hui. L'innovation repose donc sur la perception d'un déséquilibre (Gaffard 1989), d'un écart entre offre et demande de technologie, et sur l'anticipation de "*rendements de création*" supérieurs aux *rendements d'adoption*. Cette position défie la rationalité économique à court terme, dans la mesure où les agents y affichent une préférence pour l'avenir fondée sur une incertitude, par rapport à une préférence pour le présent fondée sur de l'information. En ce sens, le choix innovatif ne peut être compris que comme une stratégie d'investissement.

D'où viennent les anticipations au fondement de cette stratégie innovatrice? En quoi consiste le phénomène de réversibilisation technologique? Nous allons analyser cette question à partir de ce que nous appelons la logique processuelle, une dynamique d'apprentissage localisé qui se met en place et ouvre la possibilité de création technologique. Nous verrons que l'ouverture d'un espace d'innovation correspond

en fait à un effort de dilatation, d'extension localisé de *l'espace technologique*, à une réversibilisation locale de l'ordre technologique existant. Celle-ci repose sur un double mécanisme. La *problématisation*, constitue un travail d'élaboration des anticipations des agents concernés par l'innovation et de repérage d'un gisement de progrès local potentiel qu'elle s'efforce de circonscrire et de définir. La *simplification* correspond au cœur de la question de la réversibilisation, phénomène mystérieux s'il en est. La création technologique ne réversibilise pas l'ensemble des réseaux existants, mais s'ouvre un espace, une niche très localisée sur le marché. Cet effort localisé de réversibilisation opère en créant de nouvelles irréversibilités aboutissant à la création d'un nouveau produit et/ou procédé. Ce que nous nommons ici logique processuelle correspond à l'impulsion, à la première mise en mouvement du processus d'innovation par les acteurs.

1.1a) Ouverture de l'espace- le rôle de la problématisation

“Je peux répondre aux questions très facilement lorsqu'elles sont posées, mais il m'est très difficile de les formuler” (Hughes, 1983, p. 26).

Depuis les travaux de Rosenberg (Rosenberg et Vincenti 1978 ²⁶⁴, Rosenberg 1982), le développement technologique a été souvent présenté comme une activité de *résolution de problème* (Dosi 1982, Hughes 1983, Gaffard 1989). Il nous semble indispensable de préciser la nature de cette problématisation.

Premièrement, la résolution d'un problème suppose qu'un problème ait été défini, et donc que les acteurs concernés se soient trouvés en mesure de le percevoir (Levitt et March 1988 ²⁶⁵) et de le formuler. Cet aspect définitionnel ne nous semble pas négligeable en pratique, bien qu'il ait été souvent négligé, en théorie. La phrase d'Upton, le père scientifique du réseau électrique mis au point par Edison, souligne l'importance de ce point dans la réalité. Hughes (1983) montre que l'une des grandes qualités de l'innovateur Edison tenait à sa capacité à poser des questions et à formuler des problèmes. Une question posée ouvre l'espace d'innovation, une réponse apportée s'efforce de le refermer.

Hughes (Hughes 1983), est l'un des auteurs à avoir prêté une grande attention à ce phénomène. Selon lui, l'innovation émerge d'une rupture dans l'ordre établi, dans *l'espace technologique*, ce que

²⁶⁴ Rosenberg, N., Vincenti, G. (1978) *The Britannia Bridge: the Generation and Diffusion of Technological Knowledge*. Cambridge.

Hughes nomme à dessein de manière évasive ‘reverse salient’: “reverse salients are obvious weak points, or weak components, in a technology which are in need of further development”. Hughes considère, dans une approche compatible avec les travaux des évolutionnistes, que la communauté des ingénieurs partage un point de vue sur le monde, une vision paradigmatique permettant d’identifier *des heuristiques négatives et positives* (Dosi 1982): “A reverse salient is obvious, and creative imagination is not needed to define it. As will be shown, the nondurability of experimental lamp filaments before 1878 was a reverse salient in incandescent-lamp systems. Edison and many others were aware of the need for inventive activities in this area” (Hughes, 1983, p. 22). Un ‘vide’ apparaissant dans *l’espace technologique* - souvent révélé par des phénomènes économiques - entraînerait un effort de formulation d’un problème - un *problème critique*, le plus souvent de nature technique-. Un point faible évident de *l’espace technologique* motiverait donc le développement d’une nouvelle alternative technologique. Cette approche paradigmatique possède l’inconvénient majeur de clore la question de la problématisation, et d’oblitérer la question de l’ordre et du désordre. Comme le note March et Alii (1991), dans la vie réelle des entreprises, les anomalies sont bien trop nombreuses pour être gérées dans leur totalité. Aucun reverse salient n’est *naturellement* évident avant d’être rendu tel: toute anomalie doit être perçue, reconnue et établie avant de devenir significative ⁽²⁶⁶⁾.

Nous proposons de considérer que la *problématisation* consiste précisément à poser une question repérant et donnant sens à une *anomalie*, un vide, un espace béant du développement technologique. La problématisation trace *les frontières* ad hoc d’un ordre établi et d’une zone d’élaboration technologique. Elle circonscrit une zone technologique à élaborer. Toute formulation locale contient donc sa propre représentation du monde, de *l’espace technologique*, sa propre définition de ce qui constitue l’ordre établi et de ses ‘points faibles naturels’. Callon note ainsi à propos du mécanisme de *problématisation*: “A whole set of concepts, proposals, ways of thinking, methods of giving proof are called into play to isolate and define the darker corners of how cell works. The area of ignorance appear against a background of certainty, admitted knowledge and systems of interpretation” ⁽²⁶⁷⁾. La formulation d’un problème trace les frontières entre un *espace technologique* considéré comme établi et un *espace d’innovation* considéré comme indispensable..

Deuxièmement, une *problématisation* n’a aucune chance d’ouvrir un *espace d’innovation* si elle ne constitue par un repère partagé. Un ‘Robinson Crusoe’ de l’invention peut fort bien posséder dans sa

²⁶⁵ Levitt, B., March, J. (1988) “Organizational Learning” in: *Annual Review of Sociology*, n°14, pp. 319-340.

²⁶⁶ Star, S., Gerson, E. (1986) “The Management and Dynamics of Anomalies in Scientific Work” in: *The Sociological Quarterly*, Vol. 28, n°2, pp. 147-169.

cave une multitude de plans et de projets géniaux, ils ont peu de chance de voir le jour s'il ne les inscrit pas dans la société: comme nous le confiait un chercheur de la sidérurgie "*ma cave ici est encore pleine de magnifiques projets, toujours valables d'ailleurs, à mon avis... toujours valables.. qu'on a poussé très très loin et qui n'ont jamais été réalisés*" (Akrich et Alii 1988).

La formulation 'partagée' d'un problème crée un espace, une tension, une dynamique collective visant à sceller cet espace par la *mise au point* d'un objet technique. En ce sens, elle constitue la première élaboration de l'objet technique autour duquel se coordonnent les ressources. La création *d'un espace d'innovation* correspond donc strictement à l'élaboration d'une première identité partagée à un objet technique. L'action même de *représenter* collectivement l'objet technique, y compris, dans les étapes incertaines du démarrage, sous forme de 'question commune', constitue un acte de création *ex nihilo*.

L'un des points essentiels de cette formulation tient donc à sa capacité à inclure, à *intéresser* (Callon 1986) une série d'acteurs, comprenant en particulier les acteurs du contexte, mais aussi les producteurs et les utilisateurs potentiels du futur objet technique. Callon (1986) a montré qu'une telle *problématisation* met virtuellement en relation une série d'acteurs, dont les intérêts sont représentés et les rôles assignés, et ouvre un *espace de négociation* entre eux relativement à ces différentes définitions (Callon et Law 1989, Eyraud et Alii 1988). C'est bien autour de cette première *représentation* collective que se mobilisent les efforts, les résistances et les participations: la dynamique innovatrice se confond avec son élaboration progressive. La direction financière de l'entreprise accepte-t-elle d'être une ressource financière docile pour l'innovation? A quelles conditions? Une première ligne frontière est tracée entre acteurs écartés de l'objet technique et externalisés et acteurs rapprochés de l'objet technique et internalisés.

Précisons qu'il n'est pas dans notre intention de réifier le rôle prescriptif de certains 'écrits', 'images' ou 'objets'. De part les *compétences* implicites qu'ils attribuent aux acteurs (Akrich 1987), et l'univers technologique qu'ils décrivent, ces objets forment une ressource et un cadre à l'action. Les acteurs, inclus ou non dans cette première définition, conservent, dans notre proposition théorique, tout à fait la possibilité de dénoncer certains de ses aspects et d'en faire évoluer la matière (Callon 1986, Akrich 1987). En d'autres termes, et nous y reviendrons, les objets et les textes n'ont pas, par eux même, la force d'*engager* les acteurs, seulement de les inciter (²⁶⁸). Comme l'ont noté les sociologues des sciences et des

²⁶⁷ Callon, M. (1980) "Struggles and negotiations to define what is problematic and what is not. The socio-logic of translation" in: Knorr, K., Whitley, R. (eds) *The Social Process of Scientific Investigation*. Reidel Publ. P. 204

²⁶⁸ Latour (1993) propose une discussion du caractère incitatif des objets dans l'action. Latour, B. (1993) *Petites leçons de sociologie des sciences*. La découverte.

techniques, les controverses forment ainsi l'essence même de la dynamique innovative (²⁶⁹). A y bien regarder cependant, une *dénonciation* ou une redéfinition n'a le plus souvent pas pour effet de refermer l'espace d'innovation, mais de le faire vivre et évoluer. Le caractère controversiel de la problématisation est lié à un phénomène masqué par la dimension collective de l'innovation: les auteurs de la formulation - rapport, image, représentation- définissent l'objet technique et son contexte au nom d'autres ('*représentations*' Callon 1986 ²⁷⁰). Dans la suite, nous appellerons les acteurs qui agissent au nom des autres dans le cadre des espaces d'innovation, les *acteurs de l'innovation*.

La problématisation ouvre donc un espace d'action commun mettant en relation acteurs de l'innovation et acteurs du contexte, coordonnés autour d'une première formulation d'une zone technologique à élaborer. Elle projette du même coup l'objet technique dans le cadre d'un *espace technologique* dont il représente en premier lieu un point faible identifié, une tension devant être apaisée, un vide devant être comblé par la mise en mouvement.

Callon et Law ont donné un exemple du lien tissé entre problématisation et création d'un espace d'innovation, à partir du cas des coquilles St Jacques de la baie de St Brieuc: "*En effet les trois chercheurs se sont établis en porte-parole ou représentants d'acteurs, dont ils constatent la préexistence en même temps qu'ils la renforcent, et qu'ils lient les uns aux autres en les faisant entrer dans un même projet. En agissant de la sorte, c'est à dire en se glissant dans les structures et réseaux existants pour les transformer en ressources, ils contribuent à créer une séparation entre ce qu'il est convenu d'appeler usuellement les contextes et les contenus. Le CNEXO, le consommateur français, les pouvoirs régionaux et la communauté scientifique se sont trouvés d'accord pour être érigés en contexte d'une action dont le but est d'agir sur des coquilles et, comme nous le verrons, sur des marins pêcheurs dont l'étude et la domestication constituent le contenu du projet proprement dit. D'un côté l'environnement, choisi par trois chercheurs et rendu favorable par leur habileté stratégique; de l'autre, le travail de l'élevage, la lutte contre les résistances de toute sorte qu'il va provoquer, lutte dont dépend l'échec ou le succès du projet. Quelle division semble plus tranchée que celle qui délimite ainsi le contexte de l'action et l'action elle*

²⁶⁹ Collins, H. (1981) "Knowledge and Controversy: Studies of Modern Natural Science" in: Social Studies of Science, Vol 11, n°1 et la discussion de Pickering, A. (1981) "Constraints on Controversy: The Case of the Magnetic Monopole" in: Social Studies of Science, Vol 11, pp. 63-93; Cambrosio A., Limoges C. (1991) "Controversies as governing processes in technology assesment" in: Technology Analysis and Strategic Management, Vol 3, n°4, pp. 377-396.

²⁷⁰ Callon, après Bourdieu (1975), dérive le concept de représentation de son sens socio-politique (Strauss 1978). Nous avons utilisé le terme essentiellement dans son acception cognitive. Cette ambiguïté n'est pas gênante car nous allons voir que ces deux dimension représentent deux facettes d'un même phénomène. Il existe une stricte relation entre représentation cognitive et représentation socio-politique. En ce sens, les outils de représentation forment des éléments essentiels de la coordination (Thèvenot 1991).

même, séparant ce qui la rend possible de ce qu'elle s'efforce de transformer?" (Callon et Law, 1989, p. 82)

1.1b) Simplification et registre d'action

La problématisation permet d'établir les fondements de la création technologique. L'espace d'innovation ouvre un cadre à l'action innovatrice, lui fournit un contenu et une motivation. La formulation consiste également en un effort de traduction essentiel visant à rendre le problème opérable, manipulable, dans une perspective d'action collective (²⁷¹). Nous nommerons ce mécanisme de traduction de l'innovation dans un registre praticable, la *simplification* (Star 1983 ²⁷²).

Toute innovation peut être considérée comme un processus d'élaboration, de création. Pour innover, les acteurs sont amenés à transformer les 'réseaux' ou les 'espaces' existants, à créer une forme de désordre. L'innovation, comme le notent Lanciano et Al (1993) est '*source de changement*'. Pour les auteurs, "*La créativité organisée, c'est en fait l'innovation en travail porté par un ensemble d'acteurs situés en amont et en aval de celle-ci et s'incorporant à des espaces qu'elle transforme dans sa propre dynamique*" (Lanciano et Al. 1993, p. 14.). Pour que l'innovation *travaille*, cependant, les 'espaces' -ou 'réseaux'- doivent être rendus 'travaillables' ('Do-able' Fujimura 1987), élaborables, ils doivent être pliés, externalisés, simplifiés, appropriés. De 'nouveaux acteurs' doivent émerger, temporairement ou plus durablement (Eyraud et Alii 1988, Lanciano et Alii 1993).

Le 'désordre' est un 'ordre' localisé (Becker 1957). Cette *mise en ordre* locale passe par une série de déplacements: rapprochement entre certains éléments et éloignement d'autres (Callon et Law, 1989; Law et Callon 1992; Latour 1988). Le processus d'innovation agit donc d'entrée comme un processus de mise à distance, de mise en place de distances entre différents éléments, de hiérarchisation et d'ordonnement de ces éléments au sein d'un espace: cet ordonnancement constitue l'essence de la *simplification*.

Premièrement, la simplification inscrit la formulation du problème dans un registre d'action unique, technique. Cela ne signifie pas que d'autres dimensions ne soient pas considérées, bien au contraire. Mais l'ensemble de ces dimensions trouve son équivalent dans des caractéristiques techniques

²⁷¹ Fujimura, J. (1987) "Constructing 'Do-able' Problems in Cancer Research: Articulating Alignment" in: Social Studies of Science, Vol 17, pp. 257-293

sur lesquelles les acteurs de l'innovation ont une capacité d'action et d'association. La simplification agit en mettant en *équivalence* un ensemble de problèmes, formulés dans des registres divers, en une série de questions techniques, à élaborer (Callon et Law, 1989), organisée autour d'un '*point de passage obligé*' (Callon 1986, Latour 1989).

Un exemple caractéristique est donné par Edison. L'innovateur a d'emblée inscrit l'électrification dans un espace technico-économique dont l'autre alternative était le gaz. Il s'est appuyé, tout au long de son travail, sur les repères économiques - prix de revient de l'éclairage au gaz- fournis par les réseaux de gaz existants ('heuristique' Nelson et Winter 1982), dont il a déduit le coût maximum que devait respecter son système d'éclairage électrique pour être concurrentiel. Pour Edison, le coût de son système dépendait essentiellement de la section des conducteurs en cuivre utilisés (hypothèse 1). Dans la formulation d'Edison, le problème se traduisait par la recherche d'un filament à haute résistance permettant d'optimiser la quantité de cuivre utilisée dans le réseau (point de passage obligé). De ce fait, et contrairement à ses contemporains qui cherchaient un filament à faible résistance, Edison a élaboré essentiellement une stratégie d'innovation sur le filament à haute résistance. Il s'est entouré d'acteurs et d'outils lui permettant d'explorer la question du filament à haute résistance (Hughes 1983).

Le *point de passage obligé* forme la base d'une représentation collective de l'objet technique. Les acteurs de l'innovation, en faisant accepter une formulation de l'objet technique dans leur registre d'opérabilité, se définissent comme les *représentants* incontournables d'un ensemble plus large d'acteurs concernés par la même zone technologique. Ils déplacent un ensemble de problèmes divers dans leur monde, résolvant ainsi partiellement la question de la multiplicité et de l'incommensurabilité des points de vue: "*When participants in the intersecting worlds create representations together, their different commitments and perceptions are resolved into representations - in the sense that a fuzzy image is resolved by a microscope. This resolution does not mean consensus. Rather, representations, or inscriptions, contain at every stage the traces of multiple viewpoints, translations and incomplete battles*" (Star et Griesemer, 1989, p. 413).

En même temps que des frontières, la *simplification* définit une stratégie d'exploration, un objet propre à transcender ces frontières. En ce sens, le *point de passage obligé* -ou la question centrale à élaborer- représente la motivation essentielle des acteurs à agir collectivement. La définition d'un point de passage obligé scelle les *alliances* en formulant un énoncé d'intérêt collectif, et déclenche la formation de

²⁷² Star S. (1983) "Simplification in Scientific Work: An Example from Neuroscience Research" in: *Social Studies of Science*, vol 13, pp. 205-228. Nous utilisons le concept de simplification dans un sens très proche du concept de traduction proposé par Callon

l'espace d'innovation - le rapprochement d'une série d'acteurs autour d'une finalité suffisamment commune ('compréhension mutuelle' Callon et Law 1989) et suffisamment ambiguë (²⁷³)- et le démarrage de l'activité innovatrice. Le point de passage obligé - la fixation des coquilles - s'articule à un point final - la culture des coquilles.

Deuxièmement, la *simplification* définit une *cosmologie*, une représentation du monde centrée sur l'objet technique. Le *point de passage obligé* est formulé dans un registre unique, simplifié, le registre d'action des acteurs de l'innovation, dont il est fait l'hypothèse qu'il représente la clé de l'ensemble. Ce déplacement s'effectue par la construction d'une série d'*équivalences*, d'*hypothèses*, de mises en correspondance avec un problème scientifico-technique présenté comme incontournable. Cette cosmologie organise virtuellement l'espace d'innovation selon trois modalités à partir desquelles la question de la continuité- discontinuité est prise en charge par les acteurs :

L'*externalisation* correspond à l'hypothèse selon laquelle l'élément considéré n'entretient pas de relation étroite avec l'objet technique, et vise à mettre celui-ci à distance.

La *mobilisation* (Callon 1986) correspond à l'hypothèse selon laquelle l'élément considéré est connu et peut être transféré dans l'espace d'innovation sans modification. Le fonctionnement de ces produits, outils, *boîtes noires* (Latour 1989), n'est pas altéré par le processus d'innovation. Dans ce cas, les acteurs peuvent puiser leurs ressources dans des réseaux en place et capitaliser sur l'existant "*translators who have chosen traditions are able to draw on a repertoire of potential objects, and strategies for handling those objects, as they attempt the further articulation of preforming networks and local investment of form*" (Callon et Law, 1989, p. 79).

L'*élaboration* consiste à créer de nouveaux éléments spécifiques à l'espace d'innovation. Les éléments à élaborer forment le cœur de la problématisation (point de passage obligé). Ils sont donc l'objet d'un questionnement et d'un travail.

Avec la *simplification*, les fondements d'un ordre local sont posés. Celui-ci s'accompagne de la mise en place d'anticipations favorables à la création, d'une obsolescence localisée des technologies existantes, fondée sur l'ouverture d'une *zone d'élaboration* correspondant à un point faible repéré de

(1986) dont nous nous inspirons. La traduction peut simplifier ou compléxifier.

²⁷³ L'ambiguïté permet à des acteurs aux intérêts différents de soutenir le même projet. De Terssac, G., Reynaud, JD (1992) "L'organisation du travail et les régulations sociales" in: De Terssac, G, Dubois, P. (eds) *Les nouvelles rationalisations de la production*. Op cit., pp. 169-185.

l'existant. Cet ordre local diverge de *l'espace technologique* qu'il représente, *ponctualise*, simplifie, réorganise, détourne pour l'inscrire dans une forme de capitalisation dissidente. Du point de vue local, *l'espace technologique* n'est qu'un point faible. Du point de vue global, *l'espace d'innovation* n'est qu'un point de désordre.

1.2) Logique organisationnelle

La *problématisation* et la *simplification* permettent de mettre en mouvement l'innovation au sein d'un espace dédié, en définissant un monde commun centré autour d'une zone de tension technologique à explorer. Ces mécanismes sont l'œuvre des acteurs de l'innovation dans leur effort de traduction du monde qui les entoure, et de mobilisation d'alliés (Callon 1986, Akrich et Alii 1988). Mais ces acteurs ne sont pas seuls. Ils ne se trouvent pas dans un vide social. Malgré leurs efforts pour formuler le monde qui les entoure, celui-ci ne se laisse pas dompter aussi facilement. Les innovateurs ont non seulement à convaincre mais également à prendre en compte d'autres points de vue, en particulier ceux émanant d'acteurs qu'ils considèrent comme indispensables à la réalisation de l'innovation, les *acteurs de contexte*.

De la négociation qui s'établit entre acteurs de l'innovation et acteurs de contexte, naît une dynamique que nous nommons organisationnelle, qui s'articule autour de la prise de décision. La logique interne ou *processuelle* entre en collision avec une logique externe ou organisationnelle incarnée par les acteurs du contexte de l'espace d'innovation, et visant à inscrire l'innovation dans une généralité, dans une multidimensionnalité. La collision est organisée autour de l'allocation des ressources, à la fois indispensables à l'amorçage d'une accumulation autour de l'objet technique, et soumises au respect des règles de gestion des ressources. Cette logique organisationnelle s'efforce à la fois de limiter et de contrôler le travail d'élaboration technologique, et de l'inscrire dans les réseaux existants. De cette collision entre deux logiques, interne et externe, naît la possibilité d'un *engagement réciproque* entre les deux types d'acteurs, l'intervention d'un accord autorisant l'engagement de ressources dans un cadre d'action marqué par l'incertitude, et la mise en œuvre de l'action innovatrice.

1.2a) Prise de décision et engagement: la collision des réseaux

“Who is sovereign, the self who sets the alarm clock to rise early, or the self who shuts it off the next morning and goes back to sleep? It is instructive that we normally see the far-sighted self take actions which constrain or alter the behavior of the myopic self” (Loewenstein, G., Thaler, R. 1989)

Hétérogénéité et encastrement des modalités de l'action collective

Comment rendre une traduction durable et solide? Comment donner vie à un objet technique? Comment passer du monde des représentations au monde de l'action? La problématisation et la simplification qui l'accompagne s'efforcent de définir un accord sur une question délimitant une zone technologique à élaborer. Comme l'ont noté Star et Griesemer, une traduction est toujours menacée par d'autres traductions cherchant à la déplacer (Star et Griesemer 1989 ²⁷⁴). Le *point de passage obligé* demeure soumis à une forte instabilité du fait des controverses et des efforts de contre-traduction qui se déploient dans l'espace d'innovation. Le phénomène de *prise de décision* se situe au cœur du règlement de cette question. Les alliances mises en place par la traduction doivent donc être inscrites sur le plan organisationnel et être instituées en cadre *durable* de l'action collective pour qu'un investissement puisse prendre place, et que la création d'irréversibilités soit possible.

L'activité innovatrice est complexe dans la mesure où elle met en scène des dynamiques d'actions hétérogènes et multiples au fil de son déroulement "*l'objet du processus (les fins visées, 'la chose' à réaliser...) et le processus lui-même (comment chacun devient utile à l'autre..) se construisent par influence mutuelle. Dans de tels processus, les acteurs ne peuvent aisément délimiter leurs apports, et doivent orienter leurs activités en fonction des évolutions du projet ou de celles des autres acteurs.*" (Hatchuel 1996, p. 104 ²⁷⁵).

Les relations dans un groupe d'acteurs sont tantôt structurées de manière plutôt 'fonctionnelles' ou 'normales', tantôt l'irruption d'une anomalie ou d'un problème engendre de soudaines restructurations, organisant la dynamique collective autour d'événements, modifiant radicalement le sens de l'activité. Des situations et des dynamiques sans commune mesure sont déployées, articulées autour de l'émergence de certains événements 'imprévus' ou anomalies. Différents modes d'actions collectives sont ainsi encadrés de manière aussi imprévisible qu'hétérogène. Le concept *d'espace d'innovation* comme 'espace intermédiaire', temporaire, permet de penser les accélérations du temps, les changements de rythmes, les intersections, les dilatations de l'espace et du temps: il permet de comprendre la variabilité du cadre de l'activité caractéristique des processus d'innovation (Midler 1993 ²⁷⁶).

²⁷⁴ Star, S. Griesemer, J. (1989) "Institutional Ecology, 'translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39" in: *Social Studies of Science*, Vol 19, pp. 387-420.

²⁷⁵ Hatchuel, A. (1996) "Coopération et conception collective. Variétés et crises des rapports de prescription." In: De Terssac, G. Friedberg, E. (dir) *Coopération et conception*. Octares. Pp. 101-121.

²⁷⁶ Midler, C. (1993) "Temps du produit, temps du projet, temps des métiers" in: *Information sur les Sciences Sociales*, Vol 33, n°1, pp. 25-39

Les acteurs peuvent ainsi être pris dans le fonctionnement quotidien du CNEXO (Callon et Law 1989), cadre dans lequel ils agissent de manière fonctionnelle par rapport à leur mission, à leur hiérarchie, pris dans des relations relativement standardisées où chacun s'acquitte de sa tâche. Le surgissement d'un événement débouchant sur une problématisation, sonnant l'ouverture d'un espace d'innovation, peut modifier soudainement le sens de l'action, des relations, des engagements qui se restructurent alors temporairement mais radicalement autour d'un événement dont la signification est progressivement élaborée. A partir d'une injonction apparemment aussi vague que "*identifier des espèces marines possédant le potentiel pour être économiquement cultivé*" (Callon et Law 1989, p. 59), rien n'est possible et tout est possible. La balle est envoyée mais rien ne nous dit comment les trois chercheurs vont s'en saisir ou s'en dessaisir. Dans le cas présenté par Callon et Law, les trois chercheurs s'en sont saisi et ont tissé minutieusement la trame de l'engagement collectif qui a donné sa première impulsion à l'action innovante. La dilatation provoquée dans l'espace et dans le temps de l'organisation a supposé la redéfinition d'un contexte et d'un cadre ad hoc à l'activité.

Se pose alors la question de savoir si - selon les termes des auteurs de l'analyse sociétale (Lanciano et Alii 1993) - la créativité peut être organisée, et comment? La "routinisation de l'innovation" (Nelson et Winter 1982), se heurte à la nature indomptable, imprévisible, inexplicable, au désordre inévitable accompagnant la création.

Incomplétude et forme d'engagement

"Mon hypothèse sera que l'incomplétude n'est pas le problème -c'est la solution. Le recensement exhaustif de toutes les éventualités est, sinon toujours, du moins généralement impossible. Dans ces conditions, le maintien strict de positions non coopératives est stérile: un arrangement contractuel ne peut émerger. Si les individus concernés ont l'intention de parvenir à un arrangement contractuel (sans doute parce que les avantages l'emportent sur les inconvénients, pour toute une classe d'arrangements a-priori), ils vont chercher à contourner les lacunes de leurs perceptions de l'avenir. La seule issue est la suivante: au lieu de définir leur relation en extension (par l'énumération des paires de comportement, pour chaque état de la nature), ils vont la définir en compréhension (par la qualification de leur domaine de coopération, probablement assortie du choix d'une procédure de contrôle, ex-post, de la conformité des comportements successifs au cadre convenu de coopération, ex-ante)" (Favereau, 1989b, p. 296).

Imaginons qu'un contrat soit établi entre un principal et un agent, entre les deux figures du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre (Midler 1993). Quelles seraient les caractéristiques de ce contrat *ex-ante*? Il serait caractérisé par une forte rigidité, liée à la nécessité pour le principal de garantir son investissement et au problème délicat de l'appropriation du retour sur investissement, et par une forte asymétrie, liée à son incapacité à définir le contrat de façon complète, à contrôler le respect de celui-ci ('*enforceability*'), à définir des critères d'efficience et par conséquent une rémunération optimale. A l'évocation de ces simples questions, il apparaît rapidement que la situation d'innovation échappe largement au calcul économique standard.

Une possibilité de résolution de cette tension réside dans ce que Favereau nomme la contractualisation *ex-post*, c'est à dire une forme de coordination et de contrôle par conformité à un '*common knowledge*'. Dans le cas de l'innovation, nous avons largement discuté, en début de chapitre, les limites d'une telle approche, à partir de la critique du paradigme évolutionniste, et de son incapacité à penser la création technologique. Les situations d'innovation s'appuient sur la mise en question du 'savoir commun'. En d'autres termes, les situations d'innovation sont strictement incompatibles avec les hypothèses d'individualisme méthodologique et de rationalité substantielle: l'innovation ne peut exister que si, et seulement si, l'on prête aux acteurs la capacité de créer un savoir commun *ex-post*, et de manifester une volonté collective de coopération. La constitution d'un espace d'innovation suppose la mise en place d'un contexte favorable à une action coordonnée et même coopérative (Beret, 1997²⁷⁷).

Schelling (²⁷⁸) a montré que nombre de situations ne correspondent pas à des situations d'optimisation calculables (au sens de *l'homo oeconomicus*) et donnent lieu à une marge de *négociation* liée à l'existence d'une zone d'incertitude. L'issue de ces situations - dont l'innovation fait partie - dépend par conséquent des stratégies employées par les acteurs, et de leurs comportements. Dans cette perspective, Schelling estime que l'une des voies les plus praticables de la négociation repose sur l'établissement d'un *engagement*, -le pouvoir de "se lier", de contraindre son comportement futur en l'organisant le long d'une ligne de cohérence instrumentée (²⁷⁹). Lorsque la négociation ne porte pas sur

²⁷⁷ Béret, P. (1997) "Les recherches sur l'investissement immatériel. Un bilan d'étape" Working Paper, Lest-CNRS, 05/97.

²⁷⁸ Schelling, T. (1960) *The Strategy of Conflict*. Harvard UP.

²⁷⁹ Schelling, T. (1955) "An Essay on Bargaining" in: *American Economic Review*, Vol 46, pp. 281-306. Ainsi, l'une des questions classiques en économie du travail concerne la préférence des agents pour un salaire croissant au cours de leur vie de travail, laquelle contrarie l'hypothèse de préférence pour le présent et la liquidité. L'une des approche consiste à accorder aux acteurs une volonté de se lier, par contrat, et de contraindre ainsi leurs actions futures. Loewenstein, G., Thaler, R. (1989) "Anomalies. Intertemporal choice" in: *Journal of Economic Perspectives*, Vol 3, n°4, Fall 1989, pp. 181-194.. Favereau (1996) "L'incomplétude n'est pas le problème, c'est la solution" in: Reynaud, B. (dir) *Les limites de la rationalité*. La découverte. Pour une approche sociologique Becker, H. (1960) "Notes on the Concept of Commitment" in: *American Journal of Sociology*, Vol 66, pp. 32-40.

un acte ponctuel tel qu'un acte de vente, mais sur une série d'actions à mener sur un certain terme, l'*engagement* est une manière de limiter l'opportunisme et d'ouvrir un espace à l'action collective.

L'ambiguïté (March 1988) et l'incomplétude des finalités ou des plans, caractéristiques de l'innovation ne sont, en fait "*pas le problème, mais la solution*" : "*l'acceptation de l'incomplétude est le signe indiscutable (et forcément connu de son vis à vis) de l'intention d'un agent d'entrer dans une relation de collaboration à long terme*" (Favereau 1996). Le mécanisme d'incitation ne repose ni sur la coercition, ni sur la rémunération - tous deux inadéquats - mais sur la construction collective et ad hoc d'une *motivation* et d'une forme d'*engagement* ⁽²⁸⁰⁾. L'*engagement* permet aux agents pris dans des situations de forte incertitude de stabiliser leurs relations sur le long terme, favorisant ainsi la mise en place d'une logique d'investissement en univers très incertain. L'efficacité (De Terssac 1992, Béret 1997), la dynamique et l'identité collective (Ponsard, Tanguy, 1993; Suchman 1990; De Terssac 1992, Hatchuel 1994) dépendent de la capacité des acteurs à conclure les termes d'un *engagement*.

La *prise de décision* représente un moment crucial du processus d'innovation. La théorie économique a beaucoup insisté sur le rôle de la décision dans l'allocation de ressources. La négociation s'organise en effet autour de l'accès aux ressources. L'obtention de ressources et de soutien passe par l'acceptation de contraintes posées sur l'activité innovatrice: "*resource commitments are continuously weighted against constraints throughout the research process*" (Fujimura 1987, p. 269).

La prise de décision représente également le moment clé de *reconnaissance réciproque* des partenaires du contrat, et de négociation de la forme de *l'engagement réciproque* entre principal et agent. Les 'acteurs de l'innovation' s'extirpent de la réalité complexe et conflictuelle de l'organisation - externalisation - en privilégiant l'identification de partenaires *représentants* pour eux l'ensemble de l'institution: les représentants du "CNEXO-qui-soutient-sans-arrière-pensées-le-projet-d'aquaculture-de-coquille-St-Jacques" ⁽²⁸¹⁾ dans le cas présenté par Callon et Law. Les 'acteurs du contexte' s'extraient des difficultés et des incertitudes relatives à l'innovation en privilégiant l'identification de partenaires qui prendront en charge le travail de création technologique. Ils se trouvent ainsi en position de ne s'intéresser principalement qu'au résultat du processus, et de gérer l'*incomplétude*. Le principal assume la charge de défendre le projet vis à vis de l'organisation dans son ensemble, permettant la mise en place d'une simplification pour les acteurs de l'innovation. La reconnaissance mutuelle de la part du principal et de

²⁸⁰ Leibenstein (1987) *Inside the Firm. The Inefficiencies of Hierarchy*. Harvard UP. L'auteur définit la firme comme un ensemble de chaînes d'engagements.

²⁸¹ Callon et Law (1989) "La protohistoire d'un laboratoire" in: Callon M. (ed) *La science et ses réseaux*. La Découverte, pp. 67-116.

l'agent du caractère indispensable de leur partenariat lie les acteurs, les engage sur une ligne contraignant leur comportement futur.

La question du contrôle de l'activité pose un réel dilemme dans les cas où le contenu de celle-ci ne peut pas être spécifié à l'avance. La fluidité et la faiblesse prescriptive de l'innovation laisse supposer l'importance des conflits et controverses, l'étendue des explorations possibles, les difficultés à stabiliser certains éléments pour avancer à l'occasion des toutes premières étapes du processus. Dans une situation d'innovation où le contenu de l'activité ne peut être contrôlé, comment un agent et un principal peuvent-ils établir un accord? Schelling (1960) considère que la stratégie la plus payante est la voie de la 'vérité': les propositions formulées doivent être rendues démontrables. La réflexion de Schelling a le mérite d'éclairer certains aspects fondamentaux en jeu dans la négociation. Premièrement, pour entraîner l'accord, il est le plus souvent essentiel de rallier le jugement externe d'un tiers légitime ou de produire un objet de démonstration *ex post*: les propositions doivent être montrables et démontrables, c'est à dire rendues -apparemment- indépendantes des acteurs participant à la négociation (²⁸²).

Il n'est pas faux de dire que les contrats informels d'innovation portent sur un engagement de 'comportement' réciproque. L'internalisation, le détournement, l'obtention de moyens contribuent à construire l'espace d'innovation en précisant ses frontières. Ce mécanisme le rend à la fois autonome - dans la mesure où l'allocation de ressources constitue une marque de confiance, 'délégation'- et dépendant - dans la mesure où en obtenant des ressources de l'extérieur, les acteurs de l'espace prennent inévitablement un engagement vis à vis de certains acteurs constituant l'environnement de l'espace, engagement dont la satisfaction conditionne l'existence même de l'espace d'innovation. De ce point de vue, tout projet d'innovation répond nécessairement à l'impératif de construction d'une cohérence interne (intégration) et externe (légitimité). Les contrats repèrent à la fois des zones de coopération - *délégation* (Latour 1988) et *innovation* - et les instruments permettant d'évaluer et de contrôler la conformité des comportements aux engagements pris. Nous retiendrons la mise en place par les acteurs de deux mécanismes d'équilibrage: la mise en place d'un *plan initial incomplet - mise en projet* - et l'organisation d'un dispositif d'évaluation *ex post*, composé d'épreuves périodiques de jugement et de mise en compatibilité (Hatchuel 1996). La mise en place d'un 'plan' initial incomplet (Hatchuel 1994) permet d'offrir une première référence aux explorations, un premier cadre à l'action, et d'inciter une dynamique collective de recherche de la complétude, déclinée dans le temps et dans l'espace par des objectifs intermédiaires. Le dispositif d'évaluation est formé d'épreuves de jugement agencées dans le temps. Incomplètes, dans l'étendue du contrôle qu'elles offrent aux 'acteurs de contexte', elles s'articulent

²⁸² Boltanski, L et Thévenot, L. (1991) *De la justification. Les économies de la grandeur*. Gallimard.

étroitement avec un nécessaire auto- contrôle exercé de la part des acteurs de l'innovation sur leur activité (Dasgupta et David 1994²⁸³).

Forme de l'engagement et autonomie

Les acteurs du contexte acceptent d'être paramétrés et mobilisés – c'est à dire de perdre temporairement leurs prérogatives hiérarchiques et d'adopter un comportement coopératif - les acteurs de l'espace acceptent la responsabilité de l'action et de la 'réussite' en contrepartie d'une *autonomie* - la capacité à co-définir les orientations de l'activité, le cadre de l'action innovante (De Terssac 1992²⁸⁴). La question de l'*autonomie* est donc tout à fait essentielle à l'instauration d'un cadre coopératif d'action favorable au développement du processus d'innovation. L'incomplétude est indispensable à l'acceptation et à l'engagement des acteurs dans l'action (De Terssac (1992). L'incomplétude ouvre la porte à l'initiative, et à la formation collective de règles soudant le collectif, à la complémentarité des apprentissages. La notion d'*autonomie* renvoie spécifiquement à cette capacité d'un groupe d'acteur à définir par lui même les règles de ses actions: "*La transaction peut s'énoncer ainsi: je mets en commun le savoir-faire dont je dispose et je transmets les informations que je détiens, sous réserve que mes supérieurs tolèrent l'organisation que je mets en place pour aménager mon potentiel*" (De Terssac, Reynaud, 1992, p. 176).

Les engagements présentent différentes modalités (Thévenot 1993²⁸⁵). Les acteurs du contexte peuvent avoir des exigences 'de retours' plus ou moins forte vis à vis du contexte de l'action innovante. Dans les cas les plus extrêmes, les exigences portent uniquement sur les produits de l'activité innovante: les acteurs de l'innovation doivent fournir une série d'objets intermédiaires représentant l'état d'élaboration du produit (spécifications, plans, prototype, épreuve de performance..). Dans d'autres cas, ils peuvent exiger de co-définir le contenu et les conditions de production de l'objet technique -définition des méthodes, des matières, des compétences, des outils, des dispositifs...(Star et Griesemer 1989).

Comme l'a montré Hatchuel (1996) la forme de l'engagement peut se décliner selon *des 'rapports de prescription'* plus ou moins fort, en fonction du degré d'*autonomie* laissé aux acteurs de l'innovation

²⁸³ Dasgupta et David (1994) "The New Economics of Science" in: *Research Policy*, Vol 25 ont mis en évidence l'importance de l'évaluation par les pairs dans les situations d' *élaboration* - scientifique ici - où le contenu de l'activité ne peut être spécifié. Hatchuel, A., Weil, B. (1992) *L'expert et le système. Gestion des savoirs et métamorphose des acteurs dans l'entreprise industrielle*. Economica; Hatchuel, A. (1997) "Expertise et compétence au travail. Formes des savoirs et organisation de l'action collective" in: CGS -Ecole des Mines de Paris, unpublished.

²⁸⁴ De Terssac, G. (1992) *L'autonomie dans le travail*. Octarès.

²⁸⁵ Thévenot, L. (1993) "Essai sur les objets usuels" in: Conein, B., Dodier, N., Thévenot, L. (eds) *Les objets dans l'action*. EHESS. Pp. 85-111

pour définir les éléments du cadre de l'action innovative. A ce point précis - prise de décision - la logique organisationnelle et la logique de l'espace d'innovation se recouvrent. La structure habituelle et organisée de prise de décision et d'allocation de ressource entre en négociation avec les exigences particulières de l'espace d'innovation. L'espace en formation entre en collision avec les réseaux (ou espaces) existants et tend à y être inscrit. Dans les entreprises, cette confrontation se caractérise par à la mise en forme typique du projet d'innovation (Midler 1993), la *mise en projet*. La prise de décision ne se réduit pas à une allocation financière. Comme l'a noté Von Hippel (1990²⁸⁶) la mise en forme du projet met en correspondance une certaine représentation de l'objet technique - fruit de l'espace d'innovation- et sa décomposition en tâche à effectuer, en compétences à mobiliser, en calendrier à respecter, en performances à atteindre.

1.2b) Mise en projet et déroulement de l'action innovative.

La problématisation permet d'obtenir une formulation de l'objet technique sur le papier. L'engagement autorise la mise en œuvre de ressources et contribue à définir un cadre à l'action en lui fixant des objectifs et en fixant les termes d'un accord stabilisé entre acteurs. S'ouvre alors la question de la réalisation concrète de la création technologique. Les hypothèses doivent être traduites en caractéristiques, l'objet doit prendre forme et matière. L'engagement autorise la mise en place d'un investissement innovatif. La mise en projet lui procure une orientation.

La mise en projet vise à inscrire l'objet technique dans un territoire économique, et plus singulièrement dans une fonction de production (Gaffard 1990). L'espace d'innovation détourne certains moyens de production de l'activité productive pour former une nouvelle fonction de production. L'exemple des coquilles de la baie de St Brieuc illustre bien cette inscription. Callon (1986) souligne ainsi l'importance de la mise en relation du travail des scientifiques avec un territoire organisé formé de marins pêcheurs, des consommateurs français, de la baie de st Brieuc et de ses ressources. Les marins pêcheurs ont été détournés de leur activité de pêche et transformés en véritables assistants des scientifiques de la CNEXO. Ils ont participé à la progressive transformation de leur activité productive.

²⁸⁶ Von Hippel (1990) "Task partitioning: An innovation process variable" in: Research Policy, Vol 19, pp. 407-418.

Cette inscription est réalisée par la définition d'un plan projetant dans le temps, dans l'espace, et dans l'espace de qualification, l'objet technique à réaliser. Ce plan constitue un repère pour l'action, même si la mise en forme des ressources, les conditions de production de l'objet technique ne peuvent de fait n'être spécifiés que dans le fil de l'action innovante. La mise en projet s'inscrit dans le temps, et le plan lui-même peut être formulé progressivement. La phase de mise en projet consiste avant tout en une activité transformant un objet technique virtuel en réalité. Le processus par lequel cette transformation est opérée joue un rôle déterminant dans la forme prise par la technologie. Considérant ce processus primordialement comme un travail innovatif, deux dimensions nous semblent particulièrement remarquables : la question des ressources humaines (1990b) et la question de la coordination.

Comme le souligne Gaffard (1990), l'objet technique est le produit d'un milieu, composé de ressources progressivement spécifiées au fil du processus. L'exemple des ressources humaines est particulièrement illustratif. Von Hippel (1990) a mis en évidence que l'une des dimensions essentielles de la mise en projet consiste à décomposer l'objet technique virtuel en tâches à réaliser. Cela signifie que l'objet technique doit être inscrit au sein d'un espace de qualifications (Lanciano et Alii 1993), pris en charge par des acteurs dotés de certaines compétences et disposant de certaines connaissances complémentaires propres à lui donner le jour. L'inscription de l'objet technique dans un espace de qualification existant provoque une tension entre le caractère créatif de l'objet technique, lié à la formulation d'une zone de l'espace technologique à élaborer, et le caractère institué des savoirs et des compétences. De nouveau, l'arbitrage qui en résulte comprend trois modalités :

La *mobilisation* de compétences ou même d'objets externes (dans ou hors l'entreprise innovante) constitués repris tels quels

L'*élaboration* de nouvelles compétences et connaissances et de nouveaux objets

L'*externalisation* de certains éléments de l'espace de qualification existant

Comment l'activité innovante est-elle prise en charge collectivement? Midler (1993) note que les chefs de projets exercent essentiellement une 'influence sur les hommes et les événements' et délèguent leur capacité d'action à une multitude d'autres acteurs. Hatchuel décrit l'activité des concepteurs comme un savoir-combiner : "*C'est le savoir du stratège et de l'entrepreneur*", l'art de coordonner un groupe d'acteurs et de ressources hétérogènes, et aux visions contradictoires, "*savoirs du compromis, donc, savoirs*

de négociation aussi” (²⁸⁷)- les acteurs “réordonnent sans arrêt les fins et les moyens à la recherche d’une logique de projet, autrement dit d’une évolution acceptable pour un groupe d’acteurs donnés” (Hatchuel 1994, p. 117). L’ ’ingénierie hétérogène’ (Law 1987) semble donc être souvent prise en charge par des collectifs d’acteurs en partie spécialisés pris dans des formes de coordination variables. Il est difficile d’éluder la question de leur action collective et de la dynamique de l’activité.

La question de la coordination n’est certes pas nouvelle en économie. Elle se pose néanmoins différemment dans des situations de coordination d’actions productives et dans les processus d’innovation. Les acteurs de l’innovation ne peuvent se contenter de participer au fil de l’innovation en train de se faire, et préparent également les éléments permettant de faire basculer l’innovation du côté des certitudes et des faits accomplis. Ils scandent le processus d’une série d’exercices de jugement, d’extraction de l’innovation de leur propre pratique. Outre un travail de simplification leur permettant d’agir sur les choses et de les manipuler (Callon et law, 1989) et donc de se situer dans le fil des choses en train de se faire, les acteurs doivent donc effectuer un travail de représentation, d’abstraction, de totalisation, d’objectivation, d’ordonnancement, de classement, d’homogénéisation préparant l’objet à sa mise en équivalence, et la fonction à son inscription dans l’organisation.

Les acteurs sont amenés à se donner des temps qui ne soient pas dédiés à l’action avec les choses: le temps de la pratique y disparaît, les représentations donnent un sens rétrospectif, le regard posé est volontairement distancié, synthétique, totalisant (²⁸⁸).L’organisation d’épreuves “*de compatibilité et de vérité*” (Hatchuel 1994) peut être conçue comme la nécessité de l’action collective non prescrite de se représenter à elle même, favorisant ainsi à la fois les apprentissages croisés, la mise en compatibilité et préparant la remontée en généralité. Les épreuves d’évaluation forment de véritables lieux de coordination et d’élaboration de représentations collectives de l’action et de son sens. A l’occasion de la production de rapports destinés à tel ou tel ministère, les acteurs ‘internes’ du projet élaborent leurs représentations collectives. La mise au point d’un prototype n’est pas seulement la production d’un objet intermédiaire dirigé vers les acteurs extérieurs pour fournir la preuve de la faisabilité du projet, mais aussi un élément essentiel de coordination interne éclairant le sens de l’action, et un outil essentiel d’élaboration d’une représentation interne collective. La production d’un article ou d’une communication de la part des scientifiques de la baie de St Brieuc vise certes à convaincre des collègues que *Pecten Maximus* se fixe.

²⁸⁷ Hatchuel, A. (1994) “Apprentissages collectifs et activités de conception” in: Revue Française de Gestion, juin 1994, pp. 109-120.

²⁸⁸ Bourdieu (1980) note l’existence d’une série d’instruments d’ ’éternisation’ - l’écriture et les techniques d’enregistrement, d’analyse, de théorie, de méthode, de représentation graphique (diagramme, schéma, calendrier, tableaux, tables synoptiques, arbres), de classification et de mise en ligne -. L’idée est de mettre en ligne une série de signes, de rapprocher en un seul espace homogène et immédiat des éléments hétérogènes, de les relier. Bourdieu, P. (1980) *Le sens pratique*. Ed de Minuit.

Celle ci permet aussi à ses producteurs de stabiliser leurs représentations, de les mettre en ordre, de les confronter, comparer, évaluer, de se définir une orientation, et éventuellement de la réviser. Il s'agit pour les auteurs de s'inscrire, au moins temporairement, dans la généralité du contexte. Ces deux mécanismes soulignent la dualité fondamentale de tout processus d'innovation: processus de plongée au cœur des conditions de production liée à la création/ détournement technologique, et extraction des conditions de production liées à l'anticipation de conditions de production et d'usage futurs.

Cette dualité se traduit par la coexistence d'un rapport de prescription réciproque et réversible et la mise en place d'outils de médiation. Ainsi, l'organisation d'une série de 'rendez-vous' (Hatchuel 1994), marque un effort de cadrage et d'ordonnancement du temps et de l'espace d'innovation, les acteurs s'efforcent de contraindre leurs actions. Hatchuel fait des techniques et des épreuves de 'validation' les éléments essentiels de structuration du processus de conception.

Cela nous permet de rapprocher son analyse des travaux de Thévenot (1990, 1993) et Dodier (1990, 1993). Les épreuves, moments d'évaluation et de coordination forment les cadres dans lesquels la dynamique coopérative peut changer radicalement de vitesse et de direction. Les techniques et objets de coordination fondent l'exercice collectif d'un jugement, l'élaboration collective et négociée d'une représentation de l'action, et une occasion essentielle de croisement des apprentissages: ils sont "*à la fois des moyens de contrôle du fonctionnement collectif et en même temps des étapes de transition entre les différentes phases*" (Hatchuel 1996, p. 118). Les agendas, les plannings, la division du travail, l'effort mené pour organiser l'espace facilite l'action en commun. Comme le souligne Suchman (1988), dans le cours de l'activité d'innovation les étapes de mise en commun jouent un rôle considérable, et s'appuient sur une série d'outils, tels que les fameux tableaux blancs, ou une simple page de format A4 qui permet de juxtaposer, mettre en relation, élaborer, coordonner, rendre compatible, réviser, ordonner le fil de l'action en train de se faire et de préparer la remontée en généralité et la clôture de l'activité. Mais les objets plus durables que sont les prototypes ou les versions diverses de l'objet technique forment également le support de jugements et d'apprentissages tout aussi essentiels. Comme le note Hatchuel "*Souvent la fabrication de prototypes est à la fois l'aboutissement d'une phase et le démarrage d'une nouvelle, et constitue de ce fait le grand régulateur du processus de conception*" (Hatchuel 1996, p. 118). Il s'agit pour les acteurs de produire les représentations collectives de leurs actions (Dodier 1990, 1993). La mise en place de comportements coopératifs passe par la mise en oeuvre de ces 'instruments de coordination' (Hatchuel 1996).

Reprenons les deux exemples développés par Callon et Law (1989, 1992). Dans le cas de l'aquaculture des coquilles St Jacques, les retours et les moments d'activité des acteurs du contexte vis à vis de l'innovation ont été cantonnés et localisés dans le temps et ont été organisés autour d'objets intermédiaires et en relation directe et maîtrisée par les chercheurs. Ces derniers ont rendu des comptes et ont fourni des gages et des preuves de l'orientation de l'activité dans le sens convenu "*support would be forthcoming so long as the scientists were making reasonable progress towards fulfilling their part of the bargain*" (Callon et Law, 1989, p. 62). Comme nous l'avons noté, cela suppose également une activité réciproque de défense du 'projet' par les acteurs du contexte, vis à vis de son environnement plus global, afin que les chercheurs n'aient pas à s'en soucier. Les acteurs engagés dans le contexte se substituent et isolent l'espace d'innovation de réalités plus complexes (March et Simon 1958²⁸⁹). Le processus d'innovation est ainsi *localisé* et bénéficie d'une *autonomisation*. L'internalisation, le détournement, l'obtention de moyens contribuent à construire l'espace d'innovation en précisant ses frontières. Ce mécanisme le rend à la fois autonome - dans la mesure où l'allocation de ressources constitue une marque de confiance, 'délégation' (Latour 1988)- et dépendant - dans la mesure où en obtenant des ressources de l'extérieur, les acteurs de l'espace prennent inévitablement un engagement vis à vis de certains acteurs constituant l'environnement de l'espace, engagement dont la satisfaction conditionne l'existence même de l'espace d'innovation. De ce point de vue, tout projet d'innovation répond nécessairement à l'impératif de construction d'une cohérence interne (intégration) et externe (légitimité).

En conclusion, notons que la question de la continuité- discontinuité se décline sous forme d'arbitrages multiples organisés en trois moments clés du processus de création technologique. La problématisation trace une première frontière dans l'univers de l'espace technologique, entre des éléments considérés comme connus et des éléments considérés comme restant à élaborer et à créer. L'engagement positionne la problématique en relation avec des catégories et des instruments familiers permettant l'évaluation et la décision. La mise en projet inscrit l'objet technique dans un territoire existant, détourné et modifié en vue de la formation d'une nouvelle fonction de production.

²⁸⁹ March, J. et Simon, H. (1958) *Organizations*. Wiley & Sons.

IIB Investissement incertain et élaboration technologique

“Les individus n’ont pas à rêver d’une société hyper-rationnelle pas plus que la société ne doit rêver à des individus hyper-rationnels; ce dont les individus ont besoin, et ce dont la société à besoin, c’est respectivement d’une société, et d’individus, simplement créatifs, c’est à dire sachant, à partir de leurs erreurs sur le monde réel, édifier de nouveaux mondes possibles” (Favereau, 1989a, p. 177).

Le débat théorique opposant réversibilité et irréversibilité s’est largement organisé autour de deux approches très différentes du système économique (Boyer et Alii 1991).

D’un côté, le marché et ses défenseurs mettent en avant une logique universelle et flexible d’ajustement, rendue largement indépendante de l’histoire et des conditions spécifiques de production. De ce point de vue, les échecs du marché - market failure - n’existent pas. Si une solution technique est continûment adoptée par des utilisateurs, cela tient au fait qu’elle est la meilleure solution, celle qui leur permet de maximiser leur intérêt, leur utilité. Avec des ajustements, le marché revient donc toujours spontanément à l’équilibre. L’irréversibilité est exclue de cet univers, dans la mesure où ‘tout changement peut être annulé par une action symétrique’ (Boyer, Chavance, Godard, 1991, p.22).

S’opposent fondamentalement à cette vision, des approches centrées sur les institutions, mettant en avant la logique historique d’accumulation conduisant à des équilibres économiques toujours uniques. L’existence même d’institutions, leur forme, leur genèse, constituent alors autant d’éléments de régulation permettant d’espérer des équilibres toujours singuliers. L’équilibre ne peut être trouvé que temporairement, et par l’effet de mécanismes de régulation permettant de stabiliser temporairement les relations entre les agents économiques sur la base de conventions et d’intérêts partagés. Dans ce monde, *“il vaut mieux avoir tort avec les autres que raison tout seul”* (Boyer et Alii 1991, p. 14). Les externalités de réseau et les rendements croissants d’adoption peuvent rendre attractive l’adoption d’une solution technique inférieure (Arthur 1988, Dosi et Metcalfe 1991). Ces approches reposent donc sur une économie des irréversibilités, dans la mesure où toute décision individuelle est déterminée par les conditions institutionnelles de sa production. Les institutions sont porteuses d’histoire (‘carriers of history’ David

1994 ²⁹⁰) et d'une inertie qui dépasse les volontés individuelles: David note ainsi que des individus rationnels -'perfectly free to choose'- se trouvent conditionnés par les cadres sociaux -historiques et institutionnels- dans lesquels ils se trouvent "very action of theirs, that seems to them an act of their own free will, is in an historical sense not free at all, but in bondage to the whole course of previous history" (David 1985).

Ce que nous nommons *investissement innovatif* pose le problème réversibilité-irréversibilité de manière renouvelée. L'innovation est fondamentalement un phénomène de réversibilisation (Gaffard et Amendola 1988). Les acteurs y mettent en question les réseaux existants. L'innovation est une source essentielle d'obsolescence des réseaux existants (Frankel 1955). Pourtant cette réversibilisation ne peut être obtenue que par la création de nouvelles irréversibilités localisées au sein de l'espace d'innovation: l'innovation est fondamentalement un phénomène d'irréversibilisation (Callon 1991, Callon 1992). Les acteurs y accumulent de nouveaux savoir, y construisent de nouveaux repères, y établisse un nouvel ordre.

1) Décision et investissement

Nous avançons que l'innovation est un mécanisme de création d'irréversibilités localisées au sein d'un espace d'innovation. L'espace d'innovation forme le cadre de l'action dans lequel le processus d'innovation peut se dérouler. Ce processus se caractérise par sa capacité à créer des irréversibilités localisées. En ce sens, il constitue un processus d'investissement. Dans le paragraphe qui suit, nous allons évoquer les implications théoriques de ces propositions, autour d'un effort de conceptualisation de l'investissement innovatif.

La question de l'investissement est le plus souvent limité à un problème classique de décision sur l'opportunité d'acquisition d'un bien, stigmatisée par le comportement d'un agent optimisateur, lequel dans le meilleur des cas prend une série de décisions interdépendantes, dont on fait varier les conditions d'information (²⁹¹). La théorie de l'apprentissage sous-jacente aux plus sophistiqués de ces modèles (flexibilité dynamique interne et externe sous condition d'incertitude avec apprentissages dits bayésiens Cohendet et Llerena 1989) est tout à fait insuffisante à rendre compte de la nature de l'investissement dans les situations d'innovation, *l'investissement innovatif*.

²⁹⁰ David, P. (1994) "Why are institutions 'the carriers of history'?": Path dependence and the evolution of conventions, organizations and institutions" in: *Structural Change and economic Dynamics*, Vol 5, n°2, pp. 205-220.

²⁹¹ Cohendet, P., Llerena, P. (1989) "Flexibilités, risque et incertitude dans la théorie de la firme: un survey" in: Cohendet, P., Llerena, Flexibilité, information et décision. *Economica*. Pp. 7-71..

Le concept d'information trahit l'idée d'une séparation entre le monde réel et le type d'information dont disposent les acteurs sur ce monde réel. Le concept d'information suppose par ailleurs l'existence d'une continuité technologique, hypothèse hautement problématique. Avançons que, dans les espaces d'innovation, les informations dont disposent les acteurs pour guider leurs décisions sont celles qu'ils élaborent (²⁹²).

Le postulat de création technologique implique que le réel soit intimement lié aux actions et aux décisions mêlées des acteurs. Les acteurs ne sont pas uniquement dotés d'une capacité de décision et de calcul - avec la possibilité éventuelle de reporter une décision ('option'), ou de revenir sur une décision ('réversibilité') - ils possèdent une capacité collective de création et de destruction (flexibilisation) du monde - capacité d'action - au sens où ils peuvent renouveler radicalement la fonction de production ('flexibilité interne' Favereau 1989a, Cohendet et Al. 1989). En ce sens l'investissement ne peut plus être compris comme une simple *décision*, un choix exercé entre des options existantes ou potentielles. Il doit être pensé beaucoup plus radicalement comme la capacité des acteurs à mobiliser et à créer collectivement des ressources pour construire leur fonction productive future.

Cette capacité d'action, de création technologique explique la radicalité de l'incertitude pesant sur les processus d'innovation. Un investissement productif plus classique génère en effet une capitalisation de laquelle un retour sur investissement est attendu. Les processus d'innovation, à l'inverse, réversibilisent, remettent en question, rendent obsolètes (Frankel 1955, Gold et Alii 1980). L'incertitude des processus d'innovation est donc encore plus profonde qu'il n'est souvent admis, car elle porte sur la possibilité même d'un retour sur investissement. En cas d'échec du processus d'innovation - comme dans le cas de l'avion TSR2 financé par le Gouvernement britannique (Law et Callon 1992), ou de la voiture électrique financée par Renault (Callon 1980b ²⁹³)- quel a été le retour sur investissement? En ce sens, on peut comprendre que les organisations - plutôt que le marché- soient porteuses de ce type d'investissement.

L'incertitude est généralement conçue comme une caractéristique de l'information. Selon les termes de Simon, l'incertitude, et donc la rationalité limitée des décideurs repose sur l'incomplétude (imperfection de l'information, plus ou moins perfectible) et sur la capacité limitée de traitement de l'information, de la part du décideur. Un tel cadre restreint de façon inacceptable la compréhension de la

²⁹² Nous avons noté que le travail d'évaluation et de classement de l'information revêt trois modalités : l'externalisation, la mobilisation et l'élaboration.

²⁹³ Callon, M. (1980) "The State and technical innovation: a case study of the electrical vehicle in France" in: Research Policy, Vol 9, pp. 358-376.

nature de l'incertitude qui se joue dans les processus d'innovation. L'incertitude n'est donc pas uniquement un état de méconnaissance du monde, ou une limite cognitive dans la capacité de traitement du monde, mais un type de rapport au monde: les acteurs, en innovant, génèrent une forme d'incertitude, une forme de flexibilité de l'état futur du monde, ils rendent possibles des opérations qui ne l'étaient pas. C'est seulement à la fin du processus, ex -post - après la diffusion, lorsque la forme de l'innovation sera fixée - qu'il sera possible de qualifier le degré de flexibilité dynamique (équipement flexibles) et/ou statique (décision d'adoption) du produit ou du procédé résultant du processus de création technologique (Cohendet et Llerena 1989).

Les processus d'innovation ne peuvent être simplement compris comme des espaces de négociation et de décision: ce sont également des espaces de création collective et d'accumulation. Les controverses et débat s'accompagnent d'allocation, de mobilisation, de création de ressources. Tout processus d'innovation est donc également un processus d'investissement, et c'est ce qui le rend stratégique du point de vue de la firme. Parce que toute innovation est un processus d'investissement, elle tend à suivre une stratégie et à mettre en œuvre une logique de capitalisation. Nous utiliserons le terme investissement pour évoquer une action de la firme consistant à détourner des ressources de la production - en renonçant par conséquent à valoriser celles-ci sous une forme immédiatement rentable - de façon à se transformer et obtenir un gain futur. Dans le cas de l'innovation, la transformation est recherchée par l'intermédiaire de la formation d'un espace d'innovation - par dilatation du temps et de l'espace - et création d'une nouvelle technologie, dont il est attendu une modification de la fonction de production (Atkinson et Stiglitz 1969). Il en résulte que cet espace est justiciable d'une analyse économique d'efficacité.

2) Investissement innovatif: penser le changement micro-économique

“La traduction exige un coût: temps nécessaire pour recomposer les liens entre les deux répertoires, invention de traducteurs, entrée dans le double langage. Une irréductibilité trop grande entraîne l’abandon de la traduction” (Dodier, 1990, p. 144²⁹⁴).

Dans un cadre d’investissement classiques, Arrow et Fisher (1974²⁹⁵) et Henry (1974²⁹⁶) ont montré que pour maintenir la pertinence du modèle standard dans les situations d’incertitude, y compris lorsque la rationalité des agents est de type ‘optimisatrice’, il est indispensable d’introduire une condition supplémentaire de réversibilité. L’incertitude tend à créer une condition favorable à la mise en place d’irréversibilité. De plus, dès lors qu’une certaine spécificité des ressources est postulée, la question de l’irréversibilité se pose (Favereau 1989c, 1991²⁹⁷). La localisation suppose au sens stricte l’irréversibilité dans la mesure où le marché de biens d’occasion ne peut fonctionner que sur la base d’une certaine genericité. Il est donc nécessaire d’introduire une condition supplémentaire de genericité, si l’on souhaite maintenir la validité du modèle standard. La spécificité crée une condition favorable à l’introduction d’irréversibilités.

Dans le cadre de l’innovation, l’ensemble de cette logique se trouve totalement renversée. Il faut comprendre l’incertitude ici non pas comme une information manquante sur une série d’options entre lesquelles il faut choisir, mais comme une incertitude liée au fait que plusieurs acteurs, porteurs d’interprétations différentes de l’innovation sont amenés à coopérer au même processus de création. L’incertitude ne porte plus fondamentalement sur les options existantes mais sur l’orientation du processus négocié dont l’aboutissement est la création technologique. L’incertitude tient à la multiplicité des points de vues et des acteurs: en ce sens, elle forme une condition favorable à la réversibilité. Le problème central des acteurs de l’innovation n’est donc pas l’irréversibilité, mais la réversibilité: comment accumuler des éléments stables en univers incertain?

Il nous semble indispensable de définir l’investissement et d’envisager une conceptualisation de l’investissement innovatif afin de répondre à cette question.

Investissement et fonction de production

²⁹⁴ Dodier, N. (1990) “Représenter ses actions. Le cas des inspecteurs et des médecins du travail” in: Pharo, P., Quéré, L. (eds) *Les formes de l’action*. EHESS, pp. 115-148.

²⁹⁵ Arrow, K., Fisher, A (1974) “Environmental preservation, uncertainty and irreversibility” in: *Quarterly Journal of Economics*, May 1974, pp. 312-319.

²⁹⁶ Henry, C. (1974) “Investment decisions under uncertainty: The irreversibility effect” in: *American Economic Review*, Vol 64, Decembre 1974, pp.1006-1012.

²⁹⁷ Favereau, O. (1989c) “Valeur d’option et flexibilité: de la rationalité substantielle à la rationalité procédurale” in: Cohendet, P., Llerena, P. (1989) (eds) *Flexibilité, information et décision*. Economica. Pp.120-182; Favereau (1991) “Irréversibilités et institutions” in: Boyer et Alii (eds) op cit. pp.69-96.

Dans ce qui suit, nous proposons de considérer l'existence d'une multitude de forme d'investissement, s'inscrivant dans un continuum allant de la consommation à la création d'une nouvelle technologie. Dans le cas de la consommation, ou de l'acquisition d'une technologie bien maîtrisée, l'objet technique est un bien dont les conditions de production et d'utilisation sont parfaitement réglées. L'objet constitue une véritable boîte noire, dont l'acquéreur n'a pas à connaître ni les conditions de production, ni le fonctionnement. Son utilisation n'implique de son côté pas de rupture dans les compétences et les qualifications existantes, et s'inscrit naturellement dans une série d'interdépendances technologiques stabilisées. Il est alors sujet à un investissement faisant appel à un calcul rationnel. La simple évocation des conditions nécessaires dans lesquelles un investissement peut faire l'objet d'un calcul rationnel indique la nature du travail d'investissement à réaliser pour qu'une nouvelle technologie soit inscrite dans une fonction de production et soit l'objet d'une première utilisation localisée. Les conditions de production et d'utilisation doivent être définies et stabilisées. Tant du point de vue des concepteurs, des producteurs que des utilisateurs, la nouvelle technologie introduit des ruptures dans les compétences et les qualifications existantes, et provoque des tensions avec la base installée, ruptures et tensions conduisant à des arbitrages autant qu'à des apprentissages.

L'investissement peut être défini comme l'*action d'engagement d'un actif 'éphémères dans un actif durable'* (Thévenot 1985). Selon cette définition, l'investissement constitue donc primordialement un effort de stabilisation, de fixation d'une relation entre des ressources et des produits permettant "l'immobilisation": "*Nous avancerons que c'est cette fixation qui permet l'immobilisation d'une relation reproductible, entre certaines formes d'inputs et d'output*" (Thévenot 1985, p. 26). Investir consiste à construire ce que nous appelons les *conditions de production* de l'output, en liant celui-ci à une série de *ressources* et à un *processus de production*. Mais la création d'une relation et des conditions de production ne suffisent pas. Investir revient aussi à stabiliser cette relation, à la fixer, à l'immobiliser de manière à ce qu'elle devienne reproductible. La définition 'classique' de l'investissement saisit donc un élément essentiel du processus en le qualifiant d'*immobilisation*. L'investissement est en ce sens le processus de création d'irréversibilité par excellence.

Dans les cas d'investissements 'classiques', l'établissement durable d'une relation entre input et output s'articule autour de deux modes principaux d'action.

Premièrement, comme le soulignent les modèles classiques, l'investissement est un acte de sélection et d'acquisition d'un capital sur le marché. Cette approximation est acceptable dans la mesure où le facteur travail est généralement déjà en place dans la firme.

Deuxièmement, comme l'ont montré les conventionnalistes, l'investissement constitue un mécanisme de mise en cohérence - mise en équivalence - et d'articulation des différents facteurs intervenants dans la fonction de production (Eymard-Duvernay et Thévenot, 1983; Thévenot 1985²⁹⁸). “*Cet investissement ne se réduit pas à la forme matérielle de la machine car elle impose la standardisation, la définition des normes, la codification des formes de ces inputs ou output*” (Thévenot 1985, p. 26). L'efficacité de la production dépend en effet de la mise en place d'une série d'outils de médiation (Silvestre, 1985²⁹⁹) permettant d'articuler des ressources ‘brutes’, ‘hétérogènes’. Un exemple saisissant est ce qu'il est convenu de nommer les instruments de gestion - ‘normes, standards, règlements, conventions, contrats, qualification, marques..’ (³⁰⁰)- indispensables au fonctionnement efficace des équipements, et dont le taylorisme ou le toyotisme ont fourni des exemples édifiants.

Tout investissement vise donc à stabiliser les *conditions de production* d'un output. Cela passe par l'identification, l'acquisition, et la coordination des ressources de manière stable au sein d'une fonction de production. La question de la coordination se situe au cœur de toute logique d'investissement. Il suffit en effet de penser à une entreprise investissant dans un outil pour lequel elle ne disposerait ni des compétences, ni des normes lui permettant d'en tirer profit pour se convaincre du bien fondé de cette position. Celle-ci se trouverait dans une situation proche de celle des pompiers de New York et Washington décrits par David (1987), venus en renfort et rendus totalement inefficaces parce que la section de leurs tuyaux ne pouvait se raccorder aux bornes à incendie de la ville de Baltimore. Pour que l'investissement soit efficace, il doit inscrire l'objet technique dans des *conditions d'usage*. Il ne s'agit donc pas d'immobiliser uniquement la machine, mais d'investir de manière à ce que l'équipement, les ‘ressources’ mobilisées et les produits fabriqués soient coordonnés et correspondent aux objectifs de l'entreprise. L'investissement efficace comprend donc une série d'outils, d'apprentissages, de formations, d'instruments de mesure qui permettent à la machine de trouver son efficacité spécifique au sein de la firme.

Retenons une définition de l'investissement élargie, qui ne se limite pas à l'acquisition d'un équipement prêt à l'emploi ou à la décision d'allocation d'un budget. L'investissement est un processus de construction de l'efficacité productive d'une installation. La définition fournie par Thévenot (1985) ouvre

²⁹⁸ Thévenot, L. (1985) “Les investissements de forme” in: *Cahiers du CEE*, n°29, pp. 21-71.

²⁹⁹ Silvestre, JJ. (1985) “Qualification et entreprise: Quelques réflexions en vue d'un renouvellement théorique” in: Salais, R., Thévenot, L. (eds) *Le Travail: marchés, règles, conventions*. Economica. Pp. 107-118.

³⁰⁰ Midler, C. (1986) “Les concepts au concret: révision sur les liens entre systèmes techniques et systèmes de gestion dans l'industrie automobile” in: Salais, R., Thévenot, L. (eds) *Le Travail: marchés, règles, conventions*. Economica. Pp. 29-50. La fonction de production néglige les instruments de gestion, indispensable à la mise en ‘cohérence’ des ressources de l'action.

la porte de l'investissement à toute sorte d'êtres, (standardisation, engagement moral, convention..) jusque là laissés à la porte de l'économie au profit des 'équipements'. L'investissement ne se résume pas à ces 'produits' mais consiste en un *processus de mise en cohérence* ⁽³⁰¹⁾, d'articulation de ces diverses 'ressources' en un tout fonctionnant de façon performante. La définition des équipements techniques intègre cette construction au cœur de leurs caractéristiques. Le processus d'investissement est, en ce sens, un effort de mise en équivalence et de mise en cohérence d'un objet technique avec son contexte de production (faisabilité) et d'usage (valeur) (Eyraud et Alii 1988). Cette mise en équivalence s'effectue de façon privilégiée par la mise en place *d'objets complémentaires* (élaboration des outils de gestion, équipements et objectivation, des instruments de mesure, des règles d'organisation, des outils de coordination permettant à l'objet technique d'atteindre une efficacité dont le domaine de validité est variable.

Espace d'innovation et processus d'investissement innovatif

Nous définirons donc l'investissement comme l'engagement d'un certain nombre d'actifs hétérogènes (i.e. pas ou peu compatibles ou non intégrés) et s'efforçant (1) de les transformer (2) de créer les outils permettant de les lier les uns aux autres de manière stabilisée (3) de donner à cet ensemble un certain domaine de validité ou de performance. L'ensemble des objets intermédiaires et des ressources produites, tant en ce qui concerne les conditions de production que les conditions d'utilisation, s'inscrivent dans une logique cumulative propre à chaque investissement.

La fertilisation croisée du concept d'espace d'innovation - comme espace de construction locale d'une dynamique et d'une rationalité collective (Ponssard et Tanguy, 1993 ³⁰²)- et d'une définition élargie de l'investissement- permet de penser le processus d'innovation. Le processus d'innovation devient l'archétype de l'investissement, dont 'les investissements classiques' ne sont que l'extension, la diffusion, la re-production. Au cours de ce processus, l'investissement vise à l' 'immobilisation' (ou stabilisation) d'une fonction de production. En outre, l'espace d'innovation forme le lieu dans lequel sont élaborées à la

³⁰¹ Thévenot tend à privilégier la convergence comme mode de coordination. Cette approche par la 'standardisation' n'est évidemment pas la seule voie: Cohendet, P. Llerena, P. (1990) "Nature de l'information, évaluation et organisation de l'entreprise" in: *Revue d'Economie Industrielle*, n°51, 1er trimestre, pp. 141-165. Eymard-Duvernay, F. (1987) "Les entreprises et leurs modèles" et Boisard, P. Letablier, M.T (1987) "Le camembert: normand ou normé. Deux modèles de production dans l'industrie fromagère" tous les deux in: 'Entreprises et Produits', *Cahiers du CEE*, n°30, p.v à 29 .

³⁰² Ponssard, JP., Tanguy, H. (1993) "Planning in Firms as an Interactive Process" in: *Theory and Decision*, Vol 34, pp. 139-159. Décrivent un modèle de construction processuelle, interactive et locale de la rationalité collective à travers l'élaboration - incrémentale - d'un plan. Le plan agit comme l'incarnation locale d'une théorie de l'action radicalement incomplète progressivement retravaillée par les interactions entre acteurs.

fois les conditions de production et de re-production de l'objet technique et le contexte nécessaire à son fonctionnement. En ce sens l'activité est située (³⁰³) mais vise une généralité.

Nous proposons d'analyser l'investissement innovatif selon deux dimensions : la spécification et la localisation.

L'innovation est un processus de transformation de la fonction de production (Gaffard 1990). En fonction de l'arbitrage posé entre continuité et discontinuité, les acteurs de l'innovation se trouvent plus ou moins en mesure de mobiliser et de détourner des moyens de production de fonctions de production existantes. Comme le note Gaffard (1990), y compris dans les cas où la mobilisation des ressources existantes est forte, la création technologique impliquée par l'innovation se traduit par la spécification progressive de ces ressources, par leur articulation singulière. Le processus d'investissement prend place dans un cadre d'action confiné, un *espace d'innovation*, et par conséquent, ses conditions de production et d'usage, les objets de médiation, sont construits en même temps que l'objet technique autour duquel l'espace est articulé.

L'espace d'innovation est doté en ressources réunissant les conditions de production de l'objet technique. L'espace d'innovation est un *microcosme* dans lequel sont progressivement produites, mobilisées et mises en formes les ressources nécessaires à la production de la solution technique et à son usage. Ainsi que nous l'avons noté, l'élaboration de l'objet technique emprunte à la fois des éléments extérieurs et procède à la création ou à la mise au point d'autres éléments. Cette dimension créative se traduit par un travail d'élaboration conjoint des différents aspects de l'innovation - 'milieu' et 'objet technique' - passant par des détours d'investissements longs et tâtonnants.

L'espace est soumis à des exigences de performance et de coordination. Ainsi que nous l'avons noté, la coordination des acteurs de contexte et de l'innovation met en œuvre une série d'épreuves et de gages prenant généralement la forme d'objets intermédiaires et de représentations collectives (Callon et Law 1989). L'objet technique connaît différents stades d'élaboration. Typiquement, ces chaînes d'actions s'accompagnent de la mise au point de représentations et d'objets de médiation. En ce sens, l'innovation est l'objet d'un surinvestissement autorisé par le caractère contrôlé - in vitro- de l'espace d'innovation.

³⁰³ Voir Norman, D. (1993) "Les artefacts cognitifs" in: Conein, B., Dodier, N., Thévenot, L. Les objets dans l'action. EHESS pp. 15-34.). Suchman, L. (1988) "Representing practice in cognitive science" in: Human Studies traduction française dans Pharo, P. et Quéré, L. (1990) *Les formes de l'action*. EHESS.

L'investissement innovatif est nécessairement anticipatoire par rapport à l'usage réel - ou même aux multiples usages - qui sera fait de l'objet technique. Etant donné que l'objet technique et la fonction de production n'existent pas nécessairement au début du processus, ses conditions d'usage doivent être anticipées. Le cas le plus radical étant celui dans lequel les utilisateurs n'existent pas encore au moment de la mise au point de l'innovation. C'est en ce sens que Akrich parle de l'inscription d'un scénario d'usage dans les caractéristiques des objets techniques (Akrich 1987).

Les acteurs de l'innovation sont amenés à agir à un double niveau. Ils vivent une situation schizophrénique liée à la nécessité de tenir les deux bouts de la construction d'une cohérence et pertinence locale - liée aux conditions singulières de l'espace et du processus d'innovation- , et de tenir le contexte global qui permet d'assurer la remontée en généralité - les conditions de reproduction 'autonome' de l'innovation comme produit -.

Dans les cas les plus radicaux de création technologique, les acteurs ne viennent pas avec des objectifs bien définis auxquels ils cherchent à plier la réalité. Ils ne disposent pas, le plus souvent, de critères 'objectifs' prêts à l'emploi pour évaluer l'harmonisation des fins et des moyens. Une partie de l'activité est donc dédiée à la fabrication de celles-ci. Ils sont amenés à prendre les problèmes à bras-le-corps, et de les traiter en s'en mêlant plutôt qu'en général. L'innovation, lorsqu'elle s'exerce dans ce cadre radicalement incertain constitue par conséquent une figure limite de la théorie de l'action, dont Thévenot reconnaît qu'elle échappe à une analyse économique de la grandeur (Thévenot, 1990), aucun sens ne pouvant être donné en principe à l'action. La remontée en généralité, et l'identification est construite en cours d'action, et *a-posteriori*. Ce cadre offre une place considérable aux interactions et aux pratiques, aux ajustements de proche en proche.

La seconde dimension de l'investissement innovatif tient à sa localisation. Nous entendons par localisation le fait que la création technologique ne se déroule pas dans un vide économique, mais est à l'inverse inscrite dans un territoire économique. La dimension de ce territoire et son identification varie d'un processus de création technologique à l'autre. Mais le plus généralement, d'après les études de cas dont nous avons connaissance, la création technologique vise la réalisation d'une première installation productive, le plus souvent liée à une utilisation localisée dans un périmètre identifié. Hughes (1983) explique ainsi qu'Edison visait dans un premier temps la production d'une centrale et d'un réseau d'éclairage destiné au quartier new yorkais de Wall Street.

La localisation de l'investissement innovatif constitue une dimension indispensable à la création technologique. La localisation assure le passage du virtuel au réel, de l'intention à la matérialisation. En ce sens elle constitue une épreuve justifiant une série d'ajustements pour 'coller à la réalité'. La matérialisation permet d'envisager à la fois l'identification des producteurs, des concepteurs et des utilisateurs et de les mettre en relation, et de mesurer l'efficacité et les performances de la fonction de production. Ainsi que l'ont noté Thévenot (1985) et Latour (1989), la matérialisation, l'objectivation de la fonction de production permet seule l'immobilisation, la stabilisation d'une série de relations autour de l'objet technique. L'immobilisation autorise la stabilisation des ressources et leur accumulation, la définition et l'accumulation de dispositifs de leur mise en forme. La matérialisation de l'objet technique, la formation d'un capital humain sont indissociables de leur inscription dans un territoire localisé. La localisation ouvre donc un cycle d'accumulation, de création d'irréversibilités.

En conclusion notons que l'investissement innovatif a pour fonction de stabiliser une fonction de production. Du fait de l'incertitude radicale entourant les situations d'innovation, les ressources formant la fonction de production transformée sont spécifiées en bonne partie dans le processus d'innovation lui-même (Gaffard 1990b ³⁰⁴). Cette spécification passe à la fois par une élaboration et par une mise en cohérence des ressources par rapport à une échelle de performance et des objectifs productifs. La spécification s'articule étroitement à une localisation de l'investissement permettant d'envisager l'identification, la stabilisation et l'accumulation des moyens de production. Les processus d'investissements se caractérisent par *une logique d'investissement* relative à la qualité des liens tissés entre les différentes ressources de l'innovation et lisible dans la forme des objets intermédiaires. Cette qualité se décline selon deux dimensions: le degré de stabilité (durabilité ou solidité des liens) et le domaine de validité (utilisateurs) de l'investissement (Thévenot 1985).

3) Apprentissage localisé

“Nous découvrons l'action au fur et à mesure que nous devons négocier les accidents de terrain, négliger tel revers de fortune ou le prendre en considération” (Thévenot, 1990, p. 48)

La logique d'accumulation est très étroitement articulée à une dynamique d'apprentissage localisée prenant place dans le cadre de l'espace d'innovation. Les exercices de problématisation et de simplification, autant que la forme de l'engagement définissent ainsi le cadre dans lequel les connaissances sont articulées.

³⁰⁴ Rappelons la citation de Gaffard à propos de la spécification des ressources “L'enracinement de la technologie dans un milieu donné veut dire que la spécificité des ressources est un caractère acquis dans des processus qui se sont déroulés dans le milieu même et qui en représentent une histoire particulière” (Gaffard 1990b p. 345)

Gaffard (1990) propose de considérer les processus d'innovation comme des phénomènes d'apprentissages localisés (³⁰⁵). L'espace d'innovation trace une frontière entre ce qui précède et ce qui suit et établit une forme de continuité- discontinuité technologique. Le processus d'innovation ne peut prendre sa valeur que dans la mesure où il transforme la fonction de production. En ce sens, les processus d'innovation constituent des processus d'apprentissage au sens fort, puisqu'ils portent non seulement sur les connaissances, mais sur leur dynamique d'accumulation.

Une difficulté à penser les processus d'apprentissage tient traditionnellement en économie, à l'étude de l'information. Malgré les injonctions d'Hayek (1937 ³⁰⁶), ce n'est que récemment que les économistes ont commencé à étudier les connaissances. Pourtant, ainsi que le note Thévenot (1996), l'information n'est qu'une forme ultime, particulièrement codifiée de connaissance, un cas limite: "*nous serons toujours réticents à nous aligner sur le traitement des connaissances qu'implique l'utilisation courante de la notion d'information en économie. Transformant en un flux de marchandise, ce qui relève d'opérations cognitives situées, la traduction de connaissances en informations présuppose des représentations et des codes de connaissance commune*" (³⁰⁷)(Dasgupta, David 1994, Foray 1993 ³⁰⁸).

La multitude des approches de l'apprentissage est édifiante. Parmi elles, la piste consistant à considérer la 'fonction d'apprentissage' comme une propriété autonome des organisations ne nous semble pas constituer une piste très éclairante (Hatchuel 1994, 1996, 1997). A l'inverse, l'apprentissage nous paraît intimement lié à l'activité et à la dynamique des relations qui s'établissent entre acteurs. Hatchuel et Weil (1992), dans leur étude originale sur les systèmes experts ont constaté les difficultés dans l'application d'un paradigme purement cognitif de l'activité. Hatchuel (1994, 1996, 1997 ³⁰⁹) défend l'idée d'une imbrication intime des savoirs et des relations entre acteurs, et condamne à l'échec toute tentative d'appréhension autonome de chacune de ces sphères: "*La connaissance doit donc toujours être posée en posant implicitement les règles de son utilisation*" (Hatchuel et Weil 1992, p. 43).

³⁰⁵ Kline, S., Rosenberg, N. (1986) "An Overview of Innovation" in: Landau, R., Rosenberg, N. (eds) *The Positive Sum Strategy*. National Academy Press. pp. 275-305.

³⁰⁶ Hayek, F. (1937) "Economics and Knowledge" in: *Economica*, February 1937, pp. 33 -54.

³⁰⁷ Thévenot, L. (1996) "Formes de 'savoir collectif' et régimes d'ajustement des actions. Coordination par jugement commun et connaissances distribuées" in: Reynaud B. (ss dir.) *Les limites de la rationalité*. Colloque de Cerisy. Ed La Découverte.

³⁰⁸ Foray, D.(1993) "Autour de l'apprentissage organisationnel et de l'économie du savoir" in: *Revue d'Economie Industrielle*, n°65, 3ème trimestre, pp. 96-100.

³⁰⁹ Hatchuel (1997) "Expertise et compétence au travail. Formes de savoir et organisation de l'action collective" in: CGS-Ecole des Mines de Paris Unpublished Paper.

Les situations d'innovation interrogent particulièrement les conceptions abstraites de la cognition, puisque comme le note Gaffard et Amendola (1988) l'innovation se déploie d'autant plus volontiers dans un espace de liquéfaction des réseaux existants, et que selon l'analyse éclairante de Frankel (1955), elle contribue à radicalement dévaluer l'information conçue comme une commodité par l'intermédiaire du très menaçant mécanisme d'obsolescence. Il paraît donc incontournable de remonter en amont de l'information, à la dynamique de formation des connaissances et des savoirs, rendant tout à la fois possible et située ou localisée, son utilisation. Dans ce qui suit, nous allons montrer que la dynamique d'apprentissage se confond étroitement avec le processus d'innovation. Elle épouse les vicissitudes des aller retour entre actions et représentations de l'action.

Processus d'innovation et apprentissage

“La notion d'apprentissage est inhérente à l'action: il n'y a pas d'action réelle qui serait pure mise en oeuvre d'un savoir préalable. Toute action reconstruit les savoirs qui lui sont nécessaires.” (Hatchuel 1996, p. 105).

Les situations d'innovation forment un terrain privilégié d'analyse des phénomènes d'apprentissage. La création technologique se fonde sur l'introduction d'une rupture dans l'ordre technologique. L'espace d'innovation s'ouvre avec l'identification d'une zone technologique à élaborer. Outre la définition du cadre structurel de l'action, la problématisation –simplification trace une frontière cognitive -cosmologique- correspondante entre le connu et l'inconnu, les zones à explorer et les zones à ne pas explorer (Callon 1980 ³¹⁰), entre les connaissances qui seront utilisées comme des boîtes noires (postulat) et celles qui feront l'objet d'investigations et d'hypothèses (Latour 1989). Dès l'ouverture de l'espace d'innovation, l'action et l'apprentissage sont donc dotés d'un cadre. La manière dont les acteurs définissent le problème en ouvrant l'espace d'innovation, les aspects qu'ils laissent résolument dans l'ombre, les connaissances qu'ils élèvent au statut de savoir acquis, entretiennent d'étroites relations avec l'orientation de l'activité, le recrutement des acteurs, la division du travail (Von Hippel 1990), les directions explorées.

Une seconde dimension importante se joue dans la forme de l'engagement passé entre les acteurs de contexte et les acteurs de l'innovation. Selon la thèse développée par Hatchuel (1994), la forme de

³¹⁰ Callon, M. (1980) “Struggles to define what is problematic and what is not. The sociologic of translation” in: Knorr, K. et Alii (eds) *The Social Process of Scientific Investigation*. Reidel.

l'engagement tend à définir ce que l'auteur nomme un *rapport de prescription*, associé à un certain degré d'autonomisation des acteurs de l'innovation. Comme le souligne Hatchuel, la cadre de l'action résultant de ce rapport contraint très directement l'étendu de l'apprentissage, et son organisation. On peut s'efforcer de visualiser deux cas extrêmes pour illustrer notre propos (³¹¹) :

Dans le cas où une forte autonomie est obtenue par les acteurs de l'innovation, typiquement un chef de projet est nommé, (Midler 1993) chargé d'incarner la logique collective de l'espace. Celui-ci se voit confié la responsabilité d'intervenir non seulement sur le contenu, mais également sur la cadre de l'action innovante devant aboutir à la production de l'objet technique et à une certaine performance technique et économique. Cela signifie qu'il peut être amené à identifier non seulement l'objet technique, le processus, les acteurs et les ressources permettant de produire l'innovation - conditions de production et d'usage - mais aussi d'en stabiliser durablement les relations et les performances. Le chef de projet peut se voir par ailleurs chargé des méta-conditions de production de l'objet technique, c'est à dire de la mise au point du plan et du cadre de l'action innovante. Cela comprend en particulier la nécessité de la mise en projet (calendrier et budget), le recrutement et la coordination horizontale et largement *ad hoc* du travail entre les acteurs de l'innovation (task partitionning' Von Hippel 1990), la définition de mécanismes d'auto-évaluation au fil de l'action et ex-post, la mise en place de dispositifs limitant l'étendue de l'élaboration. Cette situation correspond à la mise au point d'un plan très incomplet formé, déformé, reformé au fil de l'action et de la validation ou de l'invalidation des hypothèses, le long d'un processus où la formulation collective de l'objet technique et des principales hypothèses de simplification du monde représentent le cœur de l'apprentissage à réaliser. Dans ce schéma extrême, les acteurs du contexte sont essentiellement intéressés au résultat.

A l'autre extrême, un *principal* soumet un *agent* à des prescriptions fortes (Hatchuel 1996a). Le processus d'innovation se trouve dominé par la logique d'organisation. La singularité de l'innovation est gommée par l'inscription du processus dans une forme commune de mise en projet, pour laquelle l'organisation accumule centralement de l'expertise au fil des projets. L'innovation est soumise à des règles générales de gestion. L'espace se caractérise par sa forte structuration, par une logique de projet organisée autour des transactions entre acteurs de l'innovation et acteurs du contexte. Le principal met au point un plan détaillé de mise en projet de l'activité innovante, dans lequel les temps et les circulations d'objets et de personnes sont le plus étroitement précisés. Il définit, divise, organise l'espace d'innovation comme un cadre d'action 'confiné' (Hatchuel 1996). Il entre dans le détail des caractéristiques de l'objet

³¹¹ Hatchuel fournit d'excellentes explications des effets de différents type de prescription sur la forme de l'apprentissage (Hatchuel 1994, 1996, 1997). Nous esquissons simplement une transposition de sa thèse à notre cadre

technique, de ses conditions de production. A l'inverse, l'apprentissage de l'exécutant est orienté vers le contenu de l'action.

La mise en projet offre donc une nouvelle dynamique à l'apprentissage. Celui-ci s'organise autour d'une double logique : une logique de traduction des hypothèses en attributs et en caractéristiques réelles, et une logique d'ajustement et de résistance liée à la dimension pratique de la matérialisation.

La traduction matérielle des hypothèses formulées consiste en une incorporation progressive de ces hypothèses dans l'objet technique et dans son contexte de fonctionnement. Cette incorporation s'effectue singulièrement dans les arbitrages techniques réalisés ('trade-off' Dosi 1982). L'activité va consister à instrumenter, définir, réagir, tester, comparer "les coquilles", dans le cas de la baie de St Brieuc (Callon et Law 1989) pour qu'elles deviennent opérables dans une registre donné, pour qu'elles se transforment en produit dont on maîtrise la longue chaîne d'intermédiaires, pour qu'une identité stable puisse leur être attribuée.

L'un des éléments marquant de la matérialisation est sa dimension pratique, imposant la remise en cause fréquente des hypothèses, ou l'emploi d'ingéniosité destinée à maintenir les hypothèses et à contourner les obstacles. Il est utile de noter que les connaissances technologiques développées dans le cadre des processus d'innovation sont fondamentalement incomplètes et souvent hypothétiques. La tendance consiste à élaborer des connaissances plus précises sur les points de difficultés et de résistance.

Il n'est pas question d'adopter un point de vue déterministe sur l'orientation de l'activité innovante. Dans les situations d'innovation, le cadre est toujours susceptible d'évolution et de remise en cause. L'espace d'innovation offre la possibilité d'ajustements localisés. Au fil des épreuves d'évaluation, la délimitation des frontières peut être l'objet de modification ad hoc au fil du déroulement de l'action. Comme le note Latour (1989) le maillon le plus faible de la chaîne en voie de constitution peut à tout moment faire rebondir la dynamique et réorganiser le jeu, y compris la forme de l'engagement négociée. La délimitation de frontières joue le rôle de formulation d'hypothèses, elle propose une orientation aux investigations, qui facilitent l'exploration, et permettent leur progressive reformulation, un effort pour les compléter, et le repérage d'anomalies dont le rôle est tout à fait essentiel dans la reformulation éventuelle du cadre cognitif de départ. Néanmoins, les processus d'innovation prennent volontiers l'allure d'aller-retour de plus en plus focalisés et rigides, une fois les premières hypothèses fondatrices jugées

conceptuel.

satisfaisantes et incontournables. La mise en projet tend à définir les limites de l'exploration dans le temps, dans l'espace, en terme de ressource. C'est à ce prix que le processus trouve une fin (Hatchuel 1996).

Les connaissances forment la charnière de la dialectique de l'action innovative, laquelle oscille entre action et représentation de l'action, entre production de connaissance et évaluation de celles-ci . Elles sont élaborées dans une dynamique exploratoire et progressivement validées dans les exercices de jugement et les épreuves. Comme le notent David et Foray (1996), la connaissance forme alors une chaîne dans laquelle les connaissances validées nourrissent de nouvelles explorations: le savoir constitué est l'input de nouvelles investigations. Les épreuves de validation, intimement liées à la construction de représentations (Dodier 1990, 1993³¹²), forment également des moments essentiels de mise en commun, de confrontation, d'hybridations mutuelles des points de vue des acteurs (Suchman 1988, Hatchuel 1994, 1996). Ces mécanismes de remontée en généralité, d'interrogation des acteurs sur le sens de leurs pratiques, scellent à la fois le contour des frontières et l'identité collective.

Cette dimension duale des processus d'innovation éclaire, selon le mot de Thévenot (1996) "*le caractère collectif de ces connaissances et leur relation avec des compétences impliquées dans l'action*". Les lieux de mise en commun et d'évaluation offrent l'occasion de coordonner les actions, *d'ajuster "les conduites avec un environnement comportant d'autres acteurs mais aussi des objets"*, mais aussi de se doter d'outils de transaction (objets intermédiaires), d'objets et de critères d'évaluation et de support à la coordination de l'action (Callon et Law 1989). Ces outils forment alors autant de repères collectifs (Suchman 1988): "*ceux-ci se prêtent à des agencements d'actions à distance, à des rapprochements de large portée. Ils présentent en outre l'avantage d'être ouverts à une dynamique de révision des repères communs et ils guident un certain type d'apprentissage collectif*" (Thévenot 1996).

Activité innovative et rapport pratique au monde

Les processus d'innovation ne sont réellement appréhendables que situés en dynamique, dans un contexte d'action. Paradoxalement, en dépit du fait que la technologie ressortit inévitablement d'une dimension pratique et d'un art du bricolage, les théories de l'innovation ignorent dans leur grande majorité l'importance de ce facteur. Cette intimité repose sur des ajustements de proche en proche (Thévenot, 1990) s'articulant autour d'une économie de *l'accommodement et de la résistance* (Pickering, 1995)

³¹² Dodier, N. (1990) "Représenter ses actions" op cit. et Dodier, N. (1993) "Les arènes des habiletés techniques" in: Conein, B. Dodier, N., Thévenot, L. (eds) *Les objets dans l'action. De la maison au laboratoire*. EHESS, pp. 115-140.

surgissant de façon imprévisible de l'entremêlement improbable des hommes et des objets dans les pratiques d'innovation. Cette modalité de l'action collective échappant partiellement à une *économie de la grandeur* et à une *représentation* cohérente est caractéristique de certaines situations, sans pour autant constituer le cas général. Fort heureusement, il est des moments où lorsque l'on allume son ordinateur, celui-ci se comporte de manière tellement prévisible qu'il n'est nul besoin pour l'utilisateur de connaître les détails de ce qui fait sa technologie, et de remonter vers ses conditions de production. Pas besoin d'être un spécialiste de l'électronique pour dactylographier un texte. Comme le souligne Latour (1989), il est possible pour l'utilisateur dans de telles conditions de prévisibilité et de stabilité de comportement de considérer celui-ci comme une boîte noire. Comme le note Thévenot, l'utilisateur peut avec une certaine confiance, se rendre dans un magasin et procéder à l'acquisition d'une telle boîte noire avec une compétence très faible vis à vis des conditions de production de l'article dont il va devenir propriétaire, et en concentrant son attention presque exclusivement sur les prix. Pourtant, l'exemple de l'ordinateur illustre bien le point limite que constitue cette situation de confiance anonyme, et la diversité phénoménale des relations établies entre ordinateurs et utilisateurs (³¹³) que l'on voit parfois unis sous le terme englobant de 'marché'.

La pratique est une source essentielle d'incertitude accompagnant toute innovation et cela tient au fait que celle-ci est au moins partiellement irréductible à l'intentionnalité, à la représentation, à la causalité, à l'univers bien ordonné parce qu'aisément ordonnable de la raison: "*history cannot be defined by a simple rearrangement of factors. History is not created from already made ingredients. To avoid the jangling of combinations, the atomism of factors, we must thus recognize in every compound, in every concrecence, something more, some radical and unique capacity for innovation - and to do so we must accept the fact that events, to deserve their name, are in part without cause*" (Latour, 1996, p.88). Au niveau de la pratique, au moment où Pasteur découvre la levure de l'acide lactique, l'existence de celle-ci est paradoxalement liée aux actions du chercheur et les actions de Pasteur sont radicalement liées au comportement observable de la levure qu'il cherche à 'apprivoiser'. Dans le problème devenu classique (Bijker et Al 1987) de la clôture ou stabilisation de l'innovation, nous avançons que la dimension pratique joue un rôle considérable: le succès pratique valide et encourage certaines représentations, il légitime et solidifie les liens dont est fait l'objet technique et les hypothèses sur lesquelles il repose.

³¹³ Les 'Hackers' représentant la figure extrême de l'utilisateur averti et actif dans la construction même de l'ordinateur, le novice se situant à l'autre extrémité de l'échelle. Les utilisateurs gagnent en compétence et en degré de liberté par rapport à l'outil en se rapprochant toujours plus de ses conditions de production - c'est à dire en défaisant le statut de boîte noire de l'objet. Les situations de dysfonctionnement ouvrent un espace du bricolage et de la pénétration de la boîte noire.

Lorsque les acteurs humains après une série d'ajustements, commencent à avoir prise (ou que l'objet technique donne prise) sur la dimension matérielle de l'innovation, ils se trouvent en mesure de prédire et de représenter certaines relations de cause à effet et de justifier leurs positions. Des épreuves peuvent alors être organisées pour sceller la validité de certaines médiations. Lorsque les épreuves se déroulent et que les prises se révèlent fragiles, la position des acteurs est aussi sérieusement menacée que celle de l'innovation.

Chapitre 3:

Deux exemples d'élaboration de la technologie d'injection de charbon

“The most persistent difficulty in the scientific study of deviant behavior is a lack of solid data, a paucity of facts and information on which to base our theories. I think it as a truism to say that a theory that is not closely tied to a wealth of facts about the subject it proposes to explain is not likely to be very useful. Yet an inspection of the scientific literature on deviant behavior will show that it assays a very high proportion of theory to fact” (Becker, 1963, p. 165).

Le troisième et dernier chapitre de cette seconde partie propose au lecteur d’entrer dans le vif des phénomènes de création technologique tels qu’ils se sont déroulés au sein de deux entreprises, l’une française et l’autre japonaise, autour de la création de technologies d’injection de charbon au haut fourneau. La présentation de ces deux histoires singulières d’innovation offrent à la fois une illustration de la singularité inhérente à chaque processus de création technologique, dont il ne peut être rendu compte qu’en prenant en considération les conditions locales de leur production, et mettent en lumière l’hétérogénéité et de la diversité des points composant une trajectoire technologique. La trajectoire apparemment lisse, continue et bien identifiée de la technologie d’injection de charbon telle qu’elle a pu nous apparaître dans la première partie de cette thèse va se révéler être le résultat institué d’une multitude de micro-innovations hétérogènes et largement discontinues dont les deux processus suivis ne sont que deux exemples.

Nous allons suivre la lente construction de deux *espaces d’innovation* ayant posé la question de la continuité -discontinuité de manière radicalement différente, en pliant selon deux logiques contrastées, le même espace technologique de départ. A partir des éléments de théorie de l’innovation esquissés jusqu’ici, nous allons pouvoir mettre en lumière des faits inédits jusqu’ici, totalement masqués par le caractère global et lisse de l’approche. Le regard posé diffère radicalement et contribue à offrir une nouvelle vision, plus intime, de l’innovation en train de se faire. L’on y décrit les acteurs aux prises avec les difficultés de la création technologique, en proie aux doutes et aux interrogations, en prise avec leur organisation.

Il ne s’agit pas pour nous de comparer deux entreprises, française et japonaise, mais de comparer deux processus ayant pris place symétriquement au sein de ces deux entreprises. A ce titre, nous nous sommes efforcés de ne mobiliser les éléments des cadres institutionnels différents dans lesquels les deux

histoires se sont déroulées, que dans la mesure où ceux-ci étaient intervenues directement, de façon centrale, dans l'orientation des processus de création technologique.

1) épistémologie, méthodologie

Avant de passer à la description des espaces d'innovation et des cas étudiés, il est bon de préciser en quelques mots le statut des données recueillies et l'approche méthodologique utilisée aussi bien dans leur recueil que dans leur traitement. Contrairement aux analyses du chapitre 1, reposant essentiellement sur des statistiques et une approche quantitative, les analyses qui suivent reposent sur une approche essentiellement qualitative (³¹⁴). Nous avons mené deux enquêtes parallèles au sein d'une entreprise française et d'une entreprise japonaise ayant mis en oeuvre simultanément la nouvelle technologie PCI au début des années 80, c'est à dire au moment du lock-out du fuel, et du développement progressif du charbon. Les deux entreprises retenues ont été parmi les toutes premières à explorer la piste du charbon à cette période, et ont par conséquent joué un rôle actif, comme nous le verrons, dans le développement de cette technologie et sa standardisation.

L'enquête à proprement parlé s'est étalée sur 8 mois, pendant lesquels une quarantaine d'entretiens qualitatifs d'une durée moyenne d'une heure et demi ont été organisés avec les acteurs impliqués dans le processus d'innovation. De nombreux documents internes ont également pu être consultés, et une série de réunions de synthèses ont régulièrement ponctué l'opération. Reste que malgré une enquête longue et de nombreux entretiens, certaines zones d'ombre n'ont pu être totalement éclaircies, en particulier sur les détails du processus de décision suivi dans le cas de la première installation de l'entreprise japonaise. La reconstitution s'est donc appuyée essentiellement sur les entretiens, sans que nous ayons été en mesure de croiser, par nous même, ces informations avec un épiluchage des archives de la société J. steel. Notons tout de même qu'à titre de validation, une restitution orale a été présentée devant des assemblées des deux sociétés, à l'issue de laquelle un accord a été obtenu sur la lecture historique du déroulement des deux processus.

³¹⁴ Une excellente synthèse de l'approche qualitative et de ses présupposés méthodologiques a été proposée par Anselm Strauss. Strauss, A. (1988) *Qualitative analysis for social scientists*. Cambridge UP.

Une seconde difficulté a tenu à la traduction. La réalisation d'une enquête au Japon présente certaines contraintes spécifiques. Tous les entretiens au Japon ont été menés en langue japonaise et traduites simultanément en français au fil de l'échange ⁽³¹⁵⁾. Ce choix tient au constat que la qualité et la richesse des informations fournies est profondément altéré par l'utilisation de la langue anglaise, y compris dans les cas où les interviewés possèdent une bonne maîtrise de cette langue. A l'inverse, la présence d'un étranger au cours des entretiens semble avoir facilité l'échange en permettant aux interviewés de ne pas respecter certaines conventions sociales parfois inhibitrices. Le travail en binôme, japonais- français tel que nous l'avons pratiqué nous paraît donc constituer un avantage important dans la perspective d'une enquête qualitative, en matière de qualité de l'échange, mais représente un désavantage, à la fois en terme de longueur des entretiens, et du fait des difficultés inhérentes à la traduction japonais- français et français- japonais.

1-a) concepts, définitions, objet, zones d'ombre

Les données recueillies dans l'une et l'autre firme nous ont amené à constater l'articulation de la dynamique d'innovation autour de trois étapes: une étape de construction de l'espace d'innovation culminant avec la mise en oeuvre de la première installation; une étape de généralisation-diffusion; une étape d'évolution de la technologie vers la haute injection. Les deux étapes, de localisation et de généralisation représentent les deux éléments clés de notre analyse de l'innovation, articulée autour de la création et de la diffusion technologique. Dans un souci de clarté et de cohérence, ces deux étapes sont présentées séparément. Le chapitre 2 se concentre sur l'exposé relatif à la création technologique. Il s'agit d'une étape dans laquelle l'innovation a été créée dans un espace localisé, *in vitro*. Le processus de généralisation, de diffusion technologique est présenté au chapitre 3.

Dans l'étude de la première étape, nous nous appuyons donc principalement sur deux concepts : le concept d' *'espace d'innovation'* et celui d' *'investissement innovatif'*, tous deux développés dans le second chapitre. L'espace d'innovation est le lieu d'action élémentaire, le lieu dans lequel s'articulent et sont spécifiées des ressources, indépendamment de leur environnement. Les acteurs de l'innovation agissent, décident, et interagissent dans cet espace, créant ainsi des situations d'innovation. Ces situations se caractérisent par l'activité des acteurs (action sur les ressources) et leurs interactions (création de relations et de représentations). L'espace d' innovation est ouvert lorsque qu'une formulation collective d'un

problème par un acteur lui permet de mobiliser des ressources et d'autres acteurs pour concevoir, créer, réaliser une innovation technologique. L'espace d'innovation se ferme lorsque l'objet technique résultant de l'activité innovatrice est stabilisé et qu'il échappe aux acteurs de l'innovation et à son caractère local pour se généraliser (diffuser).

Sans localisation, la généralisation n'est pas possible. Mais surtout, l'action innovatrice n'est pas possible. Toute activité innovatrice suppose la simplification du monde, sa localisation, son pliage, sa traduction, la définition d'un espace d'action et d'acteurs. Pour avoir une capacité d'action sur les choses, il faut préalablement définir un espace: l'objet sur lesquels l'action va porter, les acteurs qui vont la créer, les ressources avec lesquelles l'action va être entreprise. Il faut abstraire les choses, les acteurs, les ressources de la société générale, de leur généralité, et les localiser dans un espace dédié à leur élaboration. Les acteurs doivent donc représenter, initialiser, traduire, localiser, définir, distinguer, spécifier pour avoir une capacité d'action sur les choses. Pour comprendre la capacité créatrice (action de créer, de tirer du néant, de l'indifférencié, du général), il faut donc comprendre comment l'espace d'innovation et la localisation des acteurs et des ressources dans cet espace interviennent.

Ce cadre d'action représente un milieu favorable au développement d'un processus *d'investissement innovatif*. Cet investissement vise, dans un cadre marqué par la réversibilisation, à accumuler un ensemble de capitaux, parmi lesquels des compétences et des savoir, destinés à la production de nouveaux objets techniques de manière durable et reproductible.

1-b) Méthode comparative

La comparaison de deux espaces d'innovation et des deux processus d'investissement qui y ont pris place s'accompagne d'exigences méthodologiques propres, trop souvent négligées. Il n'est pas rare de voir des auteurs accorder un soin énorme à l'élaboration de leur méthodologie d'analyse, à la conception d'indicateurs et de concepts, se livrer par ailleurs, à l'aide de ces outils, à des comparaisons 'sauvages' sans qu'en soient précisées les fondements. Or toute comparaison pose des problèmes essentiels quant à la comparabilité des objets mis en rapport (Maurice 1989 ³¹⁶). Il est possible de distinguer deux travers essentiels des approches comparatives: celui de l'excès de différenciation, consistant à insister sur les

³¹⁵ Toute l'enquête japonaise a été réalisée en binôme avec Hiroatsu Nohara, chargé de recherche au LEST-CNRS. Je tiens encore à remercier celui-ci de ce long investissement, et des discussions toujours enrichissantes que nous avons pu avoir aux différentes étapes de cette étude.

³¹⁶ Maurice propose une réflexion sur les implications, les avantages et les risques des méthodes de comparaison internationales. Maurice, M. (1989) "Méthode comparative et analyse sociétale. Les implications théoriques des comparaisons internationales" in: Sociologie du Travail, n°2, pp. 175-191.

différences entre les objets comparés, et celui de l'excès de comparabilité, consistant à mettre sur le même plan des réalités de nature différentes. Comme l'a bien montré Maurice (1989, 1995³¹⁷), le champ de la japonologie est particulièrement illustratif à la fois de l'intérêt et des dangers des analyses comparatives. L'auteur souligne les limites d'un culturalisme niant toute possibilité de comparaison et celles d'un fonctionnalisme postulant par principe la comparabilité absolue. En effet, la littérature relative à l'économie japonaise laisse entrevoir deux biais assez systématiques. Une première source de risque se situe dans la particularisation, consistant à considérer que le Japon est strictement unique et ne présente pas de caractère commun avec d'autres pays. Cette singularisation repose souvent sur une misère conceptuelle et une méconnaissance de l'économie des pays occidentaux ou, plus largement, des phénomènes étudiés. Une autre source de risque à trait à la référence normative à un modèle canonique plus ou moins explicite (cela est très fréquemment le cas des Etats Unis, conçu comme un modèle 'universel' à l'aune duquel sont implicitement contrastés l'ensembles des autres pays. Dans ces modèles, la comparaison fictive suppose connue les traits d'un modèle occidental, auxquels sont ramenés les faits étudiés au Japon, dans une rhétorique normative du plus et du moins. De ce point de vue, les comparaisons France-Japon possèdent donc une vertu immédiate, de démystification d'un modèle occidental unique.

Il paraît indispensable, dans l'optique d'une comparaison de processus d'innovation France-Japon de posséder un cadre théorique commun - ici une théorie de l'innovation- permettant à la fois d'assurer la comparaison, et le respect des particularités.

La conceptualisation doit en d'autres termes être suffisamment élaborée pour permettre une approche analytique, pour ne pas dépendre strictement des vertus de la comparaison: en d'autres terme, le cadre d'analyse doit être suffisamment solide pour être valide dans une analyse non comparative. Les concepts *d'espace d'innovation* et *d'investissement innovatif*, dans l'acception que nous en avons donné précédemment nous semblent particulièrement susceptible de remplir ce rôle analytique. Ils possèdent, selon les termes de Maurice (1989) une certaine prétention à la généralisation. En ce sens, ces concepts sont donc transversaux à différents cas d'innovation.

D'un autre côté, les outils conceptuels doivent permettre la comparaison et l'appréhension des singularités. *L'espace d'innovation*, et *l'investissement innovatif* se situent dans un cadre théorique et conceptuel permettant la comparaison, dans la mesure où ils s'intéressent aux dynamiques singulières d'innovation qui se sont jouées dans l'entreprise française et japonaise. En dépit de son caractère général,

³¹⁷ Maurice, M. (1995) "The Social Foundations of Technical Innovation: Engineers and the Division of Labour in France and Japan" in: Littek, W., Charles, T.(eds) *The New Division of Labour. Emerging Forms of Work Organisation in International*

le cadre choisi a pour vocation de respecter les singularités présidant à la construction des espaces d'innovation dans les deux cas. L'approche qualitative offre les conditions optimales de mise en valeur et de respect de ces singularités: l'étude des processus d'innovation est dessinée pour rendre justice à leur timing singulier, à la spécificité de la construction et de la dynamique des espaces d'innovations comparés. Dans l'optique de mettre en évidence les singularités telles qu'elles se construisent au sein des espaces et des processus d'innovation, et de façon à respecter l'irréductibilité de la création technologique qui s'y joue, nous prenons le parti de traiter la comparaison entre nos deux espaces d'innovation sans recourir à leurs contextes d'origine. La frontière entre contenu et contexte, l'identification des éléments pertinents qui les constituent seront laissés à l'initiative des acteurs et traqués dans leurs représentations.

Les études détaillées de processus d'innovation sont rares. La comparaison détaillée d'espaces d'innovation l'est encore plus, malgré l'intérêt théorique qu'elle peut présenter. Par conséquent, le cas PCI est original, et offre un support idéal à l'analyse, du fait que deux entreprises, l'une japonaise, l'autre française, ont, sensiblement au même moment, mis en oeuvre deux processus d'innovation ayant abouti à la réalisation de deux installations d'injections de charbon. L'intérêt heuristique et épistémologique y prend toute son ampleur (Maurice 1989), dans la mesure où, toute précaution méthodologique prise, il offre un terrain privilégié de qualification du cadre théorique: les concepts transversaux permettant la théorisation et de ce qui relève, à l'inverse, de singularité ou de constructions particulières peuvent y être distingués. La comparaison n'est valable que lorsqu'un relativisme théorique est introduit. Pratiquer l'analyse comparative renforce et opérationnalise ce relativisme. Comme toute recherche elle doit s'ancrer sur une réalité empirique suffisamment riche pour éviter les modélisations hâtives, mais dans une certaine mesure, elle permet d'éviter ces généralisations.

2) Grille de lecture du cas présenté.

Pour faciliter la lecture du cas présenté, nous proposons de présenter les principaux repères chronologiques de déroulement des deux processus comparés.

J.steel

1977-78: *Awareness - exploration*

Constitution d'une cellule de réflexion au siège
Composition : responsables de site, représentants du siège, section centrale d'ingénierie
Usines : mise en place d'expérimentation avec différents injectants

1979: *Problématisation - décision*

09/1979 -Groupe de l'usine de K. présente un projet de première installation et entame la rédaction d'un rapport de synthèse

Composition : responsable de la section ingénierie site de K., responsable du Département Fonte site de K.

Processus de décision collective d'implantation d'une première installation à J. steel.

12/1979 -Visite du site d'Ashland Armco steel
Négociation d'un contrat de transfert technologique avec Armco

1980: *Décision – mise en projet*

02/1980 – remise du rapport de synthèse injection de charbon

03/1980 – Décision finale d'implantation sur le hf 1 de O.

03/1980 – Mise en projet

Organisation du projet de première installation sous la direction du Département central d'ingénierie
Acteurs : Département central d'ingénierie, Ingénierie Armco, exploitants Ashland, exploitants, ingénierie et hiérarchie de O.

Conception, réalisation

09-11/1980 Missions à Ashland

Démarrage travaux hf 1, mise en place programme R./D sur pilote hf 2 de O.

1981: *Démarrage*

06/1981- Mise à feu

07-12/1981- Montée en cadence

1982: Stabilisation

Stabilisation des opérations, maîtrise de la nouvelle fonction de production

F. steel

1976-79: *Awareness - exploration*

Groupe de réflexion informel à l'Irsid
Production de calculs en faveur de l'injection de charbon
Discussions informelles à la direction technique de D.

1980: *Problématisation- décision informelle*

07/1980 – Visite collective du site d'Ashland Armco

Composition : représentant des principaux sites français, et Irsid

09/1980 – Présentation d'un projet informel de première installation à D.

Accord informel conclu entre Direction de l'entreprise, direction technique du site et chef de projet virtuel.

1981: *Décision formelle – mise en projet*

Elaboration d'un projet d'investissement

Définition d'une offre et d'une demande technologique

Organisation d'appels d'offre

12/1980 Décision formelle d'investissement sur le hf 2 de D. et attribution d'un crédit au chef de projet

1982: *Mise en projet - réalisation*

Signature des cahiers des charges avec les fournisseurs

Conception, réalisation de l'installation

Coordination de l'ensemble des interventions par le chef de projet

1983: *Démarrage*

07/1983 – Mise à feu

09-12/1983 – Montée en cadence

1984: *Stabilisation*

Stabilisation des opérations, maîtrise de la nouvelle fonction de production

III A: Continuité ou discontinuité de l'espace technologique

1) Création des espaces d'innovation et contextualisation de l'action innovante

Nous allons suivre la constitution et l'évolution des espaces d'innovation dans le cas français et dans le cas japonais. Nous allons voir que dans les deux cas, les processus d'innovation se sont organisés autour de trois étapes principales: une étape de problématisation/ simplification correspondant à un premier exercice de création de frontières entre acteurs externes et internes; une étape de prise de décision correspondant à la mise en place d'arbitrages entre espace d'innovation et organisation; une étape de mise en projet consistant à spécifier le contexte de l'action innovante pour le faire entrer dans un format prévisible et évaluable.

L'innovation PCI a été inscrite au sein de l'économie plus générale du haut fourneau, et de la filière fonte 'traditionnelle'. Les promoteurs se sont donc efforcés de montrer que l'équilibre du haut fourneau, son fonctionnement, nécessitait et justifiait le développement d'une technologie d'injection de charbon. Comme nous l'avons montré, la rapide déstandardisation des injections de fuel n'a pas laissé la place à une autre technologie, mais à un sentiment de 'vide technologique', à ce que nombre de haut fourneaux ont ressenti comme un manque, un écart, un "reverse salient". Il suffit de relire par exemple les argumentaires publiés par les entreprises pionnières pour mesurer la force du caractère largement partagé de ce sentiment de 'reverse salient' (³¹⁸). A partir de là, cependant, les espaces d'innovations construits ont largement divergé, ainsi que nous allons le montrer à partir de l'exposé mis en parallèle du cas de J Steel et F steel.

1) Définition des Frontières - Problématisation/Simplification.

Le mouvement de problématisation/ simplification peut être compris comme la création d'un contexte local à l'action, établi dans un souci de *représentativité* (Callon 1986). A l'occasion d'une première formulation collective d'un problème, les acteurs de l'innovation s'efforcent d'identifier les acteurs de l'espace et du contexte pertinent de l'innovation. Ce faisant, ils établissent une première frontière entre contenu et contexte de l'espace d'innovation. Nous allons voir que les espaces créés dans le cas français et dans le cas japonais ont été tout à fait contrastés, ouvrant un espace d'action à large validité pour les acteurs japonais, et localisant à l'inverse la portée des actions menées par les acteurs français. D'emblée, l'espace d'innovation français s'est ouvert par une négociation en partie informelle entre acteurs du contexte et acteurs de l'innovation, et par une séparation des logiques

³¹⁸ Wakuri, S. et Alii (1983) in: *Ironmaking & Steelmaking*, Vol 10, n°3, pp. 98-103; Colnot, B. (1982) in: *Revue de Métallurgie*, novembre 1982, pp.877-887; Maldonado, R. et Alii (1985) Uenaka, T. (1985) Koen et Alii (1985) Allaire et Alii (1985) all in: *AIME Ironmaking Conference Proceedings*, April 1985, Vol 44.

technique et économique. L'espace d'innovation japonais a été ouvert par la formulation d'une série d'hypothèses, sur le papier, par les seuls acteurs de l'innovation.

1.1) La construction d'un contexte à large validité dans l'entreprise japonaise.

A la fin des années 1970, un groupe ad hoc a été mis en place au sein de la Direction Technique Fonte du siège de l'entreprise J. Steel pour organiser la réflexion sur le problème du remplacement du fuel, et sur *“les choix de ressources alternatives à injecter au haut fourneau”*. Ce groupe, composé de responsable des hauts fourneaux de l'entreprise, de responsables de la Direction Technique Fonte du siège, et de responsables du Département Central d'Ingénierie (PET), était chargé d'assurer la promotion et la coordination d'expériences multiples entreprises par les différents sites. La mise en place de ce groupe témoigne de l'éveil, chez J. steel et plus largement au Japon, d'une conscience ('awareness') et d'une veille à l'égard de l'espace technologique du haut fourneau à injection.

De façon apparemment désordonnée, toutes sortes de produits injectables ont fait l'objet d'essais locaux et ponctuels. La plupart de ces épreuves se sont rapidement soldées par des échecs. Deux pistes se sont révélées plus prometteuses. Parmi elles, celle du COM (mélange fuel-charbon) a donné lieu à la mise en place d'une coopération en R&D entre J. Steel et Mitsubishi Heavy Industry . Cette piste recueillait un certain soutien , car *“il y avait une idée fixe, chez les ingénieurs, c'est que le liquide est beaucoup plus facile à maîtriser”* (³¹⁹).

Sur le site de K., une équipe emmenée par l'un des responsables de la section ingénierie du site, en accord avec sa hiérarchie, et en relation avec le comité de réflexion, a entrepris de réaliser un rapport de synthèse sur les développements actuels et prospectifs de la technologie d'injection de charbon pulvérisé. Cette étude a donné lieu à la création d'un petit groupe de travail *le 'pci technical research working group'* et à la rédaction d'un rapport de synthèse.

Les conclusions du rapport mis en forme par le responsable du Département Haut Fourneau du site de K. révèlent les contours d'un espace d'innovation en train d'émerger. Le rapport ne se contente pas d'affirmer que l'injection de charbon peut économiquement remplacer l'injection de fuel. Il suggère que l'intérêt (Callon 1986) commun de la société J. Steel et des sidérurgistes japonais, des haut fourneaux de J. Steel et des haut fourneaux japonais, de la Direction Technique Fonte du siège, des ingénieurs de la Section ingénierie et des chercheurs de J. Steel, passe indiscutablement par le transfert de la technologie dont disposent les firmes américaines Armco et Babcock-Wilcox.

³¹⁹ Chercheur responsable des premières recherches sur l'injection de charbon, décembre 1995, Futtsu R&E lab, Futtsu, Japon.

Les acteurs de K. ont donc commencé à tracer les contours d'un *espace d'innovation* relativement large, à l'échelle de leur entreprise, de la nation japonaise, et même de *l'espace technologique* mondial, mettant virtuellement en relation les utilisateurs japonais de la technologie, les concepteurs, les décideurs, les fournisseurs américains, les haut fourneaux japonais.

Devant le constat du vide laissé par le *lock-out* du fuel dans l'espace technologique des injections au haut fourneau, il a été considéré que la solution technologique amenée à se développer serait l'injection de charbon. 340 pages d'enquête bibliographique, assorties de 90 pages d'analyse ont été rédigées, entre septembre 1979 et février 1980 à l'appui de cette position (³²⁰). Dans un souci patent d'exhaustivité, les auteurs du rapport se sont efforcés de rendre compte des développements technologiques, des brevets déposés, des articles publiés sur les injections de charbon au haut fourneau. Ils ont cherché à mettre en perspective la trajectoire de développement de cette technologie. Un éclairage a ainsi été fourni sur *l'espace technologique*, identifiant l'état de l'art et les positions relatives des différentes variantes technologiques d'injection de charbon au sein de cet espace. Une approche à la fois comparative et analytique, a mis en relation les besoins du haut fourneau japonais, et les solutions techniques permettant de satisfaire ces besoins. L'analyse de l'espace technologique a conduit les acteurs à considérer Armco comme le détenteur de la technologie la plus prometteuse en 1979.

D'emblée, les acteurs de l'innovation japonais sont entrés de plein pieds dans le contenu de l'innovation. Ils ont accumulés des connaissances sur les conditions de production de l'objet technique et sur sa faisabilité. Avant même qu'une décision ne soit prise de lancer l'investissement innovatif, une réelle expertise d'ingénierie a été constituée. La constitution de cette expertise s'est accompagné de la mise en forme d'un rapport de synthèse volumineux, présentant les principales connaissances acquises.

La multitude des *équivalences* (Callon 1986) et des mises en relation effectuées à l'occasion de cette formulation est saisissante. Une série d'*hypothèses simplificatrices* a été faite sur les comportements d'une série d'acteurs: Armco et Babcock seront disposés à transférer leur technologie, les haut fourneaux de J. Steel, la direction technique haut fourneau du siège et la direction de l'entreprise reconnaîtront la technologie d'injection de charbon comme le successeur indiscutable de l'injection de fuel, les haut fourneaux japonais et leurs *raceways* assimileront la poudre de charbon de la même manière qu'ils ont assimilé le fuel, le Département d'ingénierie de l'entreprise (PET) et les compétences internes permettront le transfert réussi de la technologie américaine, l'ensemble des

³²⁰ La rapidité avec laquelle une somme importante d'information a été collectée tient en bonne part à l'existence préalable de réseaux, d'une 'veille' technologique préexistante, et de relations étroites avec Armco.

hauts fourneaux japonais seraient intéressés à acquérir la technologie d'injection de charbon élaborée par J.Steel.

Parallèlement, un projet d'investissement a été soumis à l'approbation du siège, pour la construction d'une première installation sur le site de K. Il s'agissait donc de faire reconnaître le haut fourneau de K. comme leur représentant légitime, par les différents acteurs de l'entreprise, le prototype à partir duquel la technologie serait acquise et améliorée.

D'après les rédacteurs du rapport, pour lier les *intérêts* convergents de ces acteurs et garantir le succès de l'opération, il suffisait de répondre à une simple question. Le problème crucial ('*point de passage obligé*' Callon 1986), devant mobiliser les énergies, consistait à répondre à la question suivante: la technologie d'injection de charbon d'Armco est-elle transférable au haut fourneau K. de J. Steel et à quelle condition?

L'espace d'innovation ainsi créé a reposé tout entier sur une double hypothèse de *représentativité*. Premièrement, la technologie détenue par Armco, et mise en oeuvre sur son site d'Ashland représentait le point de passage nécessaire à la maîtrise et au développement technologique des injections au haut fourneau. Deuxièmement, le haut fourneau de K. représentait fidèlement l'ensemble des hauts fourneaux japonais, et permettait d'anticiper les futurs développements technologiques ('lead user' Von Hippel 1988) par rapport non seulement à l'entreprise J. Steel, conçue dans un rapport homologique, mais vis à vis du Japon tout entier, et de l'avenir de la sidérurgie en général. Cela suppose une conception homogène et cohérente des sites de J. Steel et plus largement, de *l'espace industriel* japonais. Le contexte d'action créé par une telle hypothèse possède donc une très large validité: le hf de K. devait y jouer le rôle de prototype pour la sidérurgie japonaise toute entière. Les savoirs acquis sur ce haut fourneau seraient transférables aux autres hauts fourneaux. Les difficultés rencontrées sur cet appareil représenteraient fidèlement celles qui seront rencontrées sur un autre haut fourneau, et les solutions élaborées pour y remédier seraient efficaces d'un haut fourneau à l'autre.

Le tableau 1 s'efforce de synthétiser le travail de *traduction* ⁽³²¹⁾ entrepris par les acteurs de K. pour doter leurs action innovatrice d'un contexte favorable:

Entité:	Fournisseurs de technologie PCI	Haut-fournistes J. Steel & Japon	Haut fourneau japonais	⇒ ↓ ↓
Problème:	Optimiser/adapter pour le hf japonais	Pas de technologie adaptée au Japon	Difficulté des marches sans injection	
PPO				Transfert US/Japon de la Technologie PCI
But:	Vendre la technologie au Japon	Remplacer le fuel et le coke	fonctionner régulièrement et économiquement	←

L'espace localisé d'innovation tracé par les acteurs de K. peut donc être saisi comme un effort de mise en relation du haut fourneau de K.(J.steel) , et du haut fourneau d'Ashland (Armco steel). Le simple transfert de technologie de l'un à l'autre, puis l'adaptation- amélioration *in situ* à K. représentait le pliage de l'espace technologique des hauts fourneaux à injection, et sa mise en dynamique autour de son adaptation au haut fourneau moderne, de grande taille. L'espace d'innovation ouvrait une zone à élaborer dans la technologie d'Armco, considérée comme peu adaptée aux hauts fourneaux modernes de grande taille. On retrouve ici le concept de technologie vivante déjà évoqué : la création d'un objet technique a été considéré comme le moyen d'acquérir et de construire la technologie d'injection de charbon. Le transfert de la technologie du site d'Ashland au site de K. devait alors se traduire, dans ce scénario, par un véritable transfert de leadership au profit de J. steel autour de l'élaboration de la technologie d'injection de charbon. Déjà leader en matière de fonction de production de fonte avec injection de fuel, J.steel demeurerait leader en créant une nouvelle fonction de production intégrant l'injection de charbon. Parce qu'elle posséderait la maîtrise d'une nouvelle fonction de production supérieurement efficace, fondée sur une meilleure correspondance de l'objet technique d'injection de charbon à un contexte de haut fourneau à la pointe de la modernité, J. steel tiendrait le marché japonais d'injection de charbon. Il s'agissait d'élaborer une technologie d'injection de charbon répondant aux besoins futurs des hauts fourneaux modernes, tout particulièrement sur le marché japonais. La technologie, son appropriation, et son développement ont donc constitué la clé de voûte de la motivation collective.

1.2) La construction d'un espace d'innovation à validité restreinte dans l'entreprise française.

³²¹ Nous faisons explicitement référence, dans tout ce paragraphe, au travail de Callon (1986) sur la problématisation et la traduction. Le tableau 1 s'inspire directement de tableaux proposés par l'auteur.

A la fin des années 1970, la direction Technique de l'usine de D. a évoqué la possibilité d'injecter du charbon au haut fourneau. L'atmosphère générale se caractérisait par une série de controverses et un sentiment général de scepticisme: avant toute chose, il fallait démontrer que l'injection de charbon fonctionnait. La présence, au sein de la direction de D. du 'père' des injections en France, cet ancien chercheur de l'Irsid 'exilé' après qu'il ait connu des déboires dans le développement de l'injection de charbon dans les années 1960, a tout à la fois contribué à raviver l'intérêt de ses collègues, et à rouvrir les fractures du passé.

Les efforts déployés pour constituer un espace d'innovation et un contexte d'acteurs intéressés ont été laborieux. Une sorte de fausse alliance a d'abord été passée avec le 'père' des injections pour se défaire de sa présence embarrassante (³²²). Une série de négociations délicates ont ensuite été entamées afin de fédérer les volontés de la direction de l'entreprise U. Steel, de l'Institut de Recherche de la Sidérurgie, et des autres groupes sidérurgiques français, autour d'un intérêt commun pour l'injection de charbon. En juillet 1980, un voyage comprenant des représentants des grands sites industriels et de l'Irsid, a été organisé à Armco, sur le site d'Ashland aux Etats Unis, où fonctionnait depuis plusieurs années une installation d'injection de charbon, *"pour se convaincre que c'était faisable sur le plan industriel, qu'il n'y avait pas de risque. Parce que tout le monde avait un - une grande appréhension- c'était que le charbon pulvérisé, ça faisait penser à 'coup de grisou'(), ça faisait penser à un truc qui explose: il y avait des appréhensions sur le plan de la sécurité"* (³²³). Malgré ces efforts, les rapports positifs des acteurs ayant participé à la mission à Ashland, et une communication antérieure présentée par l'IRSID, assortie d'un tas de calculs" convaincants (³²⁴), devant l'Association Technique de la Sidérurgie, l'équipe de la direction technique de D. semble avoir prêché dans le désert et est demeurée désespérément seule.

A l'été 1980, cependant, un allié (Akrich et Alii 1988) inattendu est venu à l'appui de la direction technique de D.. Le PDG d'U. Steel en personne, ayant eu connaissance du rapport de mission du voyage à Armco, a décidé de donner sa chance à l'injection de charbon. Sur son intervention, les acteurs du site de D. ont été invité à rapidement faire part de leurs prétentions. La direction technique du site de D. a été amenée à se rapprocher de la direction financière de l'entreprise,

³²² "il avait été effectivement complètement exclu de D. () Il y avait des gens, je pense à U. Steel qui disaient, bon, il faut quand même demander à C.: donc on a demandé à C. et puis finalement, on fait ce qu'on a envie, hein" Entretien, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

³²³ Entretien Direction Technique du siège, F. Steel, Paris, janvier 1996.

³²⁴ "S. avait une réputation déjà dans la profession, il était d'une notoriété évidente par rapport aux autres ingénieurs, c'était un peu une lumière dans la maison. () Le message était clair, -ça a du être encadré par tout un tas de calculs, comme l'Irsid sait faire, pour calculer les conséquences, les taux de remplacement, des calculs dans tous les sens, pour calculer le bilan d'énergie, l'influence sur le process... donc on a apporté.. l'éclairage technique complémentaire qui était nécessaire afin de chiffrer de façon économique l'injection de charbon" Entretien Direction Technique du siège de F. Steel, Paris, janvier 1996. L'Irsid a donc fourni ici aux responsables de haut fourneaux un modèle leur permettant de chiffrer économiquement, l'intérêt qu'il pourrait tirer de l'injection de charbon en fonction de leur situation particulière.

et à fournir sous délai d'un mois, à la Direction Générale de l'entreprise, un dossier convainquant établissant clairement le profit économique qu'U. pourrait tirer d'un investissement dans une installation d'injection sur le hf 3 du site de D.

Devant la tâche qui lui incombait, la direction technique de l'usine de D. s'est alliée les services de la direction de la section technique du Département Fonte, et de la section ingénierie (Travaux neufs) du site, de façon à donner corps à un projet d'investissement présentant quelque crédibilité.

La formulation du problème, telle qu'elle a été présentée dans le dossier d'investissement et les documents d'époque révèle la forme sous laquelle l'espace d'innovation a émergé. Elle ne s'est pas contentée d'une argumentation générale relative aux avantages économiques de l'injection de charbon. Les acteurs de l'innovation se sont fait les porte-paroles (Akrich et Alii 1988) de l'intérêt financier de l'entreprise, en montrant notamment que non seulement le haut fourneau 3 serait l'emplacement idéal pour un investissement rentable, mais qu'en outre, un tel investissement permettrait d'éviter une série d'investissements prospectifs très lourds à réaliser sur les cokeries de l'usine. L'un des protagonistes résume bien cette mise en forme argumentative:

“C’était pas seulement le prix du fuel. Une motivation importante qui s’est avérée le gros succès finalement du charbon - c’était ma motivation essentielle quand j’ai demandé à ce qu’on reprenne les essais- c’est qu’avec le charbon on peut économiser beaucoup plus de coke qu’avec le fuel. Toutes choses égales par ailleurs, on peut économiser jusqu’à 50% de plus - là où vous êtes limité à 70kg de fuel qui vous économise peut être 80 ou 85 kg de coke, vous pouvez mettre 125 kg de charbon qui vous économisent 130 kg de coke. Or, ça change tout en matière de cokerie, d’investissement cokerie, parce que D., on savait que les cokeries du Nord allaient s’arrêter et qu’il fallait qu’on fasse des investissements cokerie à D. Alors l’injection de charbon, le coût de l’injection de charbon devenait faible par rapport à l’investissement qu’il fallait faire en cokerie par ailleurs. On avait le choix entre investir dans l’injection de charbon et injecter un combustible bon marché, ou bien investir beaucoup plus cher dans une cokerie, avec un rendement thermique minable - quoiqu’en dise M. qui a toujours prétendu que ça avait un rendement thermique extraordinaire - enfin un rendement thermique minable, et en plus faire un produit très cher pour mettre au hf. Donc c’était la motivation principale que je mettais en avant pour qu’on reprenne les injections de charbon à D.”
(³²⁵).

³²⁵ Entretien retraité, ancien responsable des essais spéciaux Irsid, ancien responsable de la Direction Technique de l'usine de D., Aix-en-Provence, février 1996.

L'intérêt bien compris de la direction financière, de la direction générale de l'entreprise U., du site de D. et du haut fourneau 3 de ce même site passaient donc inévitablement par la mise en oeuvre d'un investissement dans une injection de charbon. Alors même que la question de la faisabilité et de la technologie n'étaient réglées que très 'théoriquement', le dossier fourni a établi d'entrée une série de calculs économiques basés sur les travaux de l'Irsid, précisé l'espace où l'installation serait implantée, les caractéristiques du haut fourneau qui serait utilisé, le dimensionnement de l'installation, le coût de l'opération et sa rentabilité. L'investissement a été *localisé*, inscrit d'emblée dans le territoire, dans l'espace de l'usine à fonte du site de D. Le contexte d'action a été rapidement précisé et fixé sur les cartes du site de D.

Cette localisation s'est accompagnée d'une stratégie de minimisation du risque industriel et financier. Cela s'est fait à travers une logique de calcul au plus juste de l'investissement nécessaire et en limitant la portée industrielle de celui-ci. Ainsi, interrogé sur le choix du hf 2 de D., le chef de projet confiait "*c'était le plus petit et qu'on allait surtout pas essayer sur le hf 4 qui était le plus gros*". Le caractère innovatif et incertain de la technologie a été en partie masqué, en le faisant entrer dans des formats d'évaluation généraux caractéristiques d'investissements 'classiques'. D'un autre côté, la conscience de cette incertitude est lisible dans l'effort mené pour confiner la première expérience.

La question centrale (point de passage obligé) formulée dans ce cas immédiatement comme un objectif, une affirmation était: comment construire un objet technique permettant "*d'injecter une quantité de 65 kg/t de fonte de charbon pulvérisé sur le haut fourneau 2 et de tester les possibilités d'injection à des taux supérieurs*"? (³²⁶). Mais il s'agissait précisément de l'affaire des acteurs de l'innovation, une question boîte-noire, dont les acteurs du contexte ne souhaitaient connaître que le résultat. L'ensemble de cette formulation intervenue très tôt dans le processus préparait la mise en place d'une logique de *délégation*.

La question de la représentation est traitée ici sur la base d'un mécanisme de *délégation*. Les acteurs de l'innovation ont représenté ou ont été engagés par la direction financière de l'entreprise, et la direction de l'usine D. sur la base d'un pré-accord délimitant d'emblée le contexte de l'action, *localisée* en en fixant les paramètres généraux significatif sur le plan budgétaire, temporel et industriel. Dans ce cadre à ressources fixes, les acteurs de l'innovation se sont vu confier la charge de l'élaboration concrète d'un projet d'investissement au hf 2. Les questions du *quoi* et du *comment* ont été laissées à leur initiative. La technologie a été traitée par la direction comme une boîte noire, un moyen de transformer des 'inputs' en 'output'. Le processus de prise de décision a ainsi en quelque

³²⁶ Cette formulation est la formulation parue dans le document final de demande d'investissement, rédigé et soumis en octobre 1981 et qui a obtenu l'accord de la direction financière.

sorte précédé l'analyse technologique, sur la base du principe acquis *de visu* à Ashland, que l'injection de charbon fonctionnait.

Le tableau 2 s'efforce de synthétiser les opérations de traduction visant à contextualiser l'action innovative

Entité:	Direction Générale et Financière U.	haut fourneaux de l'usine D.	haut fourneau 2	⇒ ⇓ ⇓
Problème:	difficultés financières, mauvais investissements	dépendance externe coke, prix du fuel	Difficulté des marches sans injection, fuel et coke coûteux	
PPO				construire un outil d'injection de 65kg sur hf2
But:	Investir dans des projets rentables Eviter d'investir dans cokeries	Réduire les consommations coke et fuel	Fonctionner régulièrement et économiquement	⇐ ⇓

L'espace d'innovation a été localisé autour de la mise en relation du hf 3 de D. et d'un dispositif technique permettant de remplacer du coke par du charbon. Le simple appareillage du hf 3 conduisant à l'injection de charbon d'un niveau de 65kg par tonne de fonte produite représentait une amélioration substantielle de la fonction de production fonte de l'usine de D., par le biais d'un meilleur équilibre énergétique global pour le site. Le pliage de l'espace technologique des hauts fourneaux à injection consistait à poser que le développement d'un objet technique d'injection de charbon ad hoc, adaptée aux conditions locales de production du haut fourneau 3 rendrait possible une nette amélioration du fonctionnement technique et des résultats économiques de l'usine de D. Le succès d'une telle opération permettrait en particulier d'envisager une extension aux autres hauts fourneaux du site et le retour à une autonomie en coke.

Alors que leurs collègues japonais sont rapidement entrés dans le contenu technologique dans la perspective de se l'approprier et de la faire évoluer, les ingénieurs français ont consacré leurs efforts à l'inscription locale de la technologie, considérée comme une boîte noire, au sein du territoire de l'usine de D. Ils étaient intéressés en priorité au produit de la création technologique, à son utilisation, contrairement à leurs collègues japonais, lesquels ont développé une approche patrimoniale de la technologie. Les attentions se sont focalisées sur les effets économiques de l'injection de charbon et sur les performances à attendre de cette technologie, en relation avec un problème local de déséquilibre énergétique.

2) Prise de décision et mise en forme de l'engagement

Nous avons évoqué la variabilité des formes d'*engagement* pris entre les acteurs de l'innovation et les acteurs du contexte. La comparaison de deux espaces développant la même innovation indique que ces engagements varient d'un espace d'innovation à l'autre, et interagissent étroitement avec la définition des frontières de l'espace. Tout se passe comme si la problématisation fixait les frontières de l'espace d'innovation, et comme si l'engagement orientait la qualité des relations entre acteurs ainsi définis. On voit se jouer ici une forte interaction entre organisation et espace d'innovation. Dans les deux cas, comme le note Hatchuel, des mécanismes de régulation doivent nécessairement intervenir pour régler la tension entre une logique créative et logique organisationnelle. La logique organisationnelle tend à formater l'espace d'innovation dans une logique 'projet', planifiée, programmée, prévisible, calculable en spécifiant fortement le contexte de l'action, et par conséquent, l'espace d'innovation. Mais elle doit compter avec une certaine autonomie de l'espace d'innovation et de ses acteurs.

2.1) Engagement collectif de l'entreprise J. Steel: *Ringishoo*

Alors que s'esquissait les grandes lignes de l'espace d'innovation mettant en relation la technologie Armco et les hauts fournisseurs japonais, les acteurs de K. ont entrepris de soumettre un projet d'installation sur le site de K à la décision de leurs pairs et du siège de l'entreprise. Il s'agissait de convaincre l'entreprise J. steel de s'associer à l'opération et d'y accorder des moyens.

Ainsi que nous l'avons noté, une commission de réflexion ad hoc a été créée à la fin des années 1970 au siège de l'entreprise, et il semble que la recherche d'un substitut au fuel ait constitué une priorité pour l'entreprise dans son ensemble. L'injection de charbon faisait parti des candidats considérés comme sérieux, même si quelques appréhensions semblent s'être exprimées relativement à son caractère solide et explosif. L'injection de gaz naturel ou de gaz de cokerie s'accompagnait de coûts élevés. Le COM (mélange fuel-charbon), le seul concurrent sérieux du charbon chez J. Steel paraissait difficile à traiter, et aucune expérience industrielle n'en avait démontré la faisabilité.

Nous n'avons pas été en mesure de retrouver avec certitude la procédure de décision précise suivie par le projet d'installation d'injection de charbon sur le site de K. Néanmoins, les éléments dont nous disposons portent à poser l'hypothèse que celui-ci a été soumis à la procédure habituelle de décision suivie chez J. steel, d'évaluation des projets et de décision d'investissement, suivant une logique que nous qualifions de *montée en généralité*. D'après nos interlocuteurs, la procédure formelle de décision est habituellement ordonnée en trois étapes essentielles :

La première étape composant le processus de prise de décision passe par la présentation d'un projet devant la commission des hauts fournisseurs de l'entreprise. Le projet est alors discuté par les

représentants de ce que l'on peut appeler *la profession*. La réunion se tient à date fixe. Chaque projet y est confronté à l'ensemble des autres projets concernant le haut fourneau. Les membres de la commission mettent en ordre les différents projets, discutent des problèmes techniques, des modalités de mise en oeuvre, de leur intérêt collectif, des points à éclaircir ou à intégrer avant que les projets jugés les meilleurs aillent représenter la profession auprès des instances supérieures. Cette commission peut être considérée comme une incarnation organisationnelle de l'expérience industrielle collective de la firme. Dans le cas de la Fonte, par exemple, cette commission comprend la plupart des chefs de Département Fonte, les responsables des hauts fourneaux, les responsables des projets de recherche liés à la production de la fonte. Cette réunion d'évaluation par les 'pairs' joue un rôle tout à fait considérable, car elle réunit à la fois les auteurs ayant concocté le projet et, dans le cas de technologie comme l'injection au haut fourneau, leurs premiers utilisateurs potentiels.

A partir du moment où un projet est présenté devant les commissions, il échappe à ses auteurs. Ce mécanisme de dépossession, de collectivisation, passe par la prise en main du projet par un personnage d'interface, le *honshabutcho*, le chef du siège. Le '*butcho du siège*' est chargé de la mise en projet: le dimensionnement, le site sur lequel devra être réalisé l'investissement, le haut fourneau à retenir, les performances à viser, le calendrier à suivre, le budget à prévoir, le nom des principaux responsables de la mise en oeuvre du projet. Il s'agit de faciliter la mise en concurrence - réputée âpre - avec les projets des autres filières (fonte, aciéries, laminage) de l'entreprise, qui intervient à l'occasion de la réunion de la commission des directeurs. Le projet est rendu lisible, évaluable et comparable afin que la direction financière et la commission de direction puisse s'en saisir aisément dans une perspective comparative. Les "butchos du siège" forment les intermédiaires d'un réseau d'"hommes clés" appartenant aux sites, à la direction financière, et à l'Etat major. Cela leur permet de faire converger budgets et projets.

La décision finale appartient en effet à la commission de direction. Tous les dossiers retenus dans les instances précédentes et mis en forme, sont soumis et mis en concurrence devant cette commission réunissant les membres de l'Etat major de l'entreprise. Ces derniers définissent un arbitrage entre les projets et formulent une décision officielle quand à l'engagement global de la société dans l'avenir. Les projets sélectionnés forment la base de la stratégie d'investissement de la société sur trois ans.

Dans le cas qui nous intéresse, la mise en forme du projet est passée par l'organisation de deux missions à Armco et la rédaction d'un rapport de synthèse, déjà cité, par les acteurs de K.. Fin 1979, une première mission, composée de membres du comité de réflexion sur les alternatives à l'injection de fuel, emmenée semble t-il, par le *butcho du siège*, est allée négocier avec Armco les modalités d'un transfert de technologie. Forte des brevets déposés à la fin des années 1960 et au cours des années 1970, Armco a formulé des exigences élevées en matière de royalties, l'entreprise

américaine se considérant sans doute comme un point de passage obligé. La négociation a porté sur un package comprenant *“les brevets, la technologie et ses savoir, les savoir opérationnels et l’assistance technique. Nous avons été obligés de tout acheter, y compris l’exclusivité de revente de la technologie sur le territoire japonais”* pour une période de 10 années ⁽³²⁷⁾. Une seconde mission, ‘plus technique’, composée des acteurs de l’innovation de l’usine K. et de responsables du PET s’est rendue à Ashland afin d’évaluer la faisabilité technique du transfert technologique. Le rapport de mission a constaté que *“la technologie fonctionnait effectivement sur le site d’Armco. Malgré les différences de taille et de pression entre les haut fourneaux d’Armco et ceux de J. Steel, le transfert est possible.”* ⁽³²⁸⁾.

Le butcho du siège s’est révélé être favorable au projet d’installation charbon chez J. Steel. Avec son équipe, il s’est efforcé de formuler les principaux arguments en faveur du développement de la technologie d’injection de charbon. D’après l’un de nos interlocuteurs, les arguments décisifs en faveur de PCI ont principalement tenus *“à des considérations de coût/avantage...entre le coût de la technologie et le bénéfice monétaire que l’on peut en tirer. Est ce que l’on peut récupérer l’investissement initial sur deux ans? C’était essentiellement ça!”* ⁽³²⁹⁾.

Au sein de l’assemblée des haut fournistes, les uns et les autres ayant par ailleurs pu toucher du doigt les difficultés d’injection de matières comme le goudron ou les matières hybrides, le transfert de la technologie Armco et l’orientation de la société dans la direction des injections de charbon a obtenu un relatif accord. Candidat à la stabilisation de la marche du haut fourneau, le charbon a recueilli les suffrages de la profession dans le remplacement du fuel.

Pourtant, un point de désaccord majeur est venu troubler les débats. Quel site allait bénéficier de la première installation? Le site de O. est apparu sur le devant de la scène, à ce moment. Il est bon de préciser qu’O., site leader de l’ancienne Fj steel, et K., site leader de l’ancienne J.steel, malgré la fusion intervenue entre ces deux entreprises au début des années 1970, entrent régulièrement en compétition, et représentent, encore aujourd’hui, deux sensibilités du groupe J. steel, dont les PDG sont alternativement choisis dans l’un et l’autre camp ⁽³³⁰⁾. Certains ont avancé qu’il paraissait plus logique de récompenser les efforts de l’équipe de K., auteur d’une analyse technico-économique fouillée. Sur l’intervention d’un responsable influent de O., d’autres ont contesté cette analyse, proposant, avant toute chose, de considérer quel investissement serait le plus rentable pour l’entreprise. Ceux-ci ont alors mis en avant les avantages, jugés plus ‘objectifs’ du site de O., seul site de l’entreprise à acheter, à un prix élevé, du coke externe. La commission des hauts fournistes n’étant pas parvenue à un accord, les jeux d’influence semblent donc être allé bon train pour tenter de faire

³²⁷ Entretien avec ingénieur du PET la section centrale d’ingénierie, J. Steel, octobre 1995, Japon.

³²⁸ Entretien responsable du Département fonte, site de O., septembre 1996, Japon.

³²⁹ Entretien expert technologie PCI, département central d’ingénierie, Futtu, J. Steel, février 1996.

pencher la balance d'un côté ou de l'autre. La commission directoriale a finalement opté en faveur du projet de transfert, et arbitré en faveur de l'implantation d'une installation à O. , à la surprise générale, soulevant la colère des acteurs de l'usine de K.

Le *butcho du siège* a fait circuler un document scellant l'engagement de l'entreprise dans son ensemble, pour qu'y soit apposés, dans un ordre hiérarchique, les sceaux du PDG, des deux vice-présidents, du Directeur du Département des Finances, du Directeur du Production Planning et du Technical Planning, du honshabudcho jusqu'à mentionner "tout en bas (ceux) des chefs de section ou de service directement concernés par l'introduction de la technologie PCF" ⁽³³¹⁾ ⁽³³²⁾. L'engagement a revêtu la forme originale d'une participation active, très collective et ordonnée de la société dans son ensemble. Cela nous amène à former le concept d'*engagement collectif*, parfaitement représenté par le *Ringishoo*, le document officiel portant la trace de la décision.

L'espace d'innovation en voie d'émergence s'est trouvé à la fois fortement structuré et transformé à l'occasion de la formation de l'engagement collectif de l'entreprise. A l'origine, les chercheurs de la section haut fourneau de K., soutenu par la direction de leur usine, ont manifesté leur intention de transformer l'un des hauts fourneaux de leur usine en un haut fourneau expérimental destiné à acquérir, au nom de l'intérêt collectif des hauts fourneaux japonais, les fondements d'une technologie nationale d'injection de charbon. Après la prise de décision, ce qui n'était au départ qu'une intention est certes devenu le projet de l'entreprise J. steel dans son ensemble, au prix d'une profonde transformation de l'espace d'innovation, puisque les acteurs de l'innovation se sont trouvés tout bonnement disqualifiés et remplacés par leurs collègues de O. La forme de l'engagement, à la fois collective et participative s'est traduite par une appropriation collective du projet allant jusqu'à la dépossession des acteurs de l'innovation. Comme le soulignait un responsable de Département, la procédure de remontée en généralité a rendu possible cette appropriation collective : " (Les acteurs de l'innovation du site de K.) ont fait remonter le projet vers le siège, et donc, à ce moment là, tout le monde a eu connaissance de leur intention. Le rapport était limité au site de K. jusque là, mais à partir du moment où le rapport a été présenté, c'est devenu une information commune pour tout le monde " ⁽³³³⁾.

L'entreprise J., sa direction et ses haut fournistes, représentés par le *butcho du siège* ont également fait payer cher leur engagement dans le projet PCI. Ils ont oeuvré bien au delà du rôle

³³⁰ Nos remerciements à H. Nohara pour ces éclaircissements sur ce point.

³³¹ Entretien expert technologie PCI, département central d'ingénierie, Futtsu, J. Steel, octobre 1995.

³³² Lors de l'entretien, nous avons eu sous les yeux le document scellant l'engagement collectif de J. Steel dans la direction de l'injection de charbon, par transfert de la technologie Armco. Ce document prend la forme d'une page format A4 couverte de cases portant des fonctions et contenant les sceaux, couleur sang, ou "hanko" des principaux responsables de l'entreprise. Notre interlocuteur nous a indiqué néanmoins que à l'âge de l'électronique, ce type de document et de procédure était désormais informatisé.

Forme de régulation	Acteurs de K., Haut Fournistes de J. Steel, Direction J. Steel	Honshabutcho, ↑procédure des trois commissions, ↑rapport technique	Médiation organisée, acteur d'interface - Honshabutcho
Forme d'engagement intra-organisation	Etat Major, Directions Finance et Production, Honshabutcho, PET encadrement site O.	Ringishoo ↑↓ Dossier filière fonte	Engagement collectif
Forme d'engagement inter-organisationnel	Armco, Honshabutcho, Direction J. Steel	Plan, logiciels, données d'opération, formation exclusivité, assistance, ↑↓ Royalties, licence, package	Engagement à long terme (10 ans).

Les symboles → indiquent le sens de circulation des intermédiaires

Le tableau 4 présente les nouvelles frontières de l'espace d'innovation après la prise de décision

Entité:	Fournisseur de technologie PCI→	Entreprise J. Steel→	Haut fourneau japonais
Espace	Espace Technologique→ mondial	Organisation, Kaisha→	Espace industriel national
Représentant	Armco→	Honshabutcho→	HF 1 site de O
Dispositif d'attachement	Contrat à long terme→	Projet de transfert technologique→	Dispositif d'injection charbon

Les symboles → indiquent l'effort d'interposition de l'entreprise J. Steel entre l'espace technologique mondial et l'espace (sidérurgique) industriel national japonais.

Le moment de l'engagement est un moment clé car il cristallise, instrumente, articule l'espace d'innovation en l'inscrivant dans un cadre d'action organisé. Du même coup, il révèle les mécanismes de régulation mis en œuvre par une organisation pour gérer la création technologique, et la base des accords à partir desquels une stabilisation de l'espace d'innovation peut être trouvée, des irréversibilités créées, et l'investissement innovatif prend place dans des conditions d'incertitude contrôlée. Malgré les difficultés rencontrées dans l'éclaircissement de ces mécanismes dans le cas de la création de la technologie pci chez J. steel, un certain nombre de traits caractéristiques se dégagent clairement de notre étude, au delà des détails du processus.

L'un des points très marquants dans le cas du processus de création technologique suivi à J. steel tient précisément à l'ampleur de cette inscription organisationnelle. Au delà de l'anecdote de la dépossession des acteurs de K., et du putsh intenté par les acteurs de O., contrariant une vision un peu trop consensuelle de l'organisation japonaise, l'événement laisse rêveur sur la force de l'appropriation collective manifestée à cette occasion, sur le poids du siège de l'entreprise et de ses commissions professionnelles dans l'orientation des stratégies des usines. Outre les difficultés politico-stratégiques représentées par un tel acte, celui-ci n'a été rendu possible que parce que la forme même de l'espace d'innovation et sa localisation l'autorisait. C'est bien parce que le hf de K. était considéré comme représentatif des hauts fourneaux de l'entreprise, que le haut fourneau de O. a pu lui être substitué sans altérer le projet ni les hypothèses formulées par les acteurs de K., que l'opération de substitution a été possible. Le haut fourneau de O. a pu être glissé à la place de celui de K. Le rapport produit par les acteurs de K. sur les fondements technologiques de leur analyse illustre l'effort d'explicitation, la mise en forme à validité générale, la mise en commun de connaissances et de compétences partagées nécessaire à un tel retournement. Cela rejoint en partie le concept d'horizontalité défendu par Aoki (Aoki 1988)

La forme de l'engagement illustre remarquablement le concept de *créativité organisée* (Lanciano et Alii 1993). L'activité innovatrice a été confiée à un ensemble d'acteurs respectant l'organisation habituelle de l'entreprise et ses hiérarchies. L'activité innovatrice n'a donc, à la limite, pas reposé sur la création d'acteurs ou d'espaces dédiés. Elle a été inscrite au cœur même de la production et de sa logique, dans la continuité de l'organisation productive existante (Lanciano et Alii 1993, Jolivet 1996).

b) *Engagement mutuel et délégation: la décision d'allocation de crédit en France*

Dans le cas français, la prise de décision a informellement débuté simultanément à l'ouverture de l'espace d'innovation. La formulation d'un problème collectif et le processus de négociation entre les ingénieurs de D et leur direction d'entreprise, s'alimentant l'un et l'autre, se sont déroulés en parallèle. Par contraste avec le cas japonais, où les acteurs de l'innovation se sont efforcés de mettre en avant une représentativité transversale, vis à vis des autres hauts fourneaux et des autres hauts fourneaux de l'entreprise, les acteurs français de l'innovation ont d'emblée été pris dans une forme de relation très fortement centrée sur la direction de leur entreprise et plus particulièrement sa direction financière, avec laquelle la poignée d'acteurs de D a établi un dialogue direct. L'ouverture d'un espace d'innovation a été fondé sur une forme de contrat implicite entre ces deux acteurs portant sur les

principes généraux de l'investissement à réaliser⁽³³⁷⁾. Dans une certaine mesure, l'espace d'innovation a épousé, dès sa création, les contours de l'organisation de l'entreprise U, et particulièrement de sa structure hiérarchique. L'innovation a dû trouver un chemin dans les structures un peu étroites de l'organisation.

La question des modalités de régulation de la tension entre dynamique de l'espace d'innovation et logique organisationnelle s'est immédiatement posée. Contrairement au cas japonais où cet arbitrage a été médiatisé par l'organisation, il a pris en France la forme d'une *négociation*. L'intention d'injecter du charbon a été considérée de façon singulière et a donné lieu à un processus de décision unique. Entre septembre 1980, date de rédaction d'une première intention et décembre 1981, date de la décision officielle d'investissement, l'espace d'innovation s'est développé autour des relations entre direction de l'entreprise et ingénieurs du site de K. . Le processus a été ponctué d'une série d'épreuves d'évaluation, facilitant la mise en accord des deux rationalités et préparant la prise de décision et l'engagement mutuel formel (préaccord, préprojet, projet).

Le processus a suivi une logique inversée par rapport au cas japonais, une sorte de *descente en généralité* facilitant la traduction des premiers objectifs et représentations en actions. Alors que leurs collègues japonais se sont rapidement intéressés au contenu de la création technologique, auquel ils ont progressivement associé un cadre organisé, les ingénieurs français ont conclu un accord cadre dont le contenu a progressivement été précisé a posteriori.

Formulation d'un projet d'investissement

Comment construire une installation d'injection de charbon sur le hf 2 (ppo)? La logique à l'oeuvre a consisté à mettre les acteurs de l'usine D. ayant formulé la demande face à leurs *responsabilités* "*et donc c'est là qu'il faut mettre en accord ses actes et ses paroles*"⁽³³⁸⁾. Après avoir clamer la faisabilité et l'intérêt de l'injection de charbon, les acteurs ont été sommés de passer à l'acte. Quatre acteurs de D. se sont donc efforcés de traduire les intentions générales du préaccord en dossier d'investissement sur le hf 2. "*Donc toute cette année là, je dirais 81, une bonne partie de l'année 1981, au moins jusqu'à l'été, ça a été vraiment préparer le dossier technique pour l'injection de charbon*"⁽³³⁹⁾. Par conséquent, on peut dire, à propos du mode de régulation entre logique innovatrice et logique d'organisation qu'un cadre général a été posé, *un plan incomplet* (Ponsard et Tanguy 1991)

³³⁷ Le chef de projet formulait ainsi la création de l'espace d'innovation "*Bon quand on a démarré le charbon, quand on a décidé de lancer effectivement le dossier, ben c'était un peu un engagement, et (M. D.) m'a dit, 'G., est ce que vous suivez, est ce que vous ne suivez pas? Est ce que vous pouvez imposer le charbon à D.'*"

³³⁸ Cette phrase a été formulée par le chef de projet à propos d'un second épisode dont nous parlerons plus loin, mais elle exprime bien la logique générale à l'oeuvre dans le cas français. Vous voulez des crédits? D'accord, mais à vous de nous montrer que nous y avons intérêt, et à vous surtout de traduire toutes les hypothèses et principes généraux négociés au départ en actes et en réalisations concrètes.

que les acteurs de l'innovation ont eu à la fois la latitude et l'obligation formuler un plan complet, un projet d'investissement définitif.

Le point essentiel de l'engagement a consisté à créer un acteur incarnant l'arbitrage entre dynamique innovatrice et logique d'organisation : le chef de projet. Le chef de projet est le produit d'une rupture organisationnelle temporaire par rapport à l'activité productive. Son sort et celui du projet sont intimement mêlés dans un rapport de responsabilité.

Cet acteur clé a été engagé par la direction pour prendre en charge la réalisation du projet. La direction technique de l'usine D. a nommé le chef de projet et lui a assigné la responsabilité de formuler un projet. La nomination a constitué un moment essentiel de la mise en projet dans le cas français, l'accord passé étant incarné par le chef de projet plutôt que par un dispositif organisationnel bien défini. Le choix effectué dans la nomination se situe tout à fait dans le prolongement de la logique utilisatrice poursuivie : l'acteur choisi possédait une expérience d'une dizaine d'années en tant qu'exploitant puis responsable de production sur un haut fourneau de grande taille en Lorraine, avant que son usine ne soit définitivement fermée pour cause de crise économique.

Comment réaliser une installation d'injection de charbon sur le hf 3 (³⁴⁰)? Comment mettre en place un contexte favorable à la conception et à la réalisation d'une installation d'injection de charbon? Un processus d'apprentissage intensif a pris place. Dans le cas français, la forme prise par l'installation a été étroitement dépendante du déroulement du processus, et des mobilisations réalisées pendant cette période. Les acteurs de l'innovation ont entrepris d'élaborer leurs conceptions 'fragmentaires' des installations d'injection de charbon.

Le point marquant de ce processus, tient à ce que les acteurs se sont dotés d'une grille d'analyse, d'une capacité de jugement des *qualités* d'une installation d'injection de charbon. Cette effort de simplification-représentation a mis en équivalence l'installation avec quatre questions *universelles*: la question de la sécurité, la question de la fiabilité, la question de la marche des hf, la question de l'équité. L'exercice du jugement a été affiné en confrontant *de visu* cette représentation aux installations industrielles existantes. Outre le voyage à Armco, une mission en Ukraine a été organisée, en novembre 1980, à Donetsk, site qui comme Ashland, avait acquis une expérience industrielle en matière d'injection de charbon.

Mais l'exercice du *jugement* s'est également appuyé fortement sur la construction progressive d'une relation avec les fournisseurs d'installation. Cette mise en relation s'est effectuée à travers

³³⁹ Entretien chef de projet de l'époque, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

³⁴⁰ Le plan initial consistait à injecter sur le hf 3.

l'élaboration d'une série d'intermédiaires de plus en plus élaborés et objectivés. Les visites à Armco et Donetsk se sont en partie inscrites dans cette perspective. De premiers contacts ont été tissés avec une série de fournisseurs potentiels. Les discussions avec des fournisseurs mis en concurrence (une petite dizaine plus ou moins spécialisés sur le sujet), organisées à partir de février 1981, ont été riches d'enseignements sur les possibilités existantes de traduction des besoins de D. en installation concrète. Les ingénieurs de D. ont découvert et construit l'espace technologique essentiellement sur la base de cette confrontation progressive de leurs besoins à des offres.

Ce processus est analysable à partir des questions portant sur l'asymétrie de l'information dans des situations de coordination par le marché (Akerlof 1970, Eymard-Duvernay 1989³⁴¹). Le chef de projet et ses associés ont assimilés une série d'éléments nécessaires à la traduction de leurs objectifs généraux en langage technologique - dans le langage des fournisseurs-. Pour choisir un fournisseur capable de répondre à leurs aspirations, les ingénieurs chargés du projet ont été amenés à acquérir rapidement les connaissances nécessaires à la reconnaissance de la qualité des offres offertes et à la formulation précise de leurs besoins. Les acteurs de l'innovation se sont dotés d'une capacité d'acheteur-utilisateur d'installation d'injection de charbon. Dans ce but, ils ont multiplié les rencontres avec les producteurs et fournisseurs d'installation, qu'ils ont mis en concurrence virtuelle et réelle en comparant leurs offres et leurs prestations à partir d'une grille d'analyse comparative. Sur les points importants où leur expertise leur a semblé insuffisante - cas de la sécurité - ils se sont alliés les services d'experts - CdF ingénierie (janvier 1981).

Fort de cette première élaboration, le chef de projet a lancé les appels d'offre dans la seconde moitié de l'année 1981. A nouveau, une série de candidats (une dizaine de société) a été rencontrée sur la base cette fois, de documents écrits - l'appel d'offre d'un côté, et les propositions d'installations correspondantes de l'autre-. On y retrouvait en particulier deux constructeurs japonais, Armco, une entreprise française ayant équipé le site de U., et une entreprise luxembourgeoise, P. Würth. Outre les clés d'analyse technique, l'argumentaire du chef de projet avançait l'importance de la simplicité et du coût de l'installation, expérience industrielle et la capacité à résoudre des problèmes technologiques dans un délai donné, pour atteindre un objectif de performance désiré. Sur le papier, les offres ont été rendues comparables par leur juxtaposition et leur évaluation selon des critères communs.

Enfin, un autre type de savoir d'utilisation a pu être construit en réalisant une série d'essais sur un petit haut fourneau appartenant à U. Steel, début 1981. La démarche a consisté en quelque sorte à *se faire la main* sur une petite installation sans risque industriel important "*M. D. était un actif*

³⁴¹ Akerlof, G. (1970) "The market for lemons: Qualitative uncertainty and the market mechanism" in: Quarterly Journal of Economics, Vol 84, August 1970, pp. 488-500; Eymard-Duvernay, F. (1989) "Conventions de qualité et formes de coordination" in: Revue Economique, Vol 40, n°2, pp.329-360.

représentant disons de l'idée que il fallait essayer aussi de se faire quelques idées chez nous, parce que en France, il fallait aussi penser à développer le charbon". "(le site de) U., ça avait un peu l'avantage - fallait pas dire ça, mais enfin bon- en disant 'ben, si ça doit perturber les hf, eh bien () il vaut mieux perturber un petit fourneau à U., qu'un fourneau à D.', c'était aussi un peu dans cet esprit là" (342). En association avec l'Irsid, mobilisée pour l'occasion pour effectuer un certain nombre de mesures concernant la combustion du charbon, un comité de pilotage a été créé pour orienter les essais réalisés à différents taux d'injection, et tenter de caractériser leur impact sur la marche du haut fourneau. "U. devait lever les incertitudes, ils regardaient si on était capable de faire 65 kg" (343).

Le dossier définitif a été précisé par étape, d'abord sous la forme d'un appel d'offre, puis d'un cahier des charges (Décembre 1981 pour le broyage, Avril 1982 pour l'injection). L'ensemble de ces expériences intermédiaires -Louvroil, Armco, Donetsk, site de U., Arbed- sont venus réduire l'écart créé entre les principes généraux de l'installation à concevoir et le dossier définitif décrivant les principales caractéristiques de l'installation au hf 2 de D. Le processus, de type essai-erreur, a été ponctué d'une série d'objets intermédiaires, remplissant à la fois la fonction de gage donné à la direction, et de repère pour l'action de plus en plus proche du document final. L'objet technique a pris l'allure d'un *monstre* (Law 1991), une forme d'hybride composé d'un assemblage aux origines diverses, représentatif du processus d'apprentissage réalisé par les acteurs de l'innovation. Le cahier des charges a constitué l'outil de coordination essentiel entre fournisseurs extérieurs et chef de projet.

Le projet définitif a été validé par la direction financière de l'entreprise en décembre 1981. Les critères de décision se sont caractérisés par leur généralité: le projet a pu être évalué isolément d'autres projets sur la base de l'application de critères universaux de jugement, bien représentés par la rentabilité économique calculée de l'opération.

Décision finale et mise en oeuvre du projet

Le dernier avatar de cette prise de décision est bien entendu la sélection du fournisseur de l'installation. Malgré quelques petits soucis liés à l'équirépartition et à la fiabilité des données d'opération fournies, Armco a été pressentie comme figurant le candidat le plus sérieux. Restait donc comme dans le cas japonais à trouver les termes d'un contrat. Et là, coup de théâtre, en dépit de contacts répétés et d'une manifestation d'intérêt de part et d'autre, les acteurs du site de D. et ceux d'Armco ne sont pas parvenus à trouver un terrain d'entente sur la forme du contrat. Le chef de projet rapporte l'esprit du dialogue de l'époque:

³⁴² Entretien, ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

³⁴³ Entretien responsable section technique, site de D., janvier 1996.

“Avec les Etats Unis, avec Armco, on ne s’est jamais bien entendu, c’est M. D. qui avait mené les discussions où ils disaient:

- ‘bon ben d’abord tout est à prendre ou à laisser, on ne veut pas vendre la licence à quelqu’un d’autre. On veut bien vous la vendre à vous moyennant des royalties par tonne de charbon injectée’. - Bon alors là c’était pas du tout dans nos idées, hein et j’avoue que, on met du charbon, à chaque tonne injectée, payer indéfiniment donc ça c’est quand même.... -

*- ‘on voudrait que ce soit dans le prix de.. on comprend bien que quand quelqu’un a quelque chose à vendre, il le vende -comme l’installation-. **Qu’on achète l’installation**, qu’elle soit plus chère parce qu’il y a une licence spécifique derrière, mais après, on en parle plus!’”.*

Bien que la procédure formelle de mise en relation avec les fournisseurs se soient déroulées selon une procédure de mise en concurrence, les acteurs de D. devaient bien constater que l’ensemble de l’opération serait compromise si il ne trouvaient pas soit un terrain d’entente avec Armco - ce qui leur paraissait impossible - soit un remplaçant sérieux ce qui paraissait difficile: *“aux USA il n’y a pas moyen de travailler avec eux, en URSS, non plus, en Chine, il n’y a pas moyen d’aller voir, comme on regardait ce qui se passait au Japon, une seule usine se lançait à titre disons - je dirais - d’essai - mais d’essai comme savent faire les japonais, c’était un essai, mais.. C’était à J. Steel, à O. sur le hf 1, ou sur le hf 2”.*

Un second événement imprévu est alors venu bousculer les plans des acteurs de l’innovation. En septembre 1980 et pendant un mois, la société sidérurgique luxembourgeoise Arbed a réalisé un essai d’injection de charbon en étroite collaboration avec la société ingénierie luxembourgeoise P. Würth, avec l’aide d’un financement émanant de la CECA. Un second essai plus important a été mené d’août à octobre 1981. Les ingénieurs de D. ont pu visiter l’installation au moment de la seconde série d’essais et constater la consistance des résultats obtenus avec leurs critères d’évaluation. La technologie était en voie d’élaboration, mais les premiers résultats paraissaient encourageants. *“On s’est dit au fond, la faisabilité est pas extraordinaire, extraordinaire, chez eux, ils n’ont pas fait une démonstration - parce que c’était sur quelques mois, pas plus - donc on est parti du principe que quelques mois leur technologie n’était pas forcément stupide puisque ça se passait bien... il n’y avait pas d’explosion en particulier, le fourneau avait pas mal marché, l’équirépartition () elle nous paraissait bonne, il faut dire ce qui est, et intellectuellement plus satisfaisante, puisqu’on disait, chaque tuyère a son doseur, donc on est tranquille.”* ⁽³⁴⁴⁾. Pour Würth, la réalisation d’une première installation industrielle dans une usine de bonne réputation comme D. était un passage inévitable à franchir dans le développement de leur technologie. Pour les acteurs de D., après l’abandon de la piste Armco, Würth est apparu comme un acteur désormais quasi-incontournable à inscrire dans le contexte de l’espace d’innovation.

Sur la base de ce long processus d'élaboration, les acteurs de D. ont alors pu formuler une demande de crédit à la fin de l'année 1981, sous la forme d'un projet comprenant une liste de fournisseurs, un calendrier détaillé de la réalisation (³⁴⁵), les performances attendues de l'installation sur le plan technique et économique, un calendrier de la montée en cadence (³⁴⁶), un budget détaillé de l'opération (³⁴⁷). L'engagement mutuel a pris la forme d'un échange entre ce dossier d'investissement et la lettre d'allocation de crédit signée du responsable de la direction de l'entreprise. En ce sens l'engagement a consisté à formaliser la délégation déjà mise en place jusque là. L'objet technique a été détaillé, doté de caractéristiques précises, d'un lieu d'implantation (le hf 2 de D.), d'un cahier des charges co-élaboré par D. et Würth pour la partie injection, et par D.-CdF et FCB pour la partie broyage.

³⁴⁴ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

³⁴⁵ Le calendrier prévoyait: décembre 1981 -commande atelier broyage; janvier 1982 - commande atelier d'injection de charbon; Mai 1983 - mise en service; Janvier 1984 - injection moyenne 65 kg/t en marche régulière.

³⁴⁶ Les objectifs d'injections sont pensés sous forme de progression régulière de l'injection 0, 15, 25, 35, 45, 50 pour les six premiers mois, suivie d'un pallier de 4 mois à 50 pour atteindre l'objectif d'injection le 9ème mois 65 kg par tonne de fonte. Aucune référence n'est faite à une recherche des limites d'injection.

³⁴⁷ Pour des questions de confidentialité notons simplement le chiffre de 60% (octobre 1981) et de 46% (septembre 1980).

Le Tableau 5 présente les éléments essentiels de la prise de décision chez F. Steel.

	Acteurs	Intermédiaires	Forme
Forme de régulation	Direction financière U., Direction technique site de D., chef de projet.	Dossier rentabilité, notes comparatives, Pré- projet, Projet, demande de crédit ↑↓ Réunions lettre d'allocation de crédit	Création d'un espace de négociation
Forme d'engagement intra-organisation	Directions Financière , Chef de projet.	Lettre d'allocation crédit ↑↓ Dossier d'investissement hf 2 de D.	Engagement mutuel, délégation
Forme d'engagement inter-organisationnel	P. Würth, chef de projet	Contacts, discussions, appel d'offre ↑↓ Cahiers des charges, Proposition d'installation	Engagement à court terme

Les symboles → indiquent le sens de circulation des intermédiaires

Le tableau 6 présente les nouvelles frontières de l'espace d'innovation après la prise de décision

Entité:	Fournisseur de technologie PCI→	Direction U. Steel.	Haut fournisseurs de D.
Espace :	Ensemble des entreprises ayant répondu à l'appel d'offre	Entreprise U.→	Département Fonte de D..
Représentant :	Paul Würth→ FCB	Chef de projet→	HF 2 site de D.
Dispositif d'attachement :	Cahier des charges→	Projet d'investissement à D.→	Dispositif d' injection charbon

Les symboles → indiquent la position centrale du chef de projet entre le marché des fournisseurs d'installation et les hauts fournisseurs de D.

Dans le cas français, l'engagement a été conclu entre la direction permanente de l'entreprise, et un acteur créé pour l'occasion, le chef de projet. Le processus de décision repose donc autant sur la nomination d'un chef de projet auquel sera délégué la responsabilité d'orchestrer l'activité innovante, que sur la signature d'une lettre de crédit négociée contre une promesse de résultat économique.

L'individualité du chef d'entreprise, celle du chef de projet, celle du responsable de la direction technique du site de D., enfin, sont intervenues directement dans le processus. Ils ont du engager leur nom, leur légitimité dans la bataille pour qu'un accord soit trouvé.

Du point de vue organisationnel, la nomination d'un chef de projet introduit une nette rupture dans l'activité productive. Le cadre de l'activité innovatrice ainsi créé a constitué une forme de lieu à part de l'activité productive, justifiant la formation d'une équipe et d'alliances externes ad hoc.

3) Mise en projet et réalisation

A travers des dynamiques très différentes, la rencontre entre l'espace d'innovation et l'organisation a abouti, dans les deux entreprises, à la *mise en forme projet*. On peut comprendre l'adoption de cette forme comme un effort à la fois pour clore l'espace d'innovation (image de l'entonnoir' de Hatchuel 1996) et comme la formation d'un cadre d'action facilitant la lisibilité et l'évaluation des actions par les acteurs (Thévenot 1996). Plusieurs formes d'engagement ont pu se succéder au cours du processus d'innovation. La forme projet facilite un engagement mutuel ferme et stable et du même coup, la stabilisation des frontières de l'espace d'innovation, entre acteurs de contexte, et acteurs de l'innovation. La mise en projet représente un effort pour quadriller le terrain de l'action innovatrice et faire accoucher les acteurs de l'objet technique. Soulignons la présence de cette mise en forme aussi bien au Japon qu'en France. Dans les deux entreprises, la forme projet est le résultat de la tension entre organisation et espace d'innovation. Néanmoins, la comparaison fait apparaître deux modes de définition du contexte de l'action innovatrice. L'un s'appuie sur l'espace organisationnel existant pour tisser une série de relations internes entre producteurs et utilisateurs. Le second consiste à créer un acteur pour l'occasion, le chef de projet, chargé d'arbitrer, d'évaluer et de coordonner les actions en fonction des repères temporels, techniques, financiers résultant des négociations avec la direction, et de provoquer la coordination de l'offre et de la demande technologique.

La mise en projet correspond à un effort de clôture de l'espace d'innovation, débouchant sur la mise en place plus ou moins réussie d'un objet technique. L'effet de rigidification qui s'ensuit rend l'espace d'innovation particulièrement sensible et fragile vis à vis d'événements ou de comportements

imprévus. La dualité action-représentation prend l'allure d'une confrontation entre des hypothèses et des réalisations. Les cahiers des charges, les plans, les calendriers sont l'objet d'interprétations et d'évaluations. Ils forment également le support essentiel de coordination des actions. Dans la construction de l'objet technique se trouvent posées les questions des conditions de production-reproduction et des conditions d'usage futur de celui-ci.

Au Japon, l'organisation du transfert est passé par un agencement prenant explicitement en charge tant la reproduction que l'usage de l'objet au delà de sa clôture: les acteurs mobilisés (usagers du site et producteurs du PET) savaient que leur engagement avec l'objet irait au delà de l'horizon temporel du processus d'innovation. De ce fait l'espace d'innovation est presque totalement aligné sur une projection de l'objet dans l'avenir. En France, à l'inverse, le chef de projet a pris soin que la réalisation de l'objet technique soit conforme au plan élaboré, sa mission, et celle des fournisseurs qu'il a mobilisé prenant fin, en principe, avec la clôture de l'espace d'innovation et la mise en service de l'installation.

3.1) Mise en oeuvre à J. Steel: coordination par inscription dans l'organisation

L'espace d'innovation a été profondément modifié à l'occasion de la *remontée en généralité*, et de la représentation collective de l'action, comme l'indique l'épisode de la dépossession des acteurs de K. S'ils n'ont pas réussi à obtenir les ressources pour construire une première installation sur leur site, les acteurs de K. ont en quelque sorte été victime de leur succès, d'un excès d'intéressement plutôt que d'un échec. Aussi, les principales mises en équivalences qu'ils avaient réalisées, l'espace d'innovation qu'ils avaient commencé à créer, l'objet technique qu'ils avaient commencé à imaginer ont été, pour l'essentiel, repris et acceptés par les autres acteurs.

Mais le point essentiel est le *renversement de l'espace d'innovation* à travers son inscription dans l'organisation, dans les espaces et les réseaux existants de l'entreprise J. La forme de l'engagement, collective et participative a abouti à la définition d'un plan complet et instrumenté. Après la prise de décision, les acteurs de l'innovation ont changé, et ils se sont trouvés pris dans un cadre d'action très défini. Ils se sont trouvés mobilisés par l'entreprise, plutôt qu'ils ne l'ont mobilisée. Il n'est pas faux de dire qu'à partir de la prise de décision, l'acteur de l'innovation est devenu l'entreprise J. Steel. L'espace a été inscrit, aligné dans l'organisation à tel point que ses frontières s'en sont trouvées presque confondues avec elle. Les acteurs chargés de la réalisation de l'installation ont été recrutés dans l'organisation durable de J. Steel, les ingénieurs du PET représentant la capacité de production technologique de l'entreprise, et les cadres, ingénieurs et opérateurs de O., représentants la capacité de production de fonte du site de O. C'est ici l'organisation routinière qui a été dilatée pour

donner lieu à un espace d'innovation. Le hf 1 du site de O. a été instrumenté comme un prototype, le représentant des haut fourneaux de l'entreprise, et plus largement des haut fourneaux japonais. Il a cessé d'appartenir au seul site de O. pour devenir l'objet d'un apprentissage collectif. L'expression *créativité organisée* nous semble parfaitement convenir pour caractériser cette situation (Lanciano et Alii 1993).

Armco est demeuré le point de passage obligé du transfert de technologie. Le transfert de la technologie Armco vers le Japon est demeuré l'objectif essentiel intéressant l'ensemble des acteurs. La veille de la grande réunion technique tenue au siège de J. Steel fin mars pour fixer les procédures du transfert, entre une dizaine d'ingénieurs d'Armco, les représentants du PET, du siège et du site de O., une entrevue a été organisée entre les acteurs de K. et leurs homologues de O. Symboliquement, les acteurs de K. ont eux même transmis le dossier et les rapports relatifs à l' 'injection de charbon' "*de la main à la main*", transférant ainsi "*officiellement le pouvoir de mener ce projet*" (³⁴⁸). Si le *butcho du siège*, responsable moral du projet, a assuré symboliquement la continuité du projet, dans les faits, une nouvelle équipe a pris place à partir du moment où J. Steel est entrée dans la phase de mise en oeuvre. Les producteurs-concepteurs et les utilisateurs de la future installation ont été mis en étroite relation.

La forme projet au Japon a consisté à désigner, outre un budget, les principales caractéristiques de l'installation et les performances industrielles à atteindre - début 1982, 55kg /tonne de fonte dans des conditions de haut fourneau maîtrisé et à mise au mille faible - une procédure de coordination de l'action, et les principaux acteurs responsables de la mise en oeuvre du projet. Le contexte de l'action résultant de la mise en projet a été étroitement défini. Nous verrons dans la suite que cette forme d'engagement correspondait bien à la logique utilisée par J.Steel pour le transfert: installer à O., une installation la plus fidèle possible à la technologie Armco, mais conçue par les ingénieurs de J. Steel (³⁴⁹).

Comment transférer une technologie (³⁵⁰)? La leçon japonaise, exécutée avec une maîtrise parfaite de l'exercice, est la suivante: pour *domestiquer* une technologie étrangère, il faut se fondre dans sa logique, l'*imiter*, ou plus précisément imiter sa forme. Dans ce but, entre fin Mars 1980 et octobre 1980, un ballet bien orchestré composé de personnes et d'objets a été mis en place entre trois lieux essentiels: l'usine d'Ashland, le siège de J. Steel - en particulier son Département ingénierie - et le site de O.

³⁴⁸ Entretien responsable département Fonte J. Steel, Japon, septembre 1996.

³⁴⁹ En ce sens, et dans ce contexte restreint d'utilisation, on peut parler d'"imitation" c'est à dire d'innovation par fidélité.

³⁵⁰ Le terme transfert de technologie est fréquemment utilisé, avec une certaine désinvolture en particulier dans la littérature économique. Pour avoir eu l'occasion de passer de l'autre côté de la barrière en étant chargé de mettre en place ces transferts vers un pays en Voie de Développement, il me semble que ceux-ci sont tout sauf automatiques, et ne peuvent pas, sauf cas exceptionnel être ramenés au simple achat d'un objet prêt à l'emploi. De ce point de vue de 'praticien', la maîtrise japonaise

Le *filet organisationnel* japonais chargé de saisir la technologie Armco a été formé d'une matrice mêlant logique fonctionnelle en trois niveaux - encadrement, conception de l'installation, utilisation de l'installation - et décomposition par métier - mécanique, électrique, instrumentation - selon une logique respectant *l'espace de qualification* et ses hiérarchies. Le réseau d'acteurs formant à la fois les conditions futures d'utilisation -exploitants du site - et de reproduction de l'objet technique - PET et PMD - a ainsi été représenté systématiquement. La forme de l'organisation retenue représente une véritable traduction organisationnelle de l'inscription de l'innovation au cœur de la fonction de production (Gaffard 1990). Les échanges ont été organisés essentiellement selon cette logique matricielle, par binômes -PET et site de O., site d'Ashland et PET, site de O- site d'Ashland. La mise en place de binômes marque la volonté de favoriser les ajustements d'interaction entre offreurs et demandeurs de technologie, et à forger une expérience coopérative dans ce domaine.

Dans cet agencement, le PET et le PMD ont occupé une position centrale, représentant le vecteur essentiel de la traduction technologique entre producteurs et utilisateurs. Une division du travail articulant d'un côté les acteurs du PET chargés d'accumuler des compétences à portée généralisatrice, les singularités 'locales' étant prises en charge préférentiellement par les acteurs des sites. L'objectif du PET était d'acquérir les *algorithmes*, les modèles de calcul de l'optimisation technologique "*qui permettent d'adapter ce genre d'équipement à différents sites*"⁽³⁵¹⁾. Trois missions se sont ainsi succédées. L'une, composée de l'encadrement, a eu pour but de saisir "les mécanismes de base" de la technologie. La seconde, à l'occasion de laquelle les ingénieurs américains ont pu corriger les plans de leurs élèves japonais, a été centrée autour d'une épreuve de conformité des plans. La troisième, composée de contremaîtres, s'est focalisée sur l'acquisition des "*savoir-faire d'opération au niveau le plus concret*" (ibid.). Le PET a occupé une position intermédiaire de traducteur, interposé entre les différents acteurs du site de O. participant à l'opération et leurs correspondants chez Armco. Cette position de "*bridging organisation*" traduit, sur le plan du design organisationnel, la logique de transfert de site à site qui a prévalu dans le processus d'innovation japonais. Il ne s'agissait pas de transférer un objet technique, mais également les principes technologiques, les détails de l'usage et de la mise au point de la fonction de production avec injection de charbon.

L'ensemble de la démarche s'est appuyée sur la série d'objets mis en circulation dans l'organisation matricielle ad hoc. Deux séries d'objets intermédiaires essentiels ont été envoyés par Armco pour permettre aux concepteurs japonais de produire des plans conformes à leur technologie: les logiciels contenant les algorithmes d'optimisation de l'installation en fonction des sites adressés au

de cet exercice est tout à fait impressionnante et probablement très exceptionnelle. Il m'est difficile de ne pas considérer qu'elle résulte d'une longue expérience, et sur ce point, le texte de Freeman est très éclairant (Freeman 1987, 1988).

³⁵¹ Entretien Département central d'Ingénierie, Futsu, J. Steel, octobre 1995.

PET, et les plans de l'installation Armco d'injection de charbon. Les logiciels représentaient l'essentiel de ce que les ingénieurs japonais du PET appellent les know how, les règles de calcul d'optimisation, fruit des améliorations successives et de expérience d'Armco. Les plans représentaient alors une forme de représentation graphique de ces modèles de calcul, *une illustration* sur la base de laquelle les ingénieurs ont pu discuter, l'expression de leur raison graphique (Henderson 1995³⁵²). Les plans ont ainsi constitué l'objet essentiel de discussion et de coordination circulant entre les ingénieurs (Suchman 1988). Au plan Armco a succédé le plan J. Steel, adapté au fourneau japonais à forte pression, à haute température de vent, à large capacité. Les ingénieurs de J. Steel ont-ils saisi la manière dont une installation d'injection Armco se calcule? Les concepteurs de J. Steel ont accompagné leurs plans finaux chez Armco pour obtenir des assurances sur cette question.

L'étude détaillée de la mise en oeuvre du transfert montre que celui-ci n'a pas consisté à appliquer une représentation prête à l'emploi. Les acteurs de J. Steel ont assuré un bricolage maison de la nouvelle installation, même si sur la forme, celle-ci devait rester fidèle à la technologie Armco. Le plan, la représentation graphique, a été utilisée comme un support à la coordination, comme une projection de l'action et de sa direction. Elle a été l'objet d'une circulation, d'une confrontation, d'une comparaison fondée sur des critères de fidélité et de ressemblance. De la même manière que la remontée en généralité avait facilité l'implication de ressources sur une temporalité dépassant les conditions limitées de l'espace d'innovation, l'organisation du transfert de technologie a visé à faciliter l'accumulation de compétences autonomisées de production de l'objet technique. Au delà des apparences d'un cadre d'action dessiné pour garantir la fidélité, les acteurs de J. Steel ont mené un effort continu pour mesurer, instrumenter, expérimenter, de façon à s'abstraire des conditions singulières de l'action menée dans le cadre de l'espace d'innovation, pour remonter en généralité vers des règles à validité plus larges, reprendre, tester, discuter des règles et modèles généraux établis par Armco. Cette tendance est visible dans les deux exemples suivants.

Premièrement, à l'automne 1980, alors que les travaux de construction de la première installation sur le hf 1 étaient sur le point d'être lancés, un prototype a été réalisé sur une tuyère du haut fourneau 2 du site de O. dans le but de procéder à des essais. Les expériences menées portaient sur la combustion et le transport du charbon, ou la forme du raceway. Il s'agissait ainsi de tester certaines hypothèses formulées, et en particulier de déterminer les effets du charbon sur le haut fourneau, en comparaison au fuel. Il s'agissait également de caractériser et d'optimiser la technologie. Quels étaient les effets des positionnement des lances? Quels étaient les effets de différents types de charbon? Comment le charbon pulvérisé réagissait-il à l'atmosphère saturée d'eau de la mousson que connaît périodiquement le Japon? Ces expériences n'ont été suffisamment systématiques pour

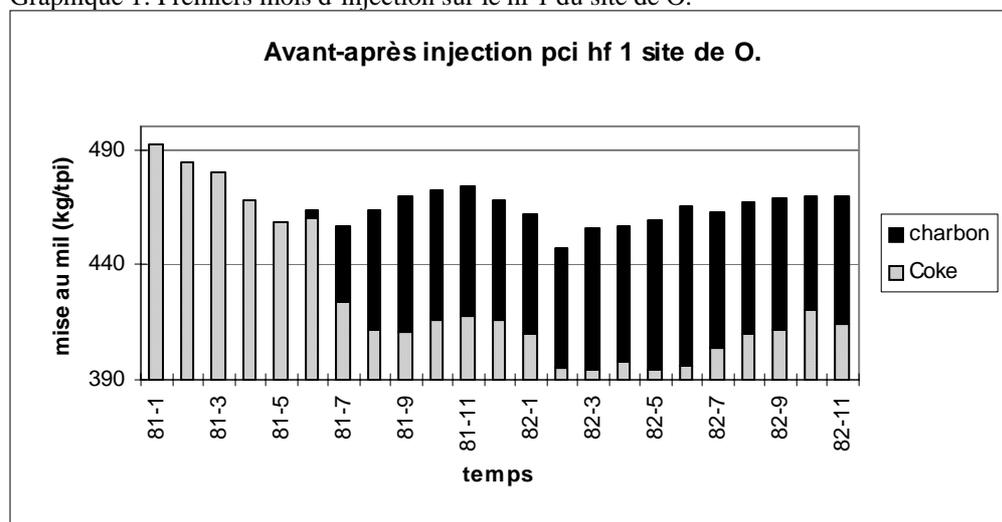
³⁵² Henderson, K. (1995) "The visual culture of engineer" in: Star, S. (ed) *The Cultures of Computing*. Blackwell, pp. 158-180.

constituer des recherches à proprement parlé. Elles se comprennent comme l'élaboration d'un certain nombre de points technologiques dans le cadre privilégié de l'espace d'innovation.

Deuxièmement, aux différentes étapes de la montée en cadence, les opérations du hf 1 ont été savamment instrumentées, mesurées, contrôlées. Quels sont les caractéristiques de marche de la technologie? Est ce que les mesures correspondent aux estimations réalisées en laboratoire? Est ce qu'elles sont comparables aux expériences avec le fuel? Les principaux indicateurs utilisés dans l'injection de fuel sont ils toujours valables avec le charbon? L'un des résultats essentiels a consisté à montrer que l'injection de charbon est équivalente à l'injection de fuel et par conséquent, que l'expérience interne et les outils accumulés en matière d'injection de fuel étaient transférables.

Outre l'efficacité d'un tel agencement dans la conception de l'innovation et l'atteinte des objectifs fixés - 55 kg/ t de fonte étaient injectés sur une base régulière au hf 1 de O. dès novembre 1981 et l'injection à basse mise au mil était assurée en février 1982 - l'efficacité temporelle de la gestion du projet a été remarquable - début mai 1981 les premiers essais des équipements ont eu lieu et l'injection a été lancée sur une base régulière dès le mois de juin 1981. En seulement 6 mois, les plans de l'installation d'O. ont été mis au point par les ingénieurs du PET en étroite collaboration avec le PMD, Département de Machinerie chargé de construire l'essentiel de l'équipement, et de commander le reste. L'installation a été construite en 6 mois.

Graphique 1: Premiers mois d'injection sur le hf 1 du site de O.



Source: Reproduit d'après Wakuri et Alii (1983) op cit. et rapport interne bilan J. Steel.

Le graphique indique le respect du calendrier et la maîtrise de la montée en cadence, une montée en cadence très rapide à 55 kg de charbon pour définir les conditions optimales pour l'injection de charbon pendant le premier semestre, puis une exploration des conditions de mise au mil minimales de coke début 1982. La régularité de la mise au mil sur toute la période est remarquable et indique la maîtrise technique du fonctionnement de l'outil.

Le tableau 7 présente les nouvelles frontières de l'espace d'innovation à l'occasion de la mise en oeuvre du projet

Entité:	Producteurs	Technologie	Utilisateurs
Espace	Espace technologique Mondial	Espace industriel national	Communauté des ht fournisseurs
Représentant	PET	HF 1 site de O	Ht fournisseurs de O.
Dispositif d'attachement	Prototype d'injection hf1, algorithmes	Prototype d'injection hf 1, instrumentation	Prototype d'injection hf 1, manuel d'opérateur

Graphique 2: le hf 1 de O. comme objet de mise en relation entre utilisateurs et producteurs

3.2) mise en oeuvre à F. Steel: le chef de projet comme acteur de coordination

Dans l'usine de D., la décision formelle de l'entreprise d'allouer un crédit au projet d'investissement destiné au hf 2 a été accueillie avec soulagement, mais n'a pas entraîné de grande révolution. Il n'y a pas eu de rupture organisationnelle forte au cours du processus d'innovation, comme cela a pu être le cas au Japon. Les acteurs qui avaient travaillé à la formulation d'un projet, à

l'élaboration d'un calendrier, à la formulation d'une liste de fournisseurs potentiels ont pu finaliser les contrats et cahiers des charges avec les partenaires sélectionnés lors de la formulation du projet.

Le chef de projet a été désigné pour prendre en charge la coordination des actions, le respect des spécifications, des calendriers, des budgets (³⁵³), et la combinaison des interventions des différents fournisseurs pour que l'installation hybride imaginée prenne corps. Malgré la mise en projet - calendrier, budget,- et les cahiers des charges qui s'efforçaient de définir des objectifs précis, le contexte de l'action est demeuré relativement flexible. Ces repères ont été utilisés par les acteurs comme autant d'éléments d'un plan incomplet, un cadre de référence convenu sur l'orientation des actions. Les objectifs formulés ont agi comme des obligations de résultats plutôt que comme des moyens, impératifs par rapport auxquels chacun des participants, et chacun des éléments de l'objet technique en cours de formation a pu être évalué. Le calendrier, le budget, les spécifications ont donc offert les outils élémentaires de coordination des actions pour le chef de projet vis à vis de l'ensemble des multiples intervenants, et de la réalisation conforme de l'installation. Ces éléments de cadrage ont autorisé une large autonomisation des différents prestataires, chacun prenant en charge de façon indépendante un aspect spécialisé de la production de l'objet technique.

Un tel contexte d'action a ménagé une place non négligeable aux interprétations, aux relations entre le chef de projet et les différents fournisseurs auxquels il a choisi de faire confiance pour réaliser ses objectifs. Une certaine souplesse est demeurée dans le détail du *comment* et du *quoi*. De la même manière que le chef de projet s'est vu *délégué* des ressources en contrepartie de la *responsabilité* de mise en oeuvre une série d'action devant aboutir à la construction d'une installation au hf 2 de D., il a, lui même, délégué à son tour une série d'actions à une série de fournisseurs spécialisés chargés de concevoir et de réaliser certains éléments de l'équipement global. Cette logique de *délégation en cascade* s'est accompagnée de la mise en place d'une série d'*instruments de gestion* (d'évaluation et de coordination des actions). Le chef de projet est cependant demeuré le pivot central de l'édifice, le chef d'orchestre qui a donné le tempo et coordonné les partitions interprétées par une large équipe d'intervenants externes. Il a du concevoir l'organisation du travail collectif et s'assurer de la conformité globale à l'esprit du projet et aux repères d'évaluation.

Sur l'ensemble de ces différents points, la mise en oeuvre du projet a été marquée de nombreuses difficultés. Sur le plan du calendrier, ces difficultés ont résulté en bonne partie de la décomposition de l'installation en sept principales parties, la plupart ayant donné lieu à une ingénierie propre, menée sous la coordination de CdF, Würth et/ou les acteurs de D, mais dont la réalisation a été

³⁵³ 4 personnes, dont chef de projet, ingénieur travaux neufs et deux dessinateurs ont suivi le déroulement des opérations chez D. En tout 22 sociétés ont participé à la construction de l'installation (Ingénierie, matériel électrique, instrumentation, automatismes, tuyauterie etc...)

confiée à pas moins de 22 sociétés. La plupart de études ont pris place simultanément et des chevauchements ont eu lieu dans la dernière période pendant laquelle différents montages ont dus être réalisés dans des délais très courts et dans des conditions de fin de chantier qualifiés de ‘difficiles’ (³⁵⁴). La période de conception -étude s’est étalée sur 10 mois, entre décembre 1981 et octobre 1982 pour les principaux éléments de l’équipement. Si on laisse de côté les travaux de génie civil, la construction des principaux éléments s’est déroulé sur environ 9 mois. En juin 1983, les premiers essais ont donc pu prendre place, et l’injection a été lancée le 13 juillet 1983.

Une dérive importante du budget a également marqué la réalisation de l’installation (de l’ordre de 40 % ³⁵⁵). Enfin, une partie des spécifications n’a pas été respectée dans la partie broyage de l’installation. La gestion de la complexité du chantier, liée au nombre d’intervenants indépendants à inclure dans un calendrier, à la faiblesse numérique de la mobilisation sur le site de D., à la difficulté de contrôler étroitement l’ensemble des prestations fournies, a reposée essentiellement sur la *responsabilisation du chef de projet*. Ce dernier, présent du début à la fin du processus, a dû faire preuve d’une polyvalence importante, exhiber sa maîtrise des *savoir combiner* (³⁵⁶), faire preuve de détermination et de capacités relationnelles envers les multiples fournisseurs, évaluer leurs prestations, rendre compte des dérives auprès de sa direction.... Dans une telle configuration, la personnalité du chef de projet, ses capacités d’organisation et d’adaptation ont été largement mises à contribution, par rapport au caractère nettement plus collectif et ‘organisé’ du projet japonais, ou le chef de projet, le butcho du siège a représenté une ‘simple’ autorité morale. La souplesse avec laquelle la dérive budgétaire a été gérée, indique, au delà du formalisme des procédures, la conscience qu’avait la direction des difficultés de la tâche à remplir par le chef de projet.

La montée en cadence a été également l’occasion de bien des questionnements. Une marche très difficile du haut fourneau (³⁵⁷) a ranimé une série de controverses sur le charbon: le spectre des échecs passés est réapparu et certains haut fournistes ayant connu ces échecs ont fourni des témoignages sur le lien entre le charbon et le dérèglement du haut fourneau “*il y en a qui avaient*

³⁵⁴ D’après les termes du Bilan de clôture.

³⁵⁵ Les premiers accords donnaient 46% en septembre 1980. Le dossier et l’allocation de crédit prévoyait 60%. L’investissement final s’est élevé à 100%.

³⁵⁶ pour un travail indiquant la complexité de la gestion du temps et de la construction de calendriers, voir Hatchuel (1997) sur les *habilleurs d’horaire*.

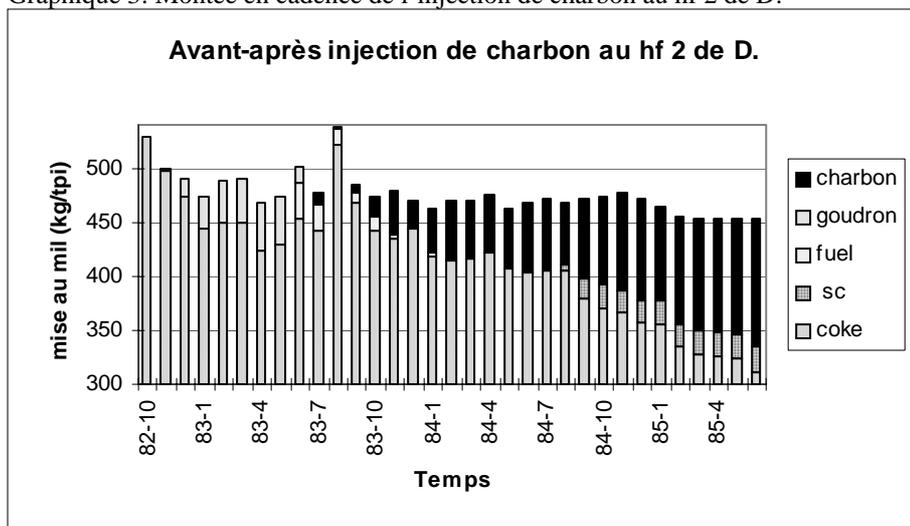
³⁵⁷ Notons que le choix du haut fourneau 2 a été effectué par défaut. Il était hors de question de commencer une première expérience sur un grand haut fourneau, comme le hf 4. Le hf 3 avait d’abord été retenu, mais une période de réfection plus longue que prévue l’a disqualifié. Enfin, le hf 1 était menacé de fermeture. Le hf 2 venait d’être refait à neuf peu de temps avant la mise en place de l’installation de charbon. Du point de vue technique, il avait donc bénéficié d’un certain nombre d’améliorations, mais du point de vue de ses conditions d’opération, comme le notait l’un de nos interlocuteurs, la réfection récente ne garantissait pas une maîtrise optimale de son fonctionnement au moment de la mise en service de l’injection. Un énorme contraste a existé sur ce point, entre la France et le Japon. L’attention portée au Japon à la maîtrise opératoire est visible dans l’organisation de la montée en cadence et dans le soin apporté à l’implication précoce des futurs utilisateurs. Une mission a été organisée à Armco uniquement dans ce but. Pendant 4 semaines, les opérateurs de O. ont travaillé en binômes avec leurs collègues américains pour maîtriser les subtilités de l’injection de charbon.

connu l'injection de charbon à Louvroil hein...ils avaient de mauvais souvenirs disons.”⁽³⁵⁸⁾. L'injection de charbon a été interrompue, reprise, l'allure du haut fourneau a varié considérablement. Plusieurs mois durant, expérience charbon semblait bel et bien devoir connaître un funeste sort.

Contrairement aux espérances formulées par les acteurs de l'innovation, l'injection de charbon n'a pas amélioré la productivité du haut fourneau, elle a à l'inverse perturbé considérablement sa marche. L'injection de charbon était suspendue pour un temps. Lorsqu'elle reprenait les phénomènes se répétaient.

A partir de l'automne, cependant, les choses ont commencé à changer. Les conditions de marche du hf 2 ont été sérieusement optimisées et le haut fourneau a commencé à accepter des doses de charbon de plus en plus élevées au fil des mois. L'installation d'injection de charbon a bénéficié d'un contexte nettement plus favorable. A partir de l'été 1984, le haut fourneau a injecté à des taux toujours supérieurs à 65 kg /tonne de fonte, la clé des calculs économiques.

Graphique 3: Montée en cadence de l'injection de charbon au hf 2 de D.



Source:reproduit d'après Allaire et Alii (1985)⁽³⁵⁹⁾ p. 797 et données rapport interne bilan U. Steel. Le graphique illustre l'instabilité de la marche du hf 2 avant l'injection, et pendant les premiers mois de l'injection. Par contre, à partir de 1984, la mise au mil et les pratiques d'injection indiquent une régularisation de la marche du hf. "Il y a eu toute la période là, quand on montait en charbon, plus on en mettait, plus c'était régulier" ⁽³⁶⁰⁾.

Le tableau 8 présente les nouvelles frontières de l'espace d'innovation après la mise en oeuvre.

³⁵⁸ Entretien responsable des hf, site de D. J Steel, janvier 1996.

³⁵⁹ Allaire, B. Graffeuille, F., Lao, D. (1985) "Injection de charbon sur le hf 2 d'U. Steel-D." in: Revue de Métallurgie, novembre 1985, pp. 789-799.

³⁶⁰ Entretien responsable Irsid du suivi injection de charbon, Maisière les Metz, janvier 1996.

Entité:	Direction U. Steel	Direction technique D.	Direction Département Fonte
Espace	Entreprise U.	Usine de D	Département Fonte
Représentant	Direction technique de D	Direction Département Fonte	HF 2 site de D.
Dispositif d'attachement	Retour sur investissement	Prix de la tonne de fonte	Dispositif d'injection charbon

IIIB. Investissements innovatifs et discontinuité technologique

Dans la partie précédente, nous avons pu observer la mise en place des espaces d'innovation, leur transformation, le recrutement des acteurs, les exercices de traduction réalisés pour rendre opérable un objet technique en voie d'émergence. Dans ce qui suit, nous allons évoquer un second aspect du processus d'innovation. Nous avons noté que toute innovation peut être conçue comme un processus d'investissement au sens élémentaire du terme (Thévenot 1985). Nous allons évoquer les logiques d'investissement à l'oeuvre dans les deux espaces, à travers deux points: la question de la fonction de production et de sa modification et la question de l'apprentissage.

1) Fonctions de production

Une installation d'injection de charbon en France, au Japon, comme ailleurs se chiffre en dizaine de millions de francs (³⁶¹). Dans les cas qui nous intéressent, l'une et l'autre installation d'injection ont représenté des montants d'investissement très similaires (³⁶²). Les ateliers de broyage à eux seuls représentent des investissements de plusieurs dizaines de millions de francs. On peut y ajouter le temps dépensé en personnel, les prototypes et essais menés, les licences et brevets payés. Les gains générés par ces investissements ont été non moins considérables, puisque les calculs japonais prévoyaient un point mort à 2 ans et demi, et les calculs français à trois ans, soit, de part et d'autres plusieurs dizaines de millions de francs (ou centaines de millions de Yen) de gain par an liés à la modification de la fonction de production (³⁶³).

³⁶¹ Armco a publié des chiffres évaluant à 16 000 000 \$ le coût d'une installation d'injection de 33 t/h soit (dollar 1981= 5,77) 92 320 000 FF. Armco estime que pour une usine injectant régulièrement 65 kg/tpi de fuel sur un haut fourneau de taille moyenne (5000 t/jour) et remplaçant l'injection de fuel par l'injection de charbon, le gain est de 5,93 \$ par tonne (34, 22 FF) et le point mort situé à 3 ans.

³⁶² Pour 100% au Japon, 99% en France.

³⁶³ L'article d'Armco estime les économies d'énergie d'une installation de 33 T/h sur un haut fourneau moyen (5000 t/jour) à 12 300 000 \$ par an soit environ 71 millions de francs. Fletcher, L. (1981) "Technical and Economic aspects of Coal Injection at Blast Furnace Tuyeres" in: AIME Ironmaking Proceedings, Toronto, May 1981, pp. 142-145.

Formellement, ainsi que nous l'avons évoqué dans la première partie de cette thèse, l'injection de charbon consiste à ajouter une matière première 'flexible' à la fonction de production 'tout coke' d'un haut fourneau. Plus la part de ce facteur est importante, plus la part du facteur 'coke' peut-être réduite, dans une limite estimée à une centaine de kg par tonne de fonte (³⁶⁴). Un arbitrage à court terme se joue néanmoins en fonction de la capacité de cokerie installée dans l'usine, le niveau de production, et les prix relatifs des matières (³⁶⁵). Ainsi, dans la plupart des usines japonaises et dans certaines usines françaises, le parc de cokerie était suffisamment important pour satisfaire les besoins des haut fourneaux. Dans certains cas *“globalement, le coke qu'on fabriquait () coûtait à peine plus cher que le charbon qu'on y mettait. Simplement parce que quand on fait du coke, on prend du charbon à..il est un peu plus cher, il doit être à 5c la thermie d'accord, on fait avec un rendement excellent du coke et du gaz. Et ce gaz était utilisé dans les fours, trains à bande etc pour le réchauffage, si on n'avait pas ce gaz de cokerie, on mettait du gaz nat. Ben, le gaz nat à l'époque, il coûtait à peu près, un peu moins cher que le fuel, mais il y a des moments où il est monté à 16c 18c la thermie. Donc on prenait du charbon à 5c pour en faire du gaz qui pouvait être valorisé au même prix que le gaz nat. Moralité, le coke pouvait être moins cher que le charbon”* (³⁶⁶).

L'un de nos interlocuteur se souvient que le Japon s'est trouvé dans une situation singulière:

“Donc avec la crise pétrolière, on s'est trouvé devant le phénomène qui était: bon il fallait trouver un substitut au fuel, mais l'abandonner. Alors dans certains cas, dans certains pays, ça a été abandonné, en particulier au Japon [...] ils sont purement et simplement passés en marche tout coke, à la fin des années 70, ils ont même été, à ce moment là, ils ont changé complètement de cap sur le hf puisqu'en 75-76-77, la recherche c'était très basse mise au mil sur les hf, c'était toujours d'actualité, c'était les meilleurs du monde, et puis là, ils se sont dit 'ben voilà, avec le prix du fuel, étant donné que le prix de l'électricité est basé sur le prix du fuel au Japon, le prix du fuel augmente de façon considérable, il faut absolument utiliser le gaz de hf du point de vue énergétique', et ils avaient, je dirais, pour eux, que la valeur d'usage du gaz de hf était la même, techniquement que celui du fuel, donc le gaz de hf fournit une valeur fort importante, et à ce moment là, ils n'ont plus cherché à faire de basses mises au mil, ils ont cherché à faire les mises au mil les plus hautes possibles. C'est pas facile de faire très bien marcher un hf en tout coke - c'est à dire déjà avec plus de mise au mil déjà au départ - mais encore plus, ils cherchaient à faire de très hautes mises au mil parce qu'ils valorisaient très bien le gaz du point de vue économique. Donc pour eux, le virage a été totalement différent du notre, et je crois que c'est important de le retrouver quand on veut faire la comparaison -eux c'est pas économiser le coke, c'est au contraire en consommer le plus possible, et ils avaient quand même un avantage pour ça, c'est qu'ils avaient tous construit des cokeries importantes, et qu'ils avaient des disponibilités en coke” (³⁶⁷).

En fait, ainsi que nous l'avons indiqué, les fonctions de production constituées à travers la mise en place des injections de charbon n'ont pas été les mêmes en France et au Japon.

³⁶⁴ Les documents français du début des années 1980 estimaient la limite d'injection à environ 120 kg. Les documents japonais à environ 120 kg/tonne de fonte.

³⁶⁵ A titre indicatif, les estimations auxquelles nous avons eu accès donnaient les chiffres suivants: écart entre le charbon vapeur à injecter et le charbon à coke 9% au Japon et 20% en France. Valorisation du gaz produit dans les cokeries en 1981 1,5 Y en France contre 6 Yen au Japon.

³⁶⁶ Entretien chef d'équipe de recherche, Irsid, Maizières les Metz, janvier 1996.

³⁶⁷ Entretien ancien responsable des haut fourneaux de D., siège de F. Steel, janvier 1996.

1.1) Un investissement innovatif chez J. Steel

Localisation, spécification des ressources et stabilisation de la fonction de production

Au Japon, chez J. Steel, l'injection de charbon a été mise sur pied en substitution à l'injection de fuel, comme "*petit complément au coke*", pour faciliter l'optimisation des haut fourneaux. D'emblée, la création technologique a été inscrite dans la perspective d'une fonction de production, telle qu'elle avait été optimisée avec l'injection de fuel. La nouvelle fonction de production, intégrant la technologie d'injection de charbon, devait donc permettre la reprise des objets techniques, des instruments de mesure, des compétences et des connaissances développées autour de l'injection de fuel. Pour garantir que la mise en place du nouvel objet technique ne provoquerait pas l'obsolescence rapide des actifs acquis précédemment – lesquels actifs avaient assurés un leadership national et mondial à l'entreprise en matière de production de fonte - une série d'investissements ont été réalisés en recherche pour évaluer les conditions dans lesquelles le charbon se comporterait comme le fuel dans les foyers du haut fourneau.

L'ensemble de l'investissement innovatif a été construit autour du hf 1 de O. Nous avons noté la perspective de représentativité dans laquelle ce choix a été pris chez J. steel. Au delà, la localisation sur le hf 1 de O. a permis d'envisager la stabilisation de l'objet technique et la mise en place d'irréversibilités. La première installation, bien qu'elle ait été inscrite dans un contexte à large validité, a été ajustée à ce haut fourneau. Les modèles virtuels d'installation d'injection, et leurs hypothèses, ont été traduits en attributs et en caractéristiques d'une installation qui a progressivement vu le jour. Cette localisation a ouvert la possibilité de stabiliser une certaine relation entre ressources et produits, à partir d'une expérience pratique. L'épreuve ultime a consisté à faire fonctionner le haut fourneau de façon optimale avec l'injection de charbon. Le soin apporté à la montée en cadence souligne l'importance accordée à cette épreuve pratique, et à son instrumentation technique et économique dans l'évaluation de la qualité de la technologie.

Le souci de stabilité, de la marche du haut fourneau, mais aussi, de l'ensemble de l'objet technique et de son contexte ont fait l'objet d'un surinvestissement important, chargé de limiter le risque et l'incertitude par la création de marges et de degrés de liberté facilitant l'apprentissage et l'optimisation. Dans le cas japonais, le terme investissement innovatif a pris tout son sens : les calculs

semblent avoir été adaptés pour intégrer l'incertitude relative au caractère innovatif de l'action, et pour créer des opportunités d'apprentissage par les acteurs, à travers l'optimisation de l'outil.

La spécification des ressources a représenté un effort permanent tout au long du processus de mise en projet. Les ressources humaines ont été détournées de la production et formées dans le processus de création technologique. A travers l'organisation d'une matrice organisationnelle représentant l'espace de qualification de production, la technologie accumulée s'est appuyé sur des ressources formées sur le long terme. La technologie a été transférée d'Armco et transformée dans le processus de création technologique par adaptation au haut fourneau de O. La matière première enfin a fait l'objet d'investissements spécifiques pour que soient définies les qualités et les procédés optimaux de sa préparation et de son injection dans le haut fourneau de O.

Dans ce qui suit, nous entrons plus avant dans le détail de ces différents points à partir de trois clés d'entrée : les *arbitrages* réalisés pour localiser et traduire les hypothèses en caractéristiques d'installation, l'*inscription* de l'objet technique dans la nouvelle fonction de production, et les *autres formes d'investissements* réalisés dans le souci d'éviter l'obsolescence des actifs existants.

Arbitrages

Quels ont été les principaux objectifs fixés par la mise en projet? Comment interpréter la logique sous jacente à ces arbitrages? Quels ont été les risques pris?

La clé des calculs économiques a été fixée à un taux d'injection de 55 kg/ t de fonte au hf 1 de O. Ce chiffre traduit, outre la volonté de remplacer du coke externe, le caractère instrumental de l'injection de charbon pour les haut fourneaux japonais, utilisée comme 'paramètre de réglage' par rapport aux marches tout coke -'équivalent to an oil-injection rate of 30-40kg/t' (³⁶⁸)- : "*l'opération avec all cokes non seulement coûtait cher, mais aussi déstabilisait les mouvements du haut fourneau. Il faut se rappeler qu'à l'époque, on cherchait simplement un substitut pour un petit complément au coke*" (³⁶⁹). Ce chiffre correspond à un niveau sensiblement inférieur à ce qu'Armco était en mesure d'injecter à l'époque, ce qui laisse à penser qu'en ce qui concerne l'utilisation de l'injection de charbon, les décideurs n'ont pris aucun risque industriel quand à la faisabilité du projet. L'installation devait être un succès avant tout. Il était prévu de tenter des taux d'injection plus élevés lorsque le nouvel ensemble haut fourneau japonais-injection de charbon serait parfaitement stabilisé et maîtrisé, tant sur le plan technologique, que sur le plan opérationnel, mais cela n'a pas constitué un objectif

³⁶⁸ Wakuri et Alii (1983) "Pulverized-coal injection into n°1 blast furnace at O. Works, J. Steel" in: *Ironmaking and Steelmaking*, Vol 10, n° 3, pp. 98-103.

³⁶⁹ Entretien Département central d'ingénierie, Futsu, J. Steel, Février 1996.

majeur. L'objectif central visait à définir les conditions d'injections optimales permettant à l'injection de charbon d'être utilisée de façon équivalente à celle du fuel. L'hypothèse formulée concernant le taux de remplacement du charbon était 1,0 . Ce chiffre a été calculé sur la base du modèle interne du haut fourneau de J. Steel, déjà utilisé et mis au point pendant la période d'injection de fuel ⁽³⁷⁰⁾. Il correspondait aux performances atteintes par Armco.

Le second point important quand aux arbitrages réalisés concerne le dimensionnement de l'installation, et en particulier des broyeurs. Sur le conseil d'Armco, deux broyeurs ont été installés. Forts de leur expérience en matière de fiabilité des broyeurs verticaux, les acteurs d'Armco ont recommandé l'installation de deux broyeurs plutôt qu'un *“Sur le conseil d'Armco, nous avons mis deux broyeurs. Lorsqu'une machine étant en panne, on alimentait avec l'autre et vice-et versa”* ⁽³⁷¹⁾. Un important surinvestissement en a résulté. Pour injecter 55kg/ t de fonte au hf 1 de O., le dimensionnement théorique correspondant de l'atelier de broyage est d'environ 25t/ heure. L'atelier de broyage a été commandé à un constructeur japonais licencié par Babcock (le fournisseur d'Armco) une installation composée de deux broyeurs verticaux de 25 t/ heure, soit environ le double de la capacité requise ⁽³⁷²⁾.

Deux éléments sont intervenus principalement dans ce surdimensionnement. Premièrement, les concepteurs de la première installation, du fait de son caractère innovant ont systématiquement augmenté les marges de sécurité et surinvesti de manière à maximiser les chances de succès de l'opération. C'est le sens des propos de l'un des acteurs impliqués dans le processus d'innovation. *“Il y a eu un surinvestissement au départ pour raison de sécurité. Par exemple la pression. Armco nous avait conseillé de fixer le seuil de tolérance des lignes à 21 kg de pression alors que 7 ou 8 kg suffisent en principe. Cela représente un surcoût assez considérable”* ⁽³⁷³⁾. Il est important de noter que le premier investissement joue traditionnellement le rôle de *prototype* *“Chez J. Steel, le premier appareil qu'on introduit, ça a un rôle précis, ça a un rôle de prototype. Donc ils ont fait fonctionner cette installation pendant un an, sans doute sans problème puisqu'ils ont renforcé le premier appareil - comme c'est le premier on n'a pas pris de risque et sans aucun doute , on a surinvesti pour consolider les appareils-”* ⁽³⁷⁴⁾.

Le hf 1 de O. est l'un des gros haut fourneaux de J. Steel, l'un des haut fourneau important au Japon. Il se situe dans l'une des deux usines leader de l'entreprise. Un échec aurait été retentissant. Il aurait eu des conséquences économiques importantes pour la société et le site considéré. La réussite du

³⁷⁰ Il correspond également au chiffre donné par Armco. Fletcher (1981) op cit.

³⁷¹ Entretien responsable Département Fonte, site de O., Japon, septembre 1996.

³⁷² Obligeant d'ailleurs le fournisseur H., à produire pour la première fois un broyeur d'une aussi grande capacité.

³⁷³ Entretien responsable Département Fonte, site de O., Japon, septembre 1996.

³⁷⁴ Entretien retraité, ancien responsable de la recherche Fonte, J. Steel, novembre 1995.

projet revêtait par conséquent un caractère stratégique. L'échec n'aurait pas été acceptable. Le pari a donc consisté à la fois prendre un risque technologique lié au double transfert (hf américain → hf japonais) (hf de taille moyenne → hf de grande taille à forte pression 'représentatif'), donc d'introduire d'emblée une installation en double rupture par rapport à l'existant (risque technologique), mais en assurant, par ailleurs, au projet une précaution maximum dans sa réalisation industrielle. Deuxièmement, la conception de l'installation a été réalisée dans un esprit de fidélité la plus grande possible vis à vis des recommandations d'Armco. Armco étant considéré comme le plus avancé en matière technologique, les concepteurs sont partis de l'idée que ses recommandations devaient être respectées en priorité "Pour la première installation, c'est à dire lors de l'installation de PCI à O., nous avons suivi de façon fidèle, formule par formule, les know how fournis par Armco" (³⁷⁵).

Inscription de l'installation dans la fonction de production

L'équipement de broyage a été repris à partir de l'expérience Armco. Contrairement au reste de l'équipement, la partie broyage a été traitée comme une boîte noire. Les raisons avancées pour justifier ce statut particulier sont au nombre de deux. D'abord, la technologie de broyage, tant à l'étranger qu'au Japon, était relativement courante -dans les centrales thermiques et les cimenteries par exemple - et était considérée par les acteurs de J. Steel comme bien maîtrisée. Le rapport original des chercheurs de K. concluait ainsi que les "technologies utilisées dans les chaudières des cimenteries semblent applicables au haut fourneau". D'autre part, l'appareil de broyage a été considéré comme la seule difficulté technologique importante de l'injection "En ce qui concerne PCI, en fait, il n'y a pas de grosse difficulté technique... c'est plutôt simple sauf le broyeur à charbon. Pour ce dernier, il existe des constructeurs chez qui il est possible de les acheter..." (³⁷⁶).

A l'inverse, un soin extrême a été accordé à l'adaptation de l'ensemble transport-injection. Ces adaptations ont visés à la fois l'adaptation de la technologie à un appareil de grande taille à pression interne élevée, et aux exigences élevées des haut fournistes japonais en matière de performance: en d'autres termes, ils ont visé l'inscription de la nouvelle installation dans l'ensemble de la fonction de production. Les principaux efforts d'adaptation ont ainsi porté sur le réglage de la pression du gaz de transport, sur l'amélioration du layout des tuyaux, et sur l'amélioration du design du distributeur Armco. A partir du moment où J. Steel disposait d'une technologie d'injection de charbon pulvérisé permettant de maîtriser la forme et la taille du raceway, les effets thermiques et les échanges gazeux qui s'y produisaient, d'une façon équivalente à ce qui avait été progressivement mis au point pour le fuel, J. Steel tenait la possibilité d'optimiser la marche de ses haut fourneaux.

³⁷⁵ Entretien ingénieur Département central d'ingénierie, Futtsu, J. Steel, Japon, février 1996.

³⁷⁶ Entretien ingénieur Département central d'ingénierie, Futtsu, J. Steel, Février 1996.

Autres formes d'investissements associées: inscription dans les réseaux existants

Nous venons d'évoquer l'importance des ajustements destinés à réaliser l'inscription de l'installation dans la nouvelles fonction de production du hf 1 de O. Deux autres aspects de l'investissements, relatifs à son utilisation optimale ont également fait l'objet d'une attention singulière.

Premièrement, d'importants efforts ont été déployés pour favoriser l'ajustement entre la nouvelle fonction de production et les savoir opérationnels détenus par les haut fournistes. Le haut fourneau constitue traditionnellement un appareil pour lequel les savoir d'utilisation sont à la fois importants et respectés. Malgré des dizaines d'années d'efforts pour tenter de percer les mystères de son fonctionnement et de son optimisation de façon scientifique, le haut fourneau, procédé typiquement issu du sens pratique, résiste avec entêtement aux investigations de la recherche. Les savoir d'opération et les qualifications des contremaîtres chargés de diriger la conduite des haut fourneaux y sont donc particulièrement reconnus. Les utilisateurs, à différents niveaux, ont été associés à la mise en oeuvre du projet de la conception à la montée en cadence. Les représentants des détenteurs de savoirs opérationnels ont pu se préparer progressivement aux changements devant intervenir dans la fonction de production: une mission sur les trois réalisées à Armco a été réservée exclusivement à cette fin. Certains opérateurs et contremaîtres ont ainsi pu bénéficier d'une formation d'une durée d'un mois chez Armco, où ils se sont trouvés en mesure de conduire l'installation Armco, déjà équipée de l'injection de charbon, et de partager les postes en binôme avec leurs homologues américains (³⁷⁷).

Deuxièmement, des efforts non moins considérables ont été déployés afin d'ajuster la nouvelle fonction de production et les *instruments de gestion*. Le haut fourneau 1 de O était, à l'instar des haut fourneaux japonais performants, un appareil très instrumenté. Pour permettre d'améliorer l'optimisation de la conduite des hauts fourneaux, J. Steel avait réalisé un série d'investissements pour tenter de mesurer un certain nombre de paramètres clés. D'importants investissements de forme avaient ainsi été réalisés sur la fonction de production avec injection de fuel. La maîtrise japonaise de la fonction de production fonte (en particulier le leadership de J. steel) était largement reconnue à la fin des années 1970. J. Steel s'est efforcé de glisser le charbon dans les modèles, dans les instruments, dans les techniques d'optimisation au fondement de son leadership technologique.

L'un des points essentiels de la logique d'investissement de J. Steel a résidé dans un effort de mise en équivalence entre les deux matières. Ainsi, le charbon et ses caractéristiques ont été formatés

pour pouvoir s'inscrire aisément à la place du fuel. Une série de recherches ont visé à préciser les conditions précises dans lesquelles le charbon se comporte comme le fuel : tant que le charbon contient 33% de matière volatile, que sa teneur en cendre est de 7%, que le taux de pc ne dépasse pas 80kg, et que sa granulométrie respecte la règle des 80% inférieur à 74 microns, *“the effect of pulverized coal on the raceway is the same as oil injection”*⁽³⁷⁸⁾.

L'une des premières modification intervenue sur l'objet technique, entreprise par les ingénieurs de J. Steel a concerné les cellules de mesure de débit global de charbon permettant de connaître avec précision la quantité de charbon injectée. S'étant assuré de la fiabilité de cet indicateur, les haut fournistes japonais ont pu l'intégrer dans le tableau de bord constitué d'une bonne quinzaine d'indicateurs de ce type, en remplacement de l'indicateur de niveau d'injection de fuel. Le tableau de bord comprend des courbes liées à des indicateurs de performance - productivité, mise au mille, qualité du produit- et des indicateurs de conditions d'injection - état du vent, état interne du haut fourneau-

Cet ensemble constitue un tableau de bord facilitant l'optimisation des opérations au haut fourneau pour les opérateurs. Plus largement, les courbes peuvent être lues par d'autres hauts fournistes, par la direction de l'entreprise, et même par d'autres utilisateurs (hors entreprise), dirigeants ou haut fournistes, comme en témoigne la mobilisation de ces indicateurs à l'appui des arguments en faveur de l'injection de charbon dans les articles publiés par J. Steel. Dans l'univers des haut fournistes, cette représentation des opérations (ou données d'opération) constitue un repère essentiel de conduite de l'action, mais aussi un repère d'évaluation, et de légitimation technique ⁽³⁷⁹⁾ ⁽³⁸⁰⁾.

³⁷⁷ En France, aucune formation spécifique n'a été prévue pour les opérateurs, sauf des 'réunions d'explication'.

³⁷⁸ Rapport J. Steel, bilan technique.

³⁷⁹ L'importance des 'données d'opérations', des expériences industrielles est apparu comme un leitmotiv sans cesse répété aussi bien en France qu'au Japon pour justifier les prises de décisions et les évaluations réalisées. Une multitude de petites phrases soulignent l'effet légitimateur de l'épreuve industrielle instrumentée selon les règles de la profession. Par exemple, au Japon, malgré les études importantes menées sur le charbon, c'est seulement après que des données opérationnelles aient été acquises sur un grand hf japonais représentatif que des conclusions ont pu être tirées *“Deux années de fonctionnement nous ont permis de recueillir des données d'opération. On est arrivé à savoir comment le pc se comportait dans nos hauts fourneaux. Alors, en tenant compte de ces données, on a pu commencer à améliorer les formules de calcul”* (Entretien PET, février 1996).

³⁸⁰ Un second élément essentiel est la régularité de la marche du haut fourneau. Les courbes montrent que l'injection de charbon améliore les différents paramètres de fonctionnement du hf par rapport aux marches tout coke, mais elles imposent aussi l'évidence que l'injection ne 'perturbe pas la marche du haut fourneau', et qu'au contraire, la régularité de fonctionnement est forte. Il faut conserver à l'esprit 1) que faire fonctionner un haut fourneau efficacement et régulièrement est un art et que nombreux sont les hauts fourneaux dans le monde dont le fonctionnement est irrégulier 2) que les connaissances 'scientifiques' détenues sur le fonctionnement des haut fourneaux demeurent fragmentaires - le haut fourneau demeure une boîte grise dont on ne maîtrise par parfaitement le fonctionnement. Les savoir des contremaîtres et des opérateurs sont donc très considérés. L'un de nos interlocuteur français nous laissait entendre que par la simple lecture de la régularité du chargement au geulard, il est possible d'évaluer le bon fonctionnement d'un haut fourneau *“pour savoir quand il faut charger, on a un boulet avec une chaîne, qui descend avec la charge, à un certain niveau, on remonte le boulet parce que sans quoi, on l'arracherait, on remonte le boulet et on met une nouvelle couche. C'était régulier, avant c'était n'importe quoi. Ça descendait, ça remontait, quand on voit simplement les diagrammes de sonde de chargement, c'est un bonne caractéristique du fonctionnement de l'appareil, et je dirais, il y a eu toute la période là, quand on montait en charbon, plus*

Enfin, une bonne part des outils, méthodes, instruments, modèles mobilisés tout au long du processus d'investissement ont été empruntés à la recherche. La plupart de ces outils permettaient de caractériser l'état du raceway (dimension, profondeur, uniformité, composition gazeuse, état du coke...). Il ont permis de mener une série de comparaisons entre marche tout coke, marche avec injection de fuel, et marche avec injection de charbon et de déterminer les conditions dans lesquelles le charbon pourrait être utilisé comme l'équivalent du fuel.

L'ensemble de cette instrumentation indique que, dans l'entreprise J. Steel, le processus d'investissement innovatif a suivi une logique qui ne saurait être réduite à un investissement au sens étroit du terme. L'objet technique n'a pas été considéré isolément de l'ensemble de la fonction de production en voie d'émergence, ni indépendamment de la technologie –au sens de jeu de connaissances et d'hypothèses- qui la fonde. L'intrication des investissements matériel, immatériel, instrumental a été particulièrement évidente : l'investissement innovatif réalisé chez J. steel constitue un véritable plaidoyer en faveur d'une vision de l'investissement innovatif allant très au delà de l'acquisition d'un objet technique sur un marché. Comme nous le verrons, une question essentielle consistera à comprendre à quelles conditions l'investissement calculatoire des économistes standards peut effectivement prendre place efficacement.

Les résultats de ces investissements multiples ont été les suivants:

- a) obtention d'un prototype japonais d'injection instrumenté de façon à avoir une validité générale
- b) acquisition des savoir d'utilisation de la nouvelle fonction de production permettant l'optimisation maîtrisée du hf
- c) acquisition d'une capacité de reproduction de la technologie dans d'autres contextes que celui de l'espace d'innovation

1.2) Un investissement formellement calculé chez F. Steel

on en mettait, plus c'était régulier." (Entretien Irsid, janvier 1996). Un autre acteur souligne le rôle des données d'opérations dans la crédibilité "au bout d'un certain temps, on ne sait plus si c'est la rumeur, pas la rumeur, mais les Etats Unis avaient publié des comptes rendus de marche, et ils marchaient régulièrement avec des taux de 50 kg par exemple, à peu près à la tonne de fonte, sur un ou deux fourneaux () depuis une quinzaine d'années" (Entretien chef de projet PCI, janvier 1996). Lorsque nous avons demandé au responsable de la recherche Fonte de J. Steel sur quelle base s'étaient appuyées les discussions, sa réponse a été la suivante: "nous avons eu des données d'Armco, dans le cadre de la relation client-fournisseur () Nous avons fait des rapports de voyage, mais nous discutons davantage des données d'opération" (Entretien chef recherche Fonte de J. steel, novembre 1995).

“There is a fundamental paradox in the determination of demand for information; its value for the purchaser is not known until he has the information, but then he has in effect acquired it without cost” ⁽³⁸¹⁾

Localisation, spécification des ressources et stabilisation de la fonction de production

La réalisation d’une première installation d’injection de charbon en France, chez F. steel, avait pour objectif de permettre au site de D. d’équilibrer son bilan énergétique en remplaçant du coke externe par du charbon. L’objet technique, d’abord représenté à l’aide d’un modèle mathématique mis au point par l’Irsid, a été inscrit dès le départ dans une analyse technico-économique des besoins du site de D. Comparativement, la place prise par les modèles de calcul en France est saisissante. Elle suppose l’existence d’un travail de modélisation du fonctionnement de l’usine dans lequel est venu s’insérer l’investissement dans une installation d’injection de charbon. Dans ce cas, la perspective adoptée prenait en considération l’ensemble de la filière fonte de l’usine, et plus particulièrement une variable d’autonomie vis à vis du ‘coke externe’.

Plus sans doute qu’au Japon, la localisation a fait l’objet d’une attention soutenue. Ainsi que nous l’avons noté, le cadre local d’inscription du dispositif technique a été identifié avant même que les caractéristiques de celui-ci soient déterminées. Les attributs de l’objet technique ont été définis en relation avec ce cadre local. Les concepteurs, les fabricants ont travaillé dans la perspective directe de la mise en place d’un dispositif technique au hf 2 de D. Ainsi, la spécification des ressources et des caractéristiques techniques du dispositif ont été très liées à sa localisation sur le hf 2 de D. La matérialisation a permis d’établir la stabilité de certains liens posés entre ressources et produits. L’épisode de la montée en cadence chaotique indique cependant bien les limites de la maîtrise pratique de la fonction de production nouvelle –interaction haut fourneau- charbon plus spécifiquement -. Contrairement au cas japonais où un soin extrême a été apporté à l’établissement des bases d’une nouvelle fonction de production optimisée, le contexte de l’injection de charbon, et en particulier les phénomènes intervenants dans les foyers, ont été peu considérés.

Pour les acteurs français ayant participé à l’élaboration de la première installation de D., il aurait été difficile de ne pas reconnaître l’innovation en cours comme un investissement. Dès les premières transactions entamées avec leur direction, les acteurs de l’innovation ont eu à mettre en forme l’innovation comme un investissement ‘classique’. La définition de l’investissement français a

³⁸¹ Arrow, K. (1962) “Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention” in: Coll. *The Rate and Direction of*

donc été nécessairement plus étriquée qu'elle ne l'a été au Japon, au sens où elle s'est focalisée sur l'objet technique seul, même si l'innovation a régulièrement rappelée qu'elle se sentait à l'étroit dans le cadre formel ainsi composé, en imposant des ajustements au cours du processus (³⁸²).

La formation de l'espace d'innovation en France a été tout entier marqué par une tentative d'exclusion formelle du risque innovatif: l'organisation mise en place s'est efforcée d' *externaliser* la dimension innovatrice et le caractère incertain de l'investissement réalisé, et de le ramener à un rassurant calcul rationnel basé sur l'objet technique. Le processus d'innovation a donc revêtu une forme proche d'un investissement 'classique', unique, ponctuel, mis en place dans une relation singulière entre une poignée d'acteurs et sa direction. Le point marquant a résidé dans l'effort de *localisation* de l'innovation permettant en quelque sorte d'en conjurer le risque: les acteurs se sont efforcés de limiter la portée de l'investissement et de l'isoler, rejetant hors des frontières de l'espace une multitude d'acteurs réduits au silence – nous verrons en particulier le cas des utilisateurs dans la suite-, et créant une forme d'individualisation de l'investissement par délégation à la personne du chef de projet. Par cet engagement, l'installation d'injection est devenue l'affaire du chef de projet, doté de l'autorité d'engager à son tour une série d'acteurs et d'actions sans en référer. En retour, un effet de *responsabilisation* a obligé le chef de projet à répondre de ses actes et à rendre compte de l'accomplissement de sa charge. Cela s'est traduit par la définition d'un but restreint à l'investissement - remplacer du coke externe sur le hf 2 - et par une pénétration limitée et instrumentale sur le territoire technologique des conditions de production de l'injection de charbon.

Il découle de ce qui précède que la logique d'investissement a été extrêmement dépendante du processus et des conditions singulières de l'espace d'innovation. Dans la suite, nous avons adopté une présentation du cas français suivant les étapes de mise en oeuvre du projet d'investissement.

Inscription de la boîte noire injection de charbon dans les modèles calculés du site de D.

La motivation première des acteurs de D. dans la formulation d'un 'projet charbon' reposait en premier lieu sur un déséquilibre préjudiciable entre le besoin de coke et la capacité de production de l'usine. Toute l'usine se trouvait ainsi pénalisée puisque: "*Dès que le niveau de production annuelle de fonte de Dunkerque dépasse 4 millions de tonnes, la production de coke de la cokerie ne peut satisfaire les besoins des haut fourneaux. Il est nécessaire, dans tous les cas de figure, d'acheter une part plus ou moins importante de coques extérieurs.*" (Allaire et Al 1985³⁸³). L'enjeu se profilant derrière cet argument a trait à différents aspects stratégiques. Le plus immédiat est bien entendu un argument "purement économique", en rapport avec l'équilibre énergétique de l'usine, "*parce que du coke, quand on l'achète (à l'extérieur) c'est 800 f*

Inventive Activity. Princeton UP.

³⁸² A titre illustratif, notons que le budget de 50% prévu au départ pour l'installation française correspond assez fidèlement à ce que le département ingénierie de J. Steel est capable de faire aujourd'hui, après une trentaine de conception et de réalisation, et donc en ayant bénéficié des économies d'expériences et de la levée des principales incertitudes.

³⁸³ Allaire, B., Grafeuille, F., Lao, D. (1985) "Injection de charbon sur le haut fourneau 2 de D. -U Steel" in: Revue de Metallurgie, novembre 1985, pp. 789-799.

la tonne. Du charbon rendu aux tuyères, ça doit être 300ff. Une tonne de charbon remplace en gros 850 kg de coke, donc on a intérêt. Mais avant, non. C'est une question purement, purement économique" (³⁸⁴) (³⁸⁵).

Non moins essentiels cependant ont été l'interdépendance technologique du site et la relation capacité-production à moyen terme.

"L'injection de fuel s'est fortement développée au détriment du charbon et l'usine de D. a été plus concernée que les autres, plus rapidement, parce que l'usine a été construite en 3 tranches, une en 1962 - pour simplifier- 68 et 74. Et chaque tranche correspond pratiquement à un doublement de capacité. Les deux premiers fourneaux de 62 étaient capables de fabriquer 1,5 millions de tonnes à eux deux. Ensuite le hf 3 a porté la capacité à 3 millions de tonnes, puis on a doublé avec le hf 4 pour une capacité de 6 millions de tonnes. Entre temps, on a modifié les hf 1 et 2 et on a pu donc se dispenser du 4ème hf, parce qu'on est toujours capable de faire 6 millions de tonnes avec 3 hf sur le feu." (³⁸⁶). Or à la fin des années 70 éclataient les années de crise et d'incertitude pendant lesquelles le spectre de la fermeture de certains hauts fourneaux a régulièrement plané.

De plus, les hf de D. représentaient l'un des points noirs du fonctionnement de l'usine *"Les hf de D. marchaient à l'époque... pratiquement pas d'injection, puisque compte tenu du prix du fuel à l'époque, on consommait uniquement le goudron produit par la cokerie, donc il y avait une injection d'à peu près 20 kg, avec des ressources internes en coke limitées, donc la marche était faible mise au mil -faible injection, ce qui n'était techniquement pas facile à faire. Donc ça marchait assez difficilement par moment () Donc le besoin pour faciliter la bonne marche des hf était quelque chose d'acquis"* (chef de projet).

Pour les acteurs français, il s'agissait avant tout d'acquérir un outil technique capable de limiter la consommation de coke et donc de transformer la série d'inputs introduits dans le hf : *"devant les productivités qui baissaient au niveau des hf, devant des marches qui étaient plus difficiles à maîtriser quand même en marche tout coke -on les avait connu, bien sûr, peut-être dans le temps mais elles avaient été abandonnées- donc il faut retrouver, je crois que un certain nombre de mois, voir d'années, pour retrouver de bonnes marches, et la nécessité d'avoir, de réduire les consommations de combustible, et puis les consommations de coke parce qu'on avait pas beaucoup de coke disponible, on s'est dit, 'il faut chercher autre chose'. Alors autre chose, le tour étant vite fait, si j'ose dire, eh ben c'était 'pourquoi pas du charbon'" (³⁸⁷).*

L'objectif de l'usine consistait donc à mettre sur pied une injection de charbon pour remplacer le coke externe coûteux. Le fonctionnement du hf n'intéressait les ingénieurs français chargés du dossier que dans la mesure où il devait constituer une boîte noire fournissant le meilleur relais possible aux effets de l'injection de charbon, mesuré par le taux de remplacement, à savoir, la baisse de la consommation de coke. Comment remplacer du coke chargé au gueulard par du charbon pulvérisé injecté aux tuyères?

Arbitrages

Quels ont donc été les principaux arbitrages réalisés, comment les hypothèses posées ont-elles été traduites en caractéristiques techniques et en ressources spécifiques ?

³⁸⁴ Entretien Irsid, Chef d'équipe, janvier 1996, Maizières les Metz.

³⁸⁵ Cet intérêt est très étroitement lié à l'équilibre énergétique complexe des sites. Ainsi, le même chef d'équipe cite une seconde usine, F., où à l'inverse, il aurait été irrationnel de développer l'injection de charbon. "F. au contraire, avait du coke, et globalement, le coke qu'on fabriquait à F. coûtait à peine plus cher que le charbon qu'on y mettait. Simplement parce que quand on fait du coke, on prend du charbon... (il est un peu plus cher, il doit être à 5c la thermie), on fait avec un rendement excellent du coke et du gaz. Et ce gaz était utilisé dans les fours, trains à bande etc pour le réchauffage. Si on n'avait pas de gaz de cokerie, on mettait du gaz naturel. Ben le gaz naturel à l'époque, il coûtait à peu près - un peu moins cher que le fuel - mais il y a des moments où il est monté à 16, 18 centimes la thermie. Donc on prenait du charbon à 5c pour en faire du gaz qui pouvait être valorisé au même prix que le gaz nat. Moralité, le coke pouvait être moins cher que le charbon..."

³⁸⁶ Entretien usine de D., responsable des hf, D., janvier 1996.

Le pari aurait probablement pu être formulé de la sorte: sans savoir exactement ce qui se passait dans le haut fourneau et comment optimiser cette technologie, il semblait possible - si l'on en croyait les expériences étrangères- aux acteurs de D. de mettre en place une première injection de charbon au haut fourneau -un essai - pour réduire la consommation de coke. En cas de succès, il serait possible d'apprendre à optimiser le fonctionnement du haut fourneau avec injection de charbon et de mieux comprendre ce qui s'y produisait: *“à partir du moment où on a dit "il n'y a pas de raison" puisque à la même époque, les hollandais d'Hoogovens démarraient l'injection de charbon, O.J. Steel avait démarré, etc, on commençait à avoir à droite à gauche des fourneaux qui injectaient, des quantités de l'ordre de 60 kg. Le site d'U., quand même U., fonctionnait avec 60-80 kg de charbon depuis déjà plus de deux ans. Donc il y a quand même des preuves - des trucs disant que 'bon sang s'il y en a qui réussissent, ça prouve que c'est possible. A partir du moment où on a dit "bon puisque c'est possible, on le fera',- on l'a fait.”* *“finalement, le principal, là dedans: ça marche! A partir du moment où on a dit 'chez nous, ça marche' pas besoin de dire comment ça marche. Quand on dit que ça marche et que ça peut marcher, eh ben ça marche!”* ⁽³⁸⁸⁾.

Nous avons noté le phénomène paradoxal provoqué par la délégation-responsabilisation: en traitant le processus d'innovation comme un investissement 'classique', le risque s'est trouvé comme exclus du projet formel, et l'accord a porté sur un cadre général basé sur des résultats économiques attendus. Les acteurs de l'innovation, et plus particulièrement le chef de projet ont donc été chargé de réguler et de prendre en charge le risque, en précisant le contenu de l'innovation. Cela s'est également traduit par le choix d'un haut fourneau de taille intermédiaire, équivalent à celui d'Armco, de manière à limiter les conséquences économiques et techniques d'un éventuel échec. *“Notre principe était plutôt de dire, on commence sur un petit hf, ça se fera par.. c'est pas pour ça qu'il faudra pas faire un essai à vrai grandeur sur le fourneau 4, le fourneau 4 il faudra peut-être modifier un petit quelque chose, on aura appris des choses sur le hf 2, mais il vaut mieux, si on a des irrégularités de marche etc de mise au point à faire, les faire sur le fourneau 2 que sur le fourneau 4, parce que le fourneau 2 c'est 3800t/j, le hf 4 c'était 9000 - on ne peut pas s'amuser, d'autant plus que chaque petite irrégularité sur un petit fourneau devient dix fois plus importante sur le fourneau 4 () bon, il était intermédiaire”* ⁽³⁸⁹⁾.

Rappelons que l'ouverture de l'espace d'innovation s'est accompagnée d'une première négociation. Les acteurs ont ainsi été amenés à inscrire d'emblée l'objet technique dans les spécificités industrielles et géographiques du site. Dès le départ, les questions du *dimensionnement* et des *performances* ont été réglées à travers un savant arbitrage entre limitation du risque pris (financier),

³⁸⁷ Entretien chef de projet PCI, siège de F. Steel, janvier 1996.

³⁸⁸ Entretien chef de projet de recherche Irsid, Irsid, janvier 1996.

³⁸⁹ Entretien chef de projet pci, siège de F. Steel, janvier 1996.

minimisation de l'investissement consenti et économie maximum de coke. Deux chiffres objectifs "clés des calculs économiques" ont résulté de cette série de calculs et d'arbitrage:

*"65 kg à la tonne de fonte sur le hf 2, qui étaient les calculs économiques si vous voulez, qui étaient la clé des calculs économiques mais la possibilité de pouvoir en mettre 100 kg si un jour - on ne sait jamais - ça se développait etc.". 65 kg sur le hf 2 correspond à l'espérance d'un retour sur investissement assez rapide (3 ans) avec une prise de risque 'minimale' quand à la faisabilité de principe: "65 kg c'était déjà au moins ce que faisaient, savaient faire, 50-60 kg dans ces eaux là, aux Etats Unis et en Russie. Disons la rentabilité à 65 kg". Grace au modèle de haut fourneau et aux modèles de L'Irsid, le taux d'équivalence du charbon a pu être estimé à 0,9. Ces chiffres étaient donc de nature à satisfaire une direction financière prudente. Par ailleurs, le format financier pris par le projet, sous forme de temps alloué et de retour estimé sur investissement avec définition du lieu d'implantation, d'un calendrier prévisionnel des réalisations, ont constitué autant de gages et d'outils facilitant le contrôle externe (par le haut) de la bonne orientation du projet.

*30 t/heure est le chiffre retenu pour le dimensionnement de l'installation de broyage charbon. Cette capacité correspond au double de la capacité nécessaire à l'injection de 65 kg sur le hf 2. Cet écart est particulièrement intéressant. D'abord, il a été présenté, dans le bilan de clôture de l'opération, comme un calcul prospectif permettant, à moindre frais de mettre en service une seconde installation, rapprochant encore davantage le site de son objectif d'autonomie en coke. Il dévoile, par ailleurs, une manière de contourner le formalisme, l'orientation à court terme, et la rigueur financière imposée dès le départ, en introduisant une dissonance, une incohérence entre la capacité de broyage et la capacité d'injection. Lue rapidement, une telle incohérence pourrait sembler irrationnelle, et d'autant plus surprenante que l'exercice d'un contrôle rationalisateur sur le projet semble avoir été aussi rigoureux qu'implacable. En fait, cette dissonance marque bien la pluralité des points de vue en présence dans la négociation, et la logique de compromis qui en a résulté. Cette dissonance constitue un *contournement* du formalisme exigeant de traiter l'innovation comme un programme parfaitement prévisible, et réintroduit une logique flexible prenant acte de l'incertitude (³⁹⁰). La justification de cet écart a en partie passé par une forme de maquillage.

Le degré de liberté des acteurs, comme l'a souligné Crozier (1977), tient à l'existence de zones d'incertitudes: en termes plus économiques, à l'existence d'asymétries d'information entre acteurs. La mise en place d'une forme d'engagement reposant sur la *responsabilité* et la *délégation* s'est caractérisée par le fait que la direction ne s'est intéressée en fait qu'aux résultats de l'opération,

³⁹⁰ Rappelons que contrairement à ce qui s'est passé au Japon, l'expérience industrielle de l'entreprise n'a pas été mobilisée. Le projet a été considéré 'isolément', selon des critères objectifs permettant d'évaluer n'importe quel projet *toutes choses égales par ailleurs*.

laissant au chef de projet le soin de définir les spécificités techniques de l'installation. Le contenu technique a par conséquent représenté une boîte noire pour la direction, attribuant ainsi un degré de liberté au chef de projet. Le surinvestissement repéré semble avoir été présenté en partie comme le résultat d'un choix technique lié à une contrainte de fiabilité. L'argumentation du chef de projet vis à vis de ce contournement est intéressante sur ce point et relate à la fois la subtilité des jeux et le masquage des arguments les uns par les autres:

“L'un ou l'autre (des deux types de broyeurs) finalement, c'était le même prix, le même coût () mais après (pour le premier type de broyeur moins fiable), il y avait l'investissement avec deux broyeurs, et donc si on en fait deux, c'est un investissement sur un développement - parce qu'on avait en tête de développer sur d'autres hf de D.- un développement futur, mais enfin, avec l'inconvénient, c'est que chaque fois qu'on travaille dans l'industrie lourde, il faut investir pour -c'est toujours très cher - et que d'investir à l'avance c'est jamais très prisé, puisque l'investissement coûte très cher. Donc le choix s'est établi sur un broyeur horizontal parce que c'était beaucoup plus fiable, et que économiquement c'était beaucoup moins cher à partir du moment où il suffisait d'en faire un au lieu de deux. Qu'en particulier ça se déréglaient moins.” ⁽³⁹¹⁾.

L'argumentation présentée souligne en particulier le fait qu'il semble plus facile de faire accepter à une direction financière un surinvestissement portant sur un seul appareil négocié à l'occasion d'un investissement 'ponctuel', plutôt que deux, en deux temps. Alors que le surinvestissement a pris la forme de deux broyeurs chacun d'une capacité suffisante à prendre en charge la totalité de la production, dans l'entreprise française, le surinvestissement a été incorporé tout entier dans un même outil, un seul broyeur prenant en charge, et mêlant l'ensemble du compromis trouvé. Le label *investissement sur un développement* 'très peu prisé', facilite la lecture du surinvestissement ⁽³⁹²⁾.

Conception: localisation et spécification en action

Ces deux caractéristiques de l'installation “65 kg sur le hf 2” et “capacité de broyage de 30t/h” ont agi comme deux guides, deux objectifs à partir desquels le chef de projet s'est efforcé de donner de l'épaisseur au projet, et de la matérialité à la machine à injecter. La petite équipe de D. a donc patiemment cherché à traduire les premiers objectifs et repères globaux, sur lesquels une forme

³⁹¹ Cet entretien passé au siège avec l'ancien chef du projet PCI reflète à merveille la confusion et l'ambiguïté de la position adoptée. Les acteurs, face à des règles strictes tendent à développer des ruses et des subterfuges pour atteindre leurs objectifs. L'argument est proche de certaines pratiques promotionnelles qui vous offrent 20% de produit en plus gratuitement, ou deux produits pour le prix d'un. Du fait du type de rapport prescriptif mis en oeuvre avec la direction financière, celle-ci considère en partie comme une boîte noire les questions purement technique. Les acteurs de l'innovation disposent ainsi dans la traduction, de marges de manoeuvre liée à un répartition des savoirs (Hatchuel 1994). Nous voyons cette relation comme un échange: le chef de projet prescrit le contenu et la direction prescrit le cadre. La répartition des 'rôles' ou des 'figures' dichotomise les arguments techniques d'un côté et les arguments économiques de l'autre. La direction technique prend en charge l'exigence de rationalité économique, et les acteurs de l'innovation prennent en charge la réalisation technique. Comme le note Callon et Law (1989, 1992), cette frontière n'a rien de naturel, bien qu'elle soit d'usage fréquent.

³⁹² Le même personnage concluait l'opération dans un rapport deux ans plus tard, à une période où, le risque ayant disparu, il était question d'une seconde installation: “Cet ensemble a été volontairement surdimensionné: 1) pour pouvoir faire des

d'accord préalable de principe avait été obtenu en une installation analytique formulée sous forme de spécifications propres à remplir un cahier des charges et une liste de fournisseurs potentiels de cette installation.

La manière dont l'installation d'injection de charbon au hf 2 a été conçue est tout à fait intéressante du point de vue économique. Elle correspond en effet étonnamment à une conception assurée par *l'intermédiaire du marché*. Il ne s'agit pas ici du marché au sens strict –néoclassique- du terme, puisque l'installation hybride réalisée n'existait pas avant cette opération, mais plus exactement d'un espace interorganisationnel. P Würth n'avait encore jamais réalisé d'installation d'injection complète. CdF et Bacbock France n'avait jamais conçu et réalisé d'atelier de broyage de ce type auparavant. Les acteurs de D. étaient également novices en la matière. En ce sens, une forme de co-conception a eu lieu, tissant une série d'apprentissages croisés. Cette structure est lisible dans les efforts ingénierie produits, partagés entre D., CdF et Würth.

Comment le marché peut-il générer une création technologique? Dans le cas qui nous intéresse, plusieurs éléments marquants ont pu être observés.

D'abord, notons l'extraordinaire accumulation de compétence que les acteurs de D. ont pu réaliser par l'intermédiaire du marché. Partant de leurs objectifs chiffrés (65 kg, Hf 2, ..) et de leur grille d'évaluation, les acteurs de D. ont pris une série de contacts et entamés une série de discussions avec des fournisseurs potentiels afin de définir les spécifications de leur installation. La grille d'évaluation, aussi bien que les objectifs chiffrés à atteindre ont formé la base des échanges. Cet apprentissage correspond bien au paradoxe souligné par Arrow –cité en tête de paragraphe 1.2 – selon lequel dans l'échange, la prise de connaissance des qualités de l'information indispensable à son évaluation annule du même coup l'intérêt d'acquérir celle-ci. Le marché constitue un lieu de formation des acteurs – cela nuance quelque peu l'idée selon laquelle l'apprentissage serait un attribut exclusif de l'organisation.

Sur le plan technologique, les ingénieurs français n'ont pas considéré Armco comme incontournable, mais comme un fournisseur d'installation parmi d'autres. Certes, Armco possédait l'une des technologies les plus au point. Mais elle ne constituait pas la seule manière de faire. La compétence des ingénieurs français s'est construite au fil des cas, en cherchant à comprendre les principes essentiels de l'injection de charbon, à partir des échecs et des succès rencontrés en différents lieux. La technologie, dans cette perspective était avant tout considérée comme un ensemble de principes pouvant prendre différentes formes: *“le plus important c'est que ça ait fonctionné - je*

essais au hf 2 à des forts taux d'injection (110 à 120 kg/t fonte) 2) pour alimenter dans un deuxième temps l'injection sur les hf 1 et hf 3 en plus du hf 2 à 65 kg.” ⁽³⁹²⁾₍₃₉₂₎.

m'entends -peu importe la technologie du moment qu'elle marchait hein, le pas important c'était de faire avancer l'objectif injection de charbon, de voir un Hf en France, avec nos lits de fusion, avec nos ingénieurs, se convaincre que c'était faisable, que sur le plan de l'exploitation c'était gérable, que s'il y avait des pannes, on savait s'en sortir, et que ça perturbait pas la marche des hf et les résultats d'exploitation, toutes ces choses là étaient très importantes pour des gens qui étaient extrêmement prudent dans le monde des hf" (393). Les ingénieurs de D. ont composé leur installation en combinant une série d'outils disponibles sur le marché pour atteindre leurs objectifs.

Les acteurs de D. se sont progressivement doté d'une représentation plus précise de l'offre, et des outils existants: ils ont construit leur espace technologique presque de visu, au fil des visites et des rencontres. Comparativement au cas japonais, dans lequel l'approche de la technologie a été plus littéraire et plus systématique, l'orientation locale et le poids de la vision utilisatrice portée par le chef de projet est patente. A titre d'illustration, on peut citer la démarche suivie sur la spécification progressive de l'atelier de broyage: *"on avait été à Richemond, qui était une usine, une centrale thermique disposant à la fois d'unités au fuel et d'unités au charbon, et puis on allait discuter avec les constructeurs de broyeurs à charbon, qui étaient là assez nombreux () sachant qu'ils n'en avaient jamais fait pour les hf, hein, dans les européens. Aux Etats Unis, il y avait un broyeur vertical, en Russie, c'était plutôt un broyeur à boulet, on avait dit 'ben il y a deux écoles, et on va regarder ce qui se passe avec les deux écoles pour choisir le produit"* (394).

Par le jeu de la concurrence, le chef de projet et ses collègues ont pu prendre connaissance de différentes caractéristiques techniques existantes, confronter différentes solutions techniques, les comparer en élaborant une série de critères d'évaluations communs, en regard de leurs objectifs: *"il s'est avéré que les broyeurs horizontaux étaient beaucoup plus fiables que les verticaux et demandaient beaucoup moins d'entretien, et avaient un taux de marche beaucoup plus important () Alors nous comme on voulait faire un broyeur, on a dit 's'il marche à 80% du temps, ça peut pas aller, parce que là, ça correspond aussi à un souci process haut fourneau: un hf plus il marche régulièrement, mieux ça vaut, et on ne peut pas changer tout le temps"* (Chef de projet). Progressivement, en combinant discussions, confrontations, mises en concurrence, et visites d'installations, les acteurs de D. se sont trouvés en mesure de rédiger un projet pour leur direction et des spécifications précises dans le langage des fournisseurs.

De plus, dans leurs relations avec les fournisseurs et les ingénieurs conseils, les acteurs de D. ont utilisé une série d'outils facilitant la représentation collective des futures installations. Les deux plus importants ont été la rédaction progressive des cahiers des charges et bien entendu les plans des

³⁹³ Entretien direction technique, F. Steel, Paris, janvier 1996.

³⁹⁴ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, janvier 1996.

installations. Ces outils, par leur circulation et par leur malléabilité (au sens de Suchman 1988) ont facilité les confrontations de point de vue et la saisie progressive d'une représentation collective et conventionnelle - au sens où elle fait référence pour l'action commune - de l'installation. L'installation a ainsi pu être mise au point sous forme de spécifications techniques exprimées sous forme de capacité (30t/h), de qualité des produits (produit final à 80% inférieur ou égal à 74 microns, à 1% d'humidité), de normes de fonctionnement (température ne dépassant pas 200°C, quantité d'oxygène inférieure à 10%) à l'interface entre l'utilisation et la production. Les plans ont fourni une projection graphique et modifiable des équipements dans un langage commun aux ingénieurs (Henderson 1995).

Dans la production de l'installation, le chef de projet et ses conseillers ont procédé à une décomposition analytique de l'installation en 7 composants principaux. Cette décomposition épousait les contours de la construction du marché à laquelle les acteurs ont procédé. Elle résultait d'un arbitrage entre la grille d'évaluation des acteurs de D. - qui ont par exemple décomposé l'installation en atelier de broyage et en atelier d'injection - et une mise en relation des spécifications de la demande et des compétences offertes - une société experte a ainsi été chargée des appareillages électrique, une autre des automatismes -. L'évaluation des compétences - et de leur valeur - de différentes sociétés a été assurée par la mise en concurrence organisée en particulier dans le cadre des appels d'offre. Ici encore, le marché, en permettant la comparaison, a permis une décision informée de la part des acteurs (³⁹⁵).

Le trait marquant est l'effet de *fragmentation* de l'ensemble, conférant à l'installation son caractère unique, hybride et contingent - lié aux conditions particulières de l'espace d'innovation et en particulier à l'identité des acteurs impliqués-. Pour la partie conception et la partie construction réunie, la petite équipe de D. a fait appel à une vingtaine de sociétés (3 pour la conception) (19 pour la réalisation), auxquelles elle a confié les missions diverses jugées nécessaires à la construction de l'équipement. De cet effet de fragmentation, il découle logiquement des exigences de coordination élevées. Nous avons évoqué la précision et la complexité des calendriers établis par le chef de projet. Il faut y ajouter l'impératif de contrôle de la conformité des réalisations aux spécifications.

Ayant construit une installation d'injection de charbon, l'obtention d'un retour sur investissement dépendait alors du taux d'injection atteint, de la régularité de la marche du haut fourneau, et de la quantité de coke économisé. Mais le retour sur investissement a été soumis à une forte incertitude. Nous allons voir que cette incertitude est indissociable de la dynamique innovative,

³⁹⁵ Ce point entre en contradiction avec le fameux argument de Williamson sur les risques d'opportunisme et d'asymétrie liés au marché (Williamson 1975, Akerloff 1972). Le marché, ou plus exactement dans ce cas, l'espace interfirme (industry Richardson 1972) peut constituer une source d'apprentissage non négligeable. Tout dépend de l'attitude des acteurs et des relations construites avec les fournisseurs (Eymard-Duvernay 1989). Williamson (1975) *Markets and Hierarchies*. The Free Press.

et en particulier de la forme de l'engagement fondée sur la *localisation* du projet et la *responsabilisation* du chef de projet.

L'investissement a été donc réalisé dans une perspective localisée, centrée sur l'objet technique. Après sa mise en place, les acteurs de l'innovation ont très vite cherché à élaborer une meilleure représentation des phénomènes liés à la nouvelle fonction de production. Injecter constituait une première étape, pour aller plus loin, il devenait nécessaire de comprendre pour optimiser. Le chef de projet, devenu responsable des haut fourneaux a donc cherché à mobiliser les chercheurs de l'Irsid, de façon à éclairer certains aspects de la boîte noire.

Les résultats de l'investissement ont été les suivants:

- a) obtention d'une installation rentable d'injection de charbon sur le hf 2
- b) premier corps à corps avec la technologie au fondement d'une stratégie d'élaboration progressive

Le tableau 6 récapitule les principaux éléments des investissements réalisés en France et au Japon à l'occasion de la première installation d'injection de charbon

	J. Steel	F. Steel
Lancement du projet	Avril 1980	Décembre 1981
Première injection	Juin 1981	Juillet 1983
Réalisation	Interne	Interne-externe (20 ene de Frs)
Montant investissement	100% (hors brevet)	99%
Taille équipe interne	trentaine (tous niveaux)	4 (dont 2 ingénieurs, 2 tech.)
Performances première année (³⁹⁶).	55kg/tpi marche régulière	49kg/tpi marche irrégulière 6 mois
Performance visée à terme	55kg/tpi	65kg/tpi
Capacité installée / objectif visé	*2	*2
TRI estimé (³⁹⁷)	36%	19%
Taux d'équivalence	1,0	0,84
Respect prévisions	Elévé	Moyen

³⁹⁶ Le premier mois de mise en service a été exclu car il n'est pas complet.

³⁹⁷ Nous avons estimé les taux de rendement internes des projets sur la base des performances réalisées durant les premiers mois d'injection (139 000 T en dix mois pour O; 60 500 T en dix mois pour D.). Les mêmes prix relatifs ont été utilisés dans les deux cas, ce qui limite les effets externes. Les acteurs de D. ont proposé la prise en compte d'un remplacement coke+fuel, puisqu'ils injectaient irrégulièrement du fuel ou du goudron dans leur hf. Dans ce cas, nos calculs donnent un taux de rendement interne du projet de 36%.

Principaux problèmes rencontrés	Explosion/sécurité	Usure tuyère
	Qualité charbon	Ecoulement charbon
	Equirépartition	Stabilité hf
	Fiabilité broyage	

2) Apprentissage

L'apprentissage est étroitement lié à l'action et à son cadre. Les deux processus de création technologique ont constitué et se sont tout à la fois appuyés sur des dynamiques d'apprentissages et des connaissances très spécifiquement liées aux trois moments clés de la construction de l'espace d'innovation, la problématisation –simplification, l'engagement et l'activité innovante menée dans le cadre de la mise en projet. Actions et représentations se contraignent, s'alimentent, s'entremêlent et s'opposent. Dans les deux cas présentés, les acteurs procèdent régulièrement à un jugement, un classement des connaissances : ils pointent les questions et hypothèses qui leur semblent importantes, délimitent les frontières de ce qu'ils savent et ne savent pas, de ce que d'autres savent et ne savent pas, ils repèrent les zones essentielles sur lesquelles ils devront produire un effort d'élaboration. Chacun des deux processus illustre à merveille cette correspondance. La comparaison des deux cas met en lumière l'extrême singularité des dynamiques d'apprentissages : les connaissances produites, les compétences formées, les dispositifs d'accumulation de ces actifs cognitifs ont été extrêmement différents dans un cas et dans l'autre.

2.1) Une installation mettant en relation haut fourneau, matière première et performance économique: vers un calcul d'optimisation technologique du haut fourneau japonais.

Dans le cas de l'entreprise japonaise, le problème posé consistait, ainsi que nous l'avons indiqué, à chercher un substitut au fuel. Cette orientation a été déclinée en un programme d'action chargé de construire l'équation charbon= fuel. Deux démarches complémentaires ont été mise en oeuvre dans cette perspective: l'utilisation d'une *heuristique* charbon-fuel, et l'élaboration de techniques et de normes de mise en conformité du charbon et du fuel.

Premièrement, les connaissances familières détenues sur le fuel ont été utilisées comme élément heuristique de référence et de mise en évidence des différences et des ressemblances entre charbon et fuel pour l'injection au haut fourneau. Les connaissances relatives au fuel ont été transformées en un jeu d'hypothèses exploratoires. Ce guide a été utilisé dans l'anticipation des effets économiques et technologiques de l'injection de charbon sur le haut fourneau, en d'autres termes, dans la maîtrise de ce que nous avons appelé la nouvelle fonction de production. Comment cela se calcule t-

il? Doit on refaire la focalisation des modèles et instruments mis au point pour le fuel ou les remettre en cause?

Deuxièmement, partant de cette *cosmologie*, il s'est agi d'élaborer une série de normes, de conditions, et de spécifications techniques permettant au charbon de se comporter comme le fuel de manière à optimiser le fonctionnement du haut fourneau.

Le 'transfert de technologie' masque donc la mise en place d'une dynamique d'apprentissage fondée sur une double référence 'interne et externe'. La référence à Armco pour la partie technique, 'hardware' de l'installation d'injection, et la référence aux connaissances singulières et aux instruments de la société J. Steel sur l'optimisation d'une fonction de production de fonte avec injection de fuel. Dans ce double mouvement, le charbon a été situé à l'intersection de deux univers volontairement établis.

Heuristique: comment optimiser la nouvelle fonction de production.

Comment ramener l'exploration d'un problème totalement inconnu, *injecter du charbon au haut fourneau de J. Steel*, à une série de questions et d'hypothèses relativement bien maîtrisées? Comment inscrire la création technologique dans le cadre du patrimoine technologique déjà détenu par la société? Comment déboucher sur la formulation d'une série de questions exploratoires permettant de délimiter des frontières du connu, et de zones à investiguer à portée de main et de cerveau? La réponse des ingénieurs de J. Steel a consisté à construire une équation charbon=fuel⁽³⁹⁸⁾.

Etant donné que les acteurs de J. Steel ont explicitement fait référence à un patrimoine important de connaissances existant sur la maîtrise technologique de l'injection de fuel, il nous semble nécessaire d'ouvrir une rapide parenthèse sur ce point. Il est d'abord utile de conserver à l'esprit que les entreprises sidérurgiques japonaises, J. Steel en particulier, sont devenues à partir des années 70, la référence mondiale en matière de maîtrise du 'process haut fourneau'. Partis tardivement dans le domaine des injections par rapport à leurs concurrents américains, les haut fourneaux japonais ont rapidement et massivement investi dans les injections de fuel à la fin des années 60. Parallèlement, un important effort d'investissement de recherche a été réalisé à partir de la fin des années 60 pour "rendre la boîte noire (du haut fourneau) un peu plus lisible"⁽³⁹⁹⁾. D'abord, sur la base du modèle

³⁹⁸ La vision agrégée a-posteriori développée dans le chapitre 1 indique l'évidence de cette équation et de la famille injection au haut fourneau. Nous allons voir que pour les acteurs de l'innovation, cette équation n'est devenue une évidence qu'au profit d'un long effort d'investissement, et d'un travail patient de création technologique destiné à rendre possible une certaine continuité. Le cas français aura une vertu relativiste, et montrera que d'autres approches sont tout à fait possibles.

³⁹⁹ L'expression est de l'ancien responsable de la recherche fonte de J. Steel, Futtsu, novembre 1995.

publié par Rist (⁴⁰⁰), un chercheur de l'Irsid, des modélisations informatiques raffinées ont été développées sur le fonctionnement interne du haut fourneau. Par ailleurs, les aspects les plus originaux de la recherche ont été des recherches appliquées distribuées en deux courants principaux: la mise à profit de la crise et de la suppression d'un certain nombre de hf pour mener des expériences de "stratification-démontage" favorables à une meilleure compréhension des phénomènes internes (influence de la forme des foyers, de la forme de l'"homme mort", de la forme de la 'zone cohésive'); et la mise au point d'une série de capteurs et d'instruments (température et vitesse de vent, température aux parois, distribution des températures et composition des gaz au gueulard, vitesse de descente des matières, échantillonnage de coke) progressivement devenus les composants d'un tableau de bord permettant de caractériser le fonctionnement du hf.

Les expériences d'injection de fuel ont montré que les interactions entre haut fourneau et injectant sont complexes. La clé des calculs, représentée par le *taux d'équivalence*, dépend ainsi de la capacité de l'injectant à remplacer du coke dans sa fonction énergétique (production d'une réaction et d'un raceway par dégagement de chaleur localisée) et dans sa fonction physico-chimique (production d'hydrogène et de monoxyde de carbone, gaz réducteurs permettant la réduction du minerai de fer en fonte). En outre, la présence de particules imbrûlées le long des parois du haut fourneau ou dans sa partie basse (dead man) perturbe son fonctionnement, la qualité du produit et la productivité, et pose une limite reconnue à l'injection de fuel.

Au moment des premières formulations, les chercheurs japonais ont émis une hypothèse équivalente à l'optimisation de l'ensemble de ces délicats mécanismes, l'hypothèse dite de *combustion parfaite*. Sous cette condition de combustion parfaite du charbon, correspondant au maintien dans la zone des foyers des interactions hf-charbon, il a été possible d'établir une équivalence entre charbon et fuel. Les modèles mis au point par les chercheurs de J. Steel pour évaluer les effets de différents types de fuel, ou de marches tout coke ont été appliqués pour évaluer, à leur tour, les effets du charbon (⁴⁰¹). A partir d'une analyse chimique du contenu des matières premières (Matières Volatiles, humidité, carbone, cendre) les modèles chimiques du haut fourneau donnaient des estimations du *taux théorique de remplacement* du coke, permettant de comparer les matières entre elles, en fonction de leurs *prix* à la tonne. Des tableaux argumentaires ont été dressés présentant les effets techniques et économiques comparés des marches tout coke, avec injection de fuel et injection de charbon.

Tenez la condition de combustion parfaite nous disent les ingénieurs japonais et vous tenez l'équilibre subtil des dimensions économiques et techniques du haut fourneau avec injection de

⁴⁰⁰ Rist, A. et Maysson, N. (1967) "A Dual Graphic Representation of the Blast-Furnace Mass and Heat Balances" in: Journal of Metals, April 1967, pp. 50-59.

charbon en remplacement du fuel. Cette simple condition assure un fonctionnement régulier et optimisé du fourneau, une forme efficace de la zone de fusion, et évite toute difficulté de colmatage limitant la perméabilité de la charge, le ralentissement de la descente de la fonte liquide entre les morceaux de coke de l'homme mort'. Maîtrisez la condition de combustion parfaite et vous maîtriserez parfaitement du même coup la nouvelle économie du haut fourneau, et de l'usine à fonte avec injection de charbon. Dans le rapport des ingénieurs de K., le graphique représentant l'injection de charbon ne comprend plus alors que le nez de la tuyère et une représentation du raceway, le foyer dans lequel tout doit être confiné. C'est ici que les regards doivent se porter. Tout doit se jouer dans cette zone d'environ 3 mètres de long (nez de tuyère, busillon, foyer), l'équilibre d'ensemble tient dans la maîtrise de cette zone.

Pour compléter cette approche théorique, un prototype représentant le raceway et un nez de tuyère a été construit à la fin des années 70. Des essais ont été réalisés en laboratoire sur ce 'hot model' (⁴⁰²), c'est à dire un appareillage comprenant une tuyère et un lit de coke permettant de simuler les conditions de combustion du charbon au sein d'un foyer. Les conditions de combustion 'du charbon' ont en particulier été comparées à celles 'du fuel'. Dans cette première étape, l'objectif essentiel a été d'évaluer la faisabilité de l'injection de charbon et la comparabilité avec l'injection de fuel. "*J. Steel possède des repères en matière d'injection de fuel au haut fourneau*". En formant des références à partir de la combustion du fuel sur le 'hot model' et en comparant ensuite l'injection de charbon sur le même 'hot model', il a été possible de conclure à la faisabilité de l'injection de charbon au haut fourneau, conformément à ce que semblait indiquer les expériences étrangères. "*Si il est possible d'arranger les conditions de combustion pour le charbon comme cela a été le cas pour le fuel, il est possible d'injecter du charbon dans de vrais haut fourneaux.*" (⁴⁰³). Les essais menés ont indiqué que les conditions de combustion dans le raceway, et en particulier la distribution des températures pouvaient varier en fonction de la taille des particules et du taux de matières volatiles du charbon. Il a été déterminé que lorsque les particules de charbon injectées avaient une taille de 74 microns et un taux de matières volatiles (VM) de 33%, une équivalence assez stricte pouvaient être établie avec l'injection de fuel. L'une des différences chimiques essentielles entre charbon et fuel, la présence de cendres dans le charbon, pouvait être neutralisée tant que le taux de cendres était maintenu inférieur à 7% et que le taux d'injection n'excédait pas 80 kg/tpi.

L'équivalence du fuel et du charbon ayant servi de support aux premiers calculs et aux premières hypothèses a donc été largement confirmé par les ingénieurs et les chercheurs de J. Steel.

⁴⁰¹ Les chercheurs se sont explicitement appuyés sur le *diagramme de Rist*, un chercheur de l'Irsid ayant produit un modèle d'optimisation du fonctionnement interne du haut fourneau.

⁴⁰² Ce premier modèle simplifié est de 2 mètres de diamètres, 5 mètres de haut et contient 5 tonnes de coke. Une tuyère à échelle ½ envoi de l'air et du charbon à une température maximale de 1300 degrés.

⁴⁰³ Rapport de l'usine de K. sur l'injection de charbon. 1980.

Cette heuristique a également modelé la dynamique d'apprentissage pendant et après la mise en service de la première installation d'injection de charbon à O. Les estimations faites à partir des calculs théoriques et des expérimentations ont été confirmées par l'instrumentation des opérations d'injections. Comme le fuel, le charbon s'est révélé être un paramètre facilitant le réglage des conditions de combustion dans le hf. Son effet sur les conditions thermiques et gazeuses du raceway ont été estimées tout à fait comparables. Les taux de remplacement mesurés ont été conformes aux prédictions modélisées et ont décliné avec l'accroissement des taux d'injection. A la suite de ces différents apprentissages, il a donc été possible aux acteurs de J. Steel de glisser le charbon dans le cadre de calcul et d'instrumentation développé en bonne partie pour l'injection de fuel. Ainsi, les articles publiés après l'installation présentaient un tableau mettant en relation une série d'indicateurs suivis (une quinzaine) de façon systématique sous forme de courbes (⁴⁰⁴). Ce tableau traduisait la forte instrumentation du haut fourneau 2 de O. Certaines courbes présentées constituaient les fondamentaux d'une production industrielle de fonte (productivité, mise au mil de coke, teneur en silice et en soufre de la fonte liquide, lit de fusion) en partie indépendante des injections. D'autres indicateurs étaient plus caractéristiques du développement des injections aux tuyères (température de vent, humidité du vent, perméabilité, température aux parois, distribution de gaz et de température au gueulard, et taux de remplacement) et de contrôle du raceway (température de flamme).

Mise en conformité de l'installation

Nous avons noté comment la mise en équivalence du fuel et du charbon a conduit les ingénieurs de J. Steel à construire certaines normes et spécifications relatives à la technique d'injection de charbon. Les hypothèses croisées de combustion parfaite et d'équivalence au fuel (conditions du raceway) ont ainsi abouti à fixer le produit fini de l'installation d'injection à la taille idéale de 74 microns et à la composition chimique de 33 % de matières volatiles et 7 % de cendres. Un taux d'injection supérieur à 80 kg a été jugé sous-optimal.

Ainsi que nous l'avons souligné, la partie technique de la manipulation du charbon et de son injection a été largement laissée à Armco et à l'expérience acquise par cette société. Les ingénieurs de J. Steel ont considéré que le charbon n'était pas connu au sein de leur société, et que par conséquent, la question du comment faire parvenir les particules jusqu'aux tuyères devait être transférée à une société ayant fait ses preuves en la matière: *“nous ne connaissons pas du tout le charbon. On ne savait pas comment traiter du charbon pulvérisé.”* *“Chez J. Steel, il n'y avait pas de technologie ou de savoir-faire pour traiter opérationnellement le charbon pulvérisé. Parce que le charbon pulvérisé est une*

⁴⁰⁴ Kawabe et Alii (1982) "Pulverized Coal Injection into n°1 Blast Furnace at Oita Works" in: Tetsu to Hagane, Vol 68, n°15, pp. 2393-2398. Et Wakuri et Alii (1983) op cit.

chose explosive, c'est une technologie qui requiert des savoir-faire un peu particuliers" (⁴⁰⁵). En particulier, les ingénieurs de J. Steel ont appris d'Armco une série de savoir-faire et de normes de calcul: "*chaque appareil est assez simple. Un plan suffit pour le construire. Le véritable savoir-faire résidait dans la conduite de l'installation.. la façon de sécher le charbon pulvérisé..comment réagir face à des explosions..*" (⁴⁰⁶).

Deux variables techniques essentielles ont dues être prises en considération dans la construction de l'objet technique pour que la condition de combustion parfaite soit respectée.

La première est la question de la *granulométrie*. En compilant la littérature sur les expériences menées de part le monde dans un tableau centré sur cette question, les ingénieurs japonais ont mis en évidence deux groupes de courbes. Le premier groupe est composé d'une multitude d'essais de natures diverses ayant toutes échouées et se situant à des niveaux de broyage oscillant entre environ 1mm et 3mm, avec une homogénéité très variable. A l'opposé, Armco Steel se caractérise par une règle de broyage nettement plus rigoureuse et un broyage radicalement plus fin (80 % des particules injectées de taille inférieure ou égale à 74 microns). La granulométrie optimale proposée par Armco résulte d'un arbitrage entre coût de fabrication (plus le broyage est fin, plus il est coûteux) et l'optimisation de la combustion dans le raceway (plus le broyage est fin, plus la combustion est rapide et complète). La condition de production 80% =<74 microns a été reprise telle quelle à partir des recommandations d'Armco (⁴⁰⁷), elle même calculée en fonction de recherches appliquées réalisées par Essenigh, un chercheur du Combustion Institute de Pittsburgh, ayant établi une relation entre la taille d'une particule de charbon et son temps de combustion (⁴⁰⁸). L'obtention d'un atelier de préparation du charbon remplissant cette condition ne semblait pas poser de problème particulier, la technologie permettant d'obtenir de tels résultats étant déjà en service dans les cimenteries, usines thermiques. Armco et Babcock apportaient des solutions prêtes à acheter sur ces différents points technologiques.

La seconde est la question de l'alimentation homogène et régulière (ou contrôlable) des foyers en charbons. Cette question se décompose en deux concepts, *le transport*, et *l'équirépartition*. La question de l'équirépartition est l'un des fondamentaux des sidérurgistes. Les foyers (une quarantaine sur les grands haut fourneaux) sont répartis sur la circonférence du fourneau et sont les éléments essentiels de la dynamique d'ensemble (température, réduction, descente). Tout déséquilibre dans l'identité des foyers provoque des déséquilibres dans le fonctionnement.

⁴⁰⁵ Entretien Département central d'ingénierie, Futtsu, novembre 1995; Entretien chercheur, Futtsu, décembre 1995.

⁴⁰⁶ Entretien Département central d'ingénierie, Futtsu, Japon, Novembre 1995.

⁴⁰⁷ Bell, S. et Alii (1968) "Coal Injection - Bellefonte Furnace" in: Journal of Metals, April 1968, pp. 85-88. ; Fletcher, L. et Al. (1975) "Coal for Blast Furnace Injection" in: AIME (ed) Energy Conservation in the Metals Industry; Fletcher (1981) "Technical and Economic Aspects of Coal Injection at Blast Furnace Tuyeres" in: AIME Ironmaking Proceedings, Toronto, 1981, pp. 142-145.

⁴⁰⁸ Essenigh, R. (1963) Journal of Engineering Power, pp. 183-190.

Le transport d'une matière dans des tuyaux, sous conditions de pression élevée est soumis à des irrégularités, à des pulsations. Le gaz de transport (carrier gaz sous pression) facilite la régularité des débits. Il peut être utilisé pour inerte le charbon pulvérisé (solution d'Armco, utiliser de l'azote pour éviter la mise en contact du charbon avec l'oxygène). Un arbitrage existe, exprimé par le *rapport charbon/gaz* et le *niveau de pression* entre la régularisation des débits et le coût de fonctionnement. Ces deux points ont été repérés dès les premiers rapports comme des éléments essentiels de l'adaptation de la technologie au haut fourneau japonais au nombre de tuyères plus élevé et à la pression interne plus élevée.

La seule véritable boîte laissée noire en matière technologique –dans laquelle les ingénieurs japonais ne sont pas entrés dans les contenus des conditions de production - a alors concerné l'atelier de broyage, représentant la partie technologique considérée à la fois comme la plus complexe et la plus standard, à la fois distante du patrimoine de connaissance de J. steel et bien maîtrisé par d'autres. Les autres éléments ont été soumis à un effort actif de domestication de la technologie d'injection Armco.

D'entrée, les ingénieurs de J. steel ont ouvert un certain nombre de boîtes correspondant aux conditions de production et d'usage de la technologie, souvent pour arriver à des résultats proches de ceux d'Armco, mais sur la base de leurs propres modèles de calcul et "besoins".

Un exemple marquant, illustratif de la démarche d'extraction' mise en oeuvre par J. Steel concerne le coeur du brevet Armco, le distributeur (⁴⁰⁹).

L'un des arguments en faveur d'Armco reposait sur la simplicité de leur technologie, elle même liée à l'ingéniosité de leur système de distribution réputé d'une grande précision: "*Pour nous les ingénieurs, l'équipement d'Armco avait le mérite d'être simple..pas d'accessoires mécaniques etc.. les autres systèmes avaient des machines de distribution ou beaucoup de mécanismes de contrôle etc. Bien sûr, la simplicité entretient une relation avec le coût de construction. Il est également naturellement plus facile à diffuser.*" (⁴¹⁰). Mais pour les ingénieurs du PET, le doute subsistait et cette simplicité semblait trop belle pour être vraie: ils ont alors procédé à un bricolage aussi original qu'imprévisible "*Compte tenu de la simplicité de l'appareil, on avait une légère appréhension. On s'est demandé si cet équipement si simple pourrait effectivement répartir le même volume de charbon sur chaque tuyère de façon équitable.*" (ibid.). Avant d'installer définitivement le système, les ingénieurs ont donc procédé à un essai à vide, à l'aide d'un astucieux dispositif "*on a essayé de*

⁴⁰⁹ Wennerstrom, J. (1977) US patent 4027920.

⁴¹⁰ Entretien Département central d'ingénierie, Futsu, Japon, février 1996.

mesurer le volume de charbon pulvérisé, en le collectant à l'aide de sacs à l'extrémité de chaque tuyère. Lorsque l'on a pesé ces sacs, le volume de charbon s'est effectivement révélé très irrégulier”.

Contrairement aux affirmations d'Armco, le corps à corps avec le dispositif indiquait des écarts entre les tuyères de l'ordre de 20%. Des performances jugées très insuffisantes sur un point considéré comme essentiel par les ingénieurs japonais. Une cellule d'amélioration a donc été constituée pour modifier cet élément, et essayer d'atteindre un taux de l'ordre de 6%.

Comment s'y prendre pour améliorer rapidement un appareil sur lequel les ingénieurs d'Armco avaient probablement travaillé pendant des années? Le distributeur était la fierté des ingénieurs d'Armco, un argument commercial essentiel, le coeur de leur technologie, c'est à dire le point de l'installation sur lequel ils avaient estimé avoir apporté la plus grande valeur ajoutée technologique, et justifiant des prétentions de retour financiers, liée à une propriété intellectuelle de la part d'Armco. La réponse japonaise à cette question révèle l'importance essentielle du sens pratique et du *bricolage*. Il s'agissait d'abord de tenter de comprendre le fonctionnement du distributeur par démontage et de localiser le problème: *“Cet ancien distributeur était doté d'une structure composée d'un cylindre externe et interne. D'après Armco, la distance entre les deux cylindres était d'une importance primordiale. Ce savoir-faire fait d'ailleurs partie du noyau central de leur brevet. Nous avons payé cher pour ce savoir -faire. Mais après de multiples essais, il s'est avéré que c'était la présence même du cylindre intérieur qui posait de problèmes”* (ibid). En bricolant le distributeur, les ingénieurs de J. Steel ont formulé le problème central à investiguer: celui de l'optimisation des dimensions et de la structure du distributeur.

Les ingénieurs du PET, en collaboration avec des chercheurs du centre de R&D, ont construit un prototype pour l'occasion. Ce prototype leur a permis de procéder à une multitude d'essais pour chercher à établir un rapport de corrélation entre la hauteur et le diamètre du cylindre, rapport conçu comme la clé du problème. Pourtant, malgré leurs efforts, l'objectif est resté hors d'atteinte. A force d'expérimentations, les chercheurs ont fini par révéler une anomalie de taille: le charbon ne se comportait pas conformément aux lois de la mécanique, ainsi qu'ils l'avaient cru. Les chercheurs de J. Steel ont alors découvert que le charbon pulvérisé transporté dans un lit de gaz comprimé ne se comporte pas comme un solide... mais comme un liquide. Le corpus de référence a donc radicalement évolué, passant de la mécanique à la dynamique des fluides *“en fait, ce qui se passe dans le distributeur relève de la dynamique des fluides: le charbon pulvérisé ou l'eau, c'est exactement la même chose. Les ingénieurs d'Armco ne l'avait pas compris.”* (ibid.).

Sur la base de ces nouvelles hypothèses, un distributeur totalement repensé a vu le jour - celui-ci n'était constitué que d'un seul cylindre. Les résultats obtenus par ce nouvel appareil ont été

spectaculaires puisque le nouveau distributeur fonctionnait avec une marge d'erreur de l'ordre de 5%. Cela correspondait à un résultat jugé satisfaisant, en considération du fait qu'aucune régulation individuelle n'était possible. *“Quand on fait la distribution d'eau dans des conduites avec instruments de contrôle, on sait (par expérience) que la marge d'erreur avoisine les 3%. On s'est dit que sans instrument de contrôle () il serait bien de contenir cet écart à moins du double de 3%, soit 6%...”* (ibid).

Cet exemple est très illustratif de la démarche d'ensemble suivie par les acteurs de J. Steel dans leurs apprentissages. Dès le départ, l'équirépartition a été considérée comme un point clé de la performance et du transfert technologique. L'intrication d'exigences liées à l'hypothèse de combustion parfaite et d'optimisation de la fonction de production, et la mise en perspective de la technologie Armco utilisée comme première base technologique y est lisible. Elle dénote d'une remontée vers les conditions de production de la technologie transférée, et de la mise en place d'une série de corps à corps avec certains aspects de l'objet technique, plutôt que d'un 'transfert' au sens littéral. Dans ce registre, l'astuce des ingénieurs, leur capacité à mettre en question, à bricoler, puis à se doter de moyens d'expérimentation et d'élaboration d'appareils optimisés a constitué un élément important de la dynamique d'apprentissage. L'influence de ces bricolages a été considérable. Mais il serait réducteur de limiter l'analyse aux bricolages. Ceux-ci ont été étroitement articulés à des savoirs plus fondamentaux. Ainsi, la clé du problème du distributeur, ancrée dans les fondements théoriques à l'origine de la conception du distributeur Armco, souligne qu'une telle performance n'aurait probablement pas été possible sans l'implication de chercheurs dotés de compétences très pointues.

Dans la dynamique d'apprentissage de l'entreprise J., la combinaison de connaissances de différentes natures, d'équations et de mesures expérimentales, de bricolages et de lois fondamentales de la physique, de lois existantes et d'expérimentations ad hoc, de modèles théoriques du haut fourneau et de données d'opération est très saisissante. Elle reflète la multitude foisonnante d'acteurs divers, d'objets et d'équations mis en relation dans la construction d'une cosmologie à la technologie d'injection de charbon chez J. Steel.

2.2) Accord informel et traduction descendante dans l'usine de D.

La dynamique d'apprentissage a été marquée, dans le cas français, par l'influence prépondérante de deux éléments. Premièrement, la construction de l'espace fondée sur la délimitation préalable du contexte d'action, a impulsé un mouvement de traduction technologique *descendante* alimentant une représentation de plus en plus détaillée de l'outil technique correspondant, selon une logique de type gigogne inversée, avec pour animateur central le chef de projet. Deuxièmement, le risque lié au caractère inconnu du charbon a été externalisé : l'accord a été rédigé comme si la

technologie existait et ne posait pas de problème de création. Le chef de projet s'est donc trouvé en charge de l'incertitude. Il a lui même largement externalisé la gestion de l'apprentissage et du risque en recourant à des fournisseurs extérieurs à la fois en matière de conception et de matérialisation de l'objet technique. L'ensemble de l'opération s'est déroulée dans une atmosphère controversée dont a répondu le chef de projet.

Formation d'une grille d'évaluation de la faisabilité

L'ouverture de l'espace d'innovation a correspondu à un accord informel de la part de la direction de l'entreprise portant sur un certain nombre de caractéristiques techniques et économiques d'un investissement visant à prendre en charge le problème. Cet accord liait le hf 3 de D., un *taux d'équivalence* (0.9) représentant le fonctionnement interne du hf, un niveau de performance visé (65kg) permettant un retour sur investissement justifiant un budget donné.

L'objectif, une performance fixée à '65 kg/ tf', représentait "la clé des calculs économiques"⁽⁴¹¹⁾, d'un seuil de rentabilité à 3 ans. Ce chiffre liait les exigences de la direction de l'entreprise, les objectifs de la Direction technique de D. - gain pour l'usine lié à l'économie de coke et de fuel- et le haut fourneau 2 - le taux d'équivalence théorique de 0,9 représente son fonctionnement interne calculé d'après le modèle mathématique du haut fourneau élaboré par l'Irsid⁽⁴¹²⁾.

L'utilisation du taux d'équivalence permettait de traiter le fonctionnement du haut fourneau comme une boîte noire. L'Irsid était en effet en possession d'un modèle du haut fourneau, prolongeant les travaux de Rist et permettant de calculer les taux de remplacement et les aspects économiques des injections en général et de l'injection de charbon en particulier. Le chercheur chargé d'effectuer les calculs spécifiques appliqués à l'injection de charbon se souvient d'avoir mené "*tout un tas de calculs, comme l'Irsid sait faire, pour calculer les conséquences, les taux de remplacement, des calculs dans tous les sens, pour calculer le bilan d'énergie, l'influence sur le process... Donc on a apporté..l'éclairage technique complémentaire qui était nécessaire afin de chiffrer de façon économique l'injection de charbon*". L'utilisation de ces modèles permettaient donc aux acteurs des sites de traiter le haut fourneau et la fonction de production comme une boîte noire, et de se concentrer sur la partie 'équipement' de l'injection de charbon et sur ses effets sans plonger nécessairement dans le fonctionnement interne du haut fourneau.

⁴¹¹ Entretien retraité, ancien chef de projet et co-rédacteur des dossiers et projets, siège F. Steel, Paris, janvier 1996.

⁴¹² La présence de modèles (Irsid) et d'intermédiaires tels que les prix relatifs des matières prêts à l'emploi indique l'inscription et le déplacement de réseaux existants (Callon et Law 1989). L'existence de données prêtes à l'emploi sur les prix relatifs des matières signale que l'innovation prend place au sein d'une fonction de production existante. Le modèle Irsid renvoie à l'importance des investissements en R&D réalisés autour des injections au hf dans l'après guerre.

Sur la base de ces différents éléments, le responsable de la section technique Fonte s'est vu chargé de présenter un dossier d'investissement, en faisant disparaître les incertitudes relatives au *comment* injecter. Les mécanismes de délégation au chef de projet, décrit dans ce qui précède permettent de comprendre la focalisation de celui-ci sur la question de la faisabilité: "*nos objectifs étaient de - regardons la fais... - avec un objectif de faisabilité derrière*"⁽⁴¹³⁾.

Rappelons que l'ensemble de l'espace d'innovation a vu le jour dans une atmosphère vivement controversée et agitée de débats concernant la faisabilité de l'injection de charbon et les risques d'explosions liés à ces installations "*On avait peur du charbon pulvérisé. Le charbon pulvérisé, c'est quand même pas commode. Il y avait des explosions, des problèmes de manutention, des problèmes de dosage -enfin des problèmes pas.. enfin à l'époque, ça nous semblait des difficultés technologiques majeures*"⁽⁴¹⁴⁾. "*Tout le monde avait un - une grande appréhension c'était que le charbon pulvérisé, ça faisait penser à "un coup de grisou" je ne sais pas quoi, ça faisait penser à un truc qui explose, il y avait des appréhensions sur le plan de la sécurité...Au plan industriel. Et puis les charbons pulvérisés, c'est vrai que c'était un truc délicat. On croyait, on avait vraiment des doutes sur la sécurité*"⁽⁴¹⁵⁾. Cet environnement instable a fait peser une profonde incertitude sur le processus d'innovation. Le souci essentiel des acteurs de l'innovation a consisté à se convaincre de la faisabilité de cette technologie et à apporter des réponses aux inquiétudes collectives. Le chef de projet, individu auquel la capacité d'engager des acteurs et des actions dans l'espace d'innovation de façon autonome a été déléguée, s'est vu en retour chargé de la responsabilité de la faisabilité, du succès de l'opération, des risques pris par rapport à la sécurité.

Comment s'y prendre pour traduire les intentions générales sur lesquels l'accord informel de la direction a été obtenu en installation d'injection de charbon efficace? Comment acquérir les compétences nécessaires à un utilisateur-consommateur averti d'installation d'injection de charbon? Comment s'assurer que l'investissement dont on lui confie la responsabilité ne va pas partir dans un grand nuage de fumé, en provoquant une catastrophe industrielle? Le chef de projet n'avait, au départ, aucune compétence particulière ni dans le domaine des injections de charbon, ni dans celui des injections au haut fourneau en général. Il était haut fournaliste de métier, arrivé à D. depuis quelques mois (1977), suite à la fermeture de son usine. En 1979, il avait été chargé de mettre sur pied la toute nouvelle Section technique du Département Fonte, inspirée des cellules de recherche des sites japonais. Et voilà que dans une ambiance où il entendait toute sorte de positions s'exprimer à propos des injections de charbon, sa direction se proposait de lui confier la responsabilité du projet. Le 10 juillet 1980, quelques jours avant de partir pour les Etats Unis visiter l'usine d'Armco, celui qui allait

⁴¹³ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

⁴¹⁴ Entretien retraité, responsable des essais spéciaux Irsid, Aix, février 1996.

⁴¹⁵ Entretien ancien chercheur Irsid, siège de F. Steel, janvier 1996.

devenir le chef de projet entendait pour la première fois parler de l'intention de la direction technique d'injecter du charbon à D. Il a donc entrepris de former son jugement sur les installations d'injection de charbon à travers une série d'expériences.

La première ressource que le futur chef de projet a pu utiliser a consisté à consulter la littérature présentant des expériences d'injections et à se doter d'une *capacité de lecture* des injections. A sa disposition, le responsable de la section technique a trouvé une poignée de publications relatives aux expériences d'injection de charbon dans le monde: *“j'ai essayé de voir les résultats de ce qu'il pouvait y avoir ailleurs, sachant que ce que l'on connaissait était très faible. Il y avait des publications sur la marche des haut fourneaux d'Ashland aux USA, dont le hf marchait avec du charbon, et c'était les seuls, il y avait - on savait - à Donetsk, une usine russe dans laquelle il y avait aussi des hf qui marchaient avec de l'injection de charbon, () on savait qu'il y avait des hf chinois qui marchaient avec du charbon, c'est à peu près tout ce qu'on savait, sachant quand même (que) certains essais avaient été effectués en France ()..une publication là dessus...”*. Les éléments d'information fournis dans la poignée d'articles consultés semblaient néanmoins bien maigres, mis en regard des responsabilités industrielles, pour se faire une idée définitive sur la faisabilité ou la non faisabilité des injections de charbon. L'expérience française tentée dans les années 60 *“paraissait vouée à l'échec (pour des raisons qui) n'avaient rien à voir avec le charbon, parce que ça a été un échec en tant que marche des, du haut fourneau”* ⁽⁴¹⁶⁾. En Chine *“ça paraissait un peu difficile de savoir”*. En URSS *“c'était difficile et fermé, donc on avait entendu.. il y avait eu des problèmes.. Là je ne saurais pas dire, parce qu'au bout d'un certain temps, on ne sait plus si c'est la rumeur”* (ibid.). Mais *“les Etats Unis avaient publiés des comptes rendus de marche, et ils marchaient régulièrement avec des taux de 50 kg () depuis une quinzaine d'années”* (ibid.).

Le pionnier des injections en France rend compte de l'importance de l'expérience Armco dans l'argumentation en faveur du charbon: *“La seule chose qu'on pouvait montrer, c'est que ça marchait aux Etats Unis. Dieu merci! Il restait encore deux haut fourneaux qui marchaient au charbon aux Etats Unis”* ⁽⁴¹⁷⁾. Le futur chef de projet était plus mesuré et cherchait à se faire une idée de la validité des données publiées *“aux Etats Unis, ça a l'air de marcher, mais il y a eu beaucoup, beaucoup de problèmes de sécurité. En particulier, il y a eu une reconstruction nécessaire de toute leur installation parce qu'elle avait complètement explosé une dizaine d'années avant. C'était un peu le... un des sujets de préoccupation”*. La littérature se gardait bien de faire référence aux problèmes de sécurité rencontrés et tendaient à ne présenter que les aspects positifs des expériences Armco. Mais pour celui qui allait devoir prendre la responsabilité du projet, les explosions connues par Armco lors du

⁴¹⁶ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, janvier 1996.

⁴¹⁷ Entretien retraité, ancien responsable des essais spéciaux Irsid, Aix, février 1996.

démarrage de leur installation n'étaient pas des détails, et il en retenait que les américains avaient connu "*quand même beaucoup de soucis au départ*".

Les acteurs de l'innovation – directeur technique du site, ingénieur de la section ingénierie du site et responsable de la section technique haut fourneau - et plus spécialement le chef de projet - ont cherché à élaborer les connaissances fragmentaires dont ils disposaient sur l'injection de charbon, le long des lignes directrices de la faisabilité et de la réussite de l'investissement. Le futur chef de projet s'est en particulier doté d'une capacité de questionnement à partir des orientations données par sa direction, de ses lectures, de discussions, de controverses. L'ensemble de ces éléments - orientations générales à atteindre, controverses et débats dans la profession, et jugements techniques fondés sur la littérature - ont favorisé l'élaboration d'une grille d'analyse des installations d'injection de charbon. Cette grille d'analyse a été confrontée à différentes installations existantes. Cette démarche a favorisé l'accumulation d'une certaine expérience. Elle a permis au chef de projet de se forger une sorte d'expertise sur différents points analytiques jugés essentiels. Il lui a ensuite été plus facile de formuler précisément ce qu'il voulait et ne voulait pas. Cette grille a servi de support à la formulation d'une *demande technologique*, sous forme de spécifications et de cahiers des charges garantissant une injection réussie. L'expertise acquise a constitué la base de l'installation hybride et ad hoc, adaptée aux besoins de l'usine de D. (⁴¹⁸).

La grille progressivement mise au point reposait sur la formulation de quatre questionnements, quatre problèmes principaux. Le premier, et sans doute le plus important pour les acteurs de l'innovation portait sur la question de la sécurité. Celle-ci représentait un gros doute collectif, un point de controverse essentiel "*ça nous paraissait le problème le plus important, avec ça, est ce qu'on ne risque pas de tout faire péter?*". Armco affirmait certainement que la sécurité de son installation était maîtrisée. Mais les acteurs de D., qui seraient inévitablement rendus responsables de toute catastrophe qui pourrait se produire, demandaient à voir, et à être rassurés. Le second, lié au métier de haut fournaiseur, concernait *la fiabilité* de l'installation d'injection. De façon générale en sidérurgie, mais à D. plus particulièrement où la stabilisation des marches étaient déjà un sujet délicat, il n'était pas possible d'envisager d'investir dans un équipement menaçant le fonctionnement régulier du haut fourneau. Il n'était pas question d'obtenir le soutien des utilisateurs s'il s'avérait que l'installation d'injection ne fonctionnait pas avec une grande régularité. Le troisième point concernait *la marche des haut fourneaux*, en d'autres termes, les effets économiques et techniques de l'injection. Ce point constituait la clé essentielle de l'investissement, puisqu'il concernait la relation entre input et output de la fonction de production. Armco avait certes publié des données d'opération. Mais un doute important

⁴¹⁸ En comparaison avec le Japon, le point marquant est ici la formation d'une expertise et non d'une compétence. Les savoirs pénètrent sur le sol des conditions de production seulement dans une logique d'interface et non de re-production. Les savoirs accumulés ne sont pas des savoir-faire, mais essentiellement des savoirs comprendre et juger (diagnostic), et plus secondairement des savoirs combiner (Weil et Hatchuel 1992).

subsistait sur ce point essentiel. Les essais français avait échoué sur ce point. Un écart était anticipé entre publication et réalité observable. Est ce que le hf marchait efficacement et régulièrement avec l'injection de charbon? Le quatrième point était un sous thème de la marche des haut fourneaux particulièrement crucial. Ce point *“lié à la marche des hf, qui était l'équirépartition du charbon sur chacune des tuyères, et la maîtrise de cette équirépartition autrement dit, est ce qu'on arrive bien à mettre le charbon sur chacune des tuyères, hein, est ce qu'on met bien 500 kg heure sur chacune des tuyères, est ce qu'on peut régler, est ce qu'on ne peut pas régler?”*.

Voyages et discussions avec les fournisseurs: vers la construction de l'offre et de la demande

La grille d'analyse ainsi constituée a servi de base à la formation d'une expertise et à la construction d'une offre et d'une demande technologique idiosyncrasique. Les acteurs français ont eu tendance à porter un regard critique et suspicieux sur la littérature.

Dans leur démarche évaluatrice, le fait de pouvoir voir, regarder, observer, discuter, essayer les équipements - développer une première expérience de corps à corps utilisateur-objet - a occupé une place considérable. Le contact direct était indispensable pour *“se convaincre que c'était faisable sur le plan industriel, qu'il n'y avait pas de risque”*⁽⁴¹⁹⁾. L'un des acteurs que nous avons interviewé a exprimé cette exigence corporelle avec force: *“donc on avait sous les yeux, on pouvait avoir sous les yeux, en allant aux Etats Unis, les hf de tailles significatives, 19m, et au moins 3000t/j, qui fonctionnaient depuis au moins 15 ans avec injection de charbon. () Donc ...ce voyage aux Etats Unis nous a permis de voir un site industriel, on a vu une bonne installation, qui était exploitée depuis 15-20 ans, sans que ça leur ait sauté au nez -il faut le voir pour le croire. On a pu discuter avec les gens, voir quelles ont été les mesures de sécurité qui avaient été prises, l'inertage, clapets de sécurité en cas d'explosion, éviter les appels d'air, et puis de voir, sur le plan du fonctionnement du hf, que c'était un truc maîtrisé. De le voir avec ses yeux.”*⁽⁴²⁰⁾. Un autre acteur se souvient du scepticisme qu'il a réservé aux affirmations des haut fournistes de Donetzk lors d'une visite réalisée sur leur site, du fait de n'avoir pas été autorisé à voir ou 'toucher' le haut fourneau directement *“Ca n'a pas été très facile de voir comment, en particulier, je crois pas qu'on ait pu faire le tour du hf, on était en salle de contrôle et on nous disait ‘on met 50 kg de charbon, tant de tonne par heure par tuyère, les résultats sont publiés..’”*⁽⁴²¹⁾.

⁴¹⁹ Entretien, ancien chercheur en charge de PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996

⁴²⁰ Entretien, ancien chercheur en charge de PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

⁴²¹ Entretien, ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

Les voyages et les discussions avec les fournisseurs, complétés par des ‘observations’ directes chez des utilisateurs ont été au fondement de l’élaboration progressive d’une offre et d’une demande technologique au projet. A titre d’illustration, nous proposons au lecteur de suivre l’exemple de la sécurité et de l’atelier de broyage.

Dans l’élaboration d’un cahier des charges sécurité et broyage charbon, le voyage à Armco a constitué une référence de choix. *“Bon donc on a été à Ashland. A ce moment là, on a vu qu’il y avait effectivement, depuis 4,5 ans, leurs Fx marchaient parfaitement bien, avec une injection de charbon à 50 kg, il y avait plus d’explosion, que ça c’était bien maîtrisé, que les problèmes liés à la 1ère installation étaient totalement maîtrisés, qu’il y avait des précautions à prendre, hein, que au niveau inertage, au niveau du contrôle de l’atmosphère, au niveau...de la mise en place de [sondes] de détection dès qu’il y avait un échauffement, inerte, ...un certain nombre de mesures très très spécifiques...ben moyennant cela, pas de problème, tout va bien. Donc on était un peu rassuré de ce côté là”* (⁴²²). Armco offrait la possibilité de constater *de visu* le fonctionnement d’une installation de charbon où les problèmes de sécurité avaient été maîtrisés. Il était possible de comprendre les principes par lesquels des questions aussi essentielles à la réussite que celle de la sécurité avaient été résolues. Les problèmes de sécurité étaient donc maîtrisables. La seconde visite de site, à destination de Donetsk en Ukraine a d’ailleurs administré la preuve de ce que l’injection était faisable, comme le soulignait en termes crus un chercheur de l’époque *“c’était dans une usine assez merdique, dans un coin paumé, et ça marchait. C’était la preuve que ça pouvait marcher dans des conditions les pires qu’on pouvait imaginer sur le plan environnement technique”*. Par ailleurs, les ingénieurs d’Armco recommandaient de débiter les injections avec du charbon à faible teneur en matière volatile pendant les premiers mois, pour raison de sécurité, puis de remplacer ce charbon par un charbon à haute teneur en matières volatiles. Sur le plan des performances, et en particulier de la combustibilité du charbon, Armco recommandait, sur la base de calculs d’optimisation, de se conformer à la norme ‘80% inférieur ou égal à 74 microns ou 200 mesh’ (⁴²³). Le broyeur devait donc correspondre à cette

⁴²² Entretien, ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996. A titre indicatif, on retrouvait l’ensemble de ces dispositifs sur les deux installations de D et de O.

⁴²³ Il ne nous est pas possible de tout développer ici, mais notons que la question de l’optimisation de la granulométrie était avec celle de la maîtrise de la sécurité l’une des deux clés essentielles du succès ou de l’échec des premières expériences charbon: *“nous n’étions pas les seuls dans le monde sidérurgique à étudier le charbon, il y avait aussi des essais en grande Bretagne, aussi aux Etats Unis, peut-être en Russie, sûrement, enfin je pense, et ces essais qui ont quand même duré assez longtemps, qui étaient des essais industriels - c’est à dire qu’on injectait vraiment du charbon au haut fourneau - se sont soldés par un échec (...) on avait conclu à un échec parce qu’effectivement, on n’arrivait pas à faire marcher le haut fourneau correctement avec du charbon, c’est à dire qu’à partir d’un moment (la charge) donc ne descendait plus, il y avait des blocs qui passaient dans les tuyères, enfin...autrement dit, il ne marchait plus. Et donc on a conclu ben que c’était un échec, alors il ya a quand même eu, à l’époque je me souviens, c’est des souvenirs anciens parce que je n’étais pas directement concerné, mais ça m’intéressait quand même parce que disons que avec l’équipe de recherche on discutait quand même entre nous, de nos sujets respectifs, et je me souviens de leur conclusion en particulier qui consistait à dire “ben oui, ça marche un peu mieux en Angleterre - d’ailleurs je crois que par la suite ils ont abandonné aussi, oui, ils ont abandonné c’est sûr - parce qu’ils le broient plus fin”, donc la question de la granulométrie, et il y avait effectivement un broyage plutôt grossier, dans le cas de Louvroil. Alors ensuite est venue la période fuel.”* (Entretien Responsable Département Fonte, site de D., janvier 1996.

spécification, pour être capable de transformer le charbon brut en particules ingérables par le haut fourneau.

Malgré ces éléments rassurants et l'acquisition d'une série de connaissances spécifiques relatives à l'installation future, les acteurs de D., estimant être trop incompetents en matière de charbon, ont loué les services de conseil en ingénierie des Charbonnages de France pour les assister dans la construction de l'offre et de la demande de technologie 'sécurité et broyage charbon'.

La démarche suivie pour construire l'offre et la demande de technologie de l'installation du hf 2 de D. a combiné une série de logiques et de relations. Les réflexions du chef de projet sur le voyage à Donetsk, voyage ayant suivi de quelques mois celui organisé à Ashland, éclairent parfaitement le métissage de logiques commerciale (évaluative), coopérative (informative) caractéristique de la dynamique française d'apprentissage par le marché: *"c'était une deuxième expérience qui montrait que ça marchait, mais qu'il ne fallait pas compter sur eux pour avoir un système, enfin, clé en main si j'ose dire, ou nous donner des indications précises, ou alors il fallait acheter, mais qu'on aurait pas beaucoup d'indications avant. Autrement dit c'était une expérience positive, mais il n'y avait aucune issue - euh - aucune issue industrielle avec eux, envisageable..."* (⁴²⁴). Ces réflexions indiquent bien également la dynamique de construction d'une offre et d'une demande technologique autour du projet: si Armco a proposé une relation commerciale trop longue pour être acceptable, Donetsk proposait à l'inverse une relation commerciale trop courte et immédiate pour permettre aux ingénieurs de D. d'acquérir une expertise suffisante sur la qualité du bien proposé (⁴²⁵).

La construction des spécifications s'est faite par l'intermédiaire de deux mécanismes: la mise en concurrence des offreurs et l'acquisition expérience 'corporelle', de visu, et chez des utilisateurs. Reprenons le cas des broyeurs. Dans ce cas les premières discussions ont permis de repérer les grandes alternatives technologiques (Foray et Al 1992) *"Aux Etats Unis, il y avait un broyeur qui était vertical, en Russie, c'était plutôt un broyeur à boulet, horizontal, on avait dit 'ben il y a deux écoles, et on va regarder ce qui se passe avec les deux écoles pour choisir le produit'"* (⁴²⁶). A partir de cette division de l'espace technologique, comment construire une série de spécifications mettant en relation les besoins particuliers du hf 2 de D et l'offre telle qu'elle a été élaborée par les acteurs? En d'autres termes, quel broyeur choisir, vertical ou horizontal pour répondre au mieux aux besoins du haut fourneau 2? Les ingénieurs de D. savaient qu'ils cherchaient un appareil adapté à la sidérurgie (ie équation Armco 80% inférieur ou égale à 74 microns). Mais la clé des spécifications a émergée à l'occasion des discussions entreprises avec les constructeurs et des visites rendues aux utilisateurs: *"de*

⁴²⁴ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de J. Steel, janvier 1996.

⁴²⁵ Ces éléments entretiennent une relation étroite avec la question de l'asymétrie (Akerlof 1970) et les travaux d'Eymard-Duvernay (1989) sur la question de la qualité et de la qualification des utilisateurs dans la relation marchande.

toutes nos visites de broyage charbon, mais plutôt des discussions avec des constructeurs, mais quand même surtout les visites - parce qu'on a fait des visites à EDF qui avaient les deux types de broyeurs, les verticaux et les horizontaux, il s'est avéré que les broyeurs horizontaux étaient beaucoup plus fiables que les verticaux et demandaient beaucoup moins d'entretien, et avaient un taux de marche beaucoup plus important.” (⁴²⁷). L'expérience de visu, acquise lors des visites spécifique pendant lesquelles les acteurs ont pu toucher du doigt les installations ont joué un rôle essentiel dans la mise en place de cette nouvelle traduction *“quand on est dans une visite, une centrale thermique par exemple, il y avait 3 broyeurs horizontaux pour alimenter 3 unités, et puis il y avait 4 broyeurs verticaux pour alimenter 3 unités. C'est à dire qu'il y en avait toujours un (un broyeur vertical de réserve) pour remplacer les trois autres. Alors nous, comme on voulait un broyeur, on a dit, s'il marche 80% du temps, ça peut pas aller, parce que là, ça correspond à un souci process haut fourneau. Un haut fourneau, plus il marche régulièrement, mieux ça vaut, et on ne peut pas changer tout le temps..() les différences allaient entre 97% et 80% de taux de marche, donc c'est capital..”* (ibid.).

Progressivement, les spécifications et les normes descriptives d'une demande d'installation - normes de fonctionnement, capacité, efficacité, consommation, qualité du produit- ont ainsi été élaborées, en même temps qu'une liste de fournisseurs potentiels était constituée (⁴²⁸). Sur l'ensemble des points de la grille d'analyse - sécurité, fiabilité, marche des haut fourneaux, équirépartition - la même démarche d'élaboration de connaissances fragmentaires a été mise en oeuvre. Dans chaque cas, le cheminement a pris la forme d'un processus combinant information et évaluation, menant dans les cas où l'élaboration des connaissances étaient jugées insatisfaisantes à la mise en place d'élaborations supplémentaires.

Un cas illustratif de ce dernier point est celui de l'expérience U. Sur la marche des haut fourneaux, ni Donetzk ni Armco n'avait paru satisfaisant. Un doute subsistait sur le haut fourneau d'Ashland *“le hf marchait à l'américaine, si j'ose dire”*, sous-entendu, très loin des exigences japonaises et européennes en matière de conduite de haut fourneau. L'expérience des essais menés en 1981 dans la petite usine d'U. est donc venu en partie combler ce vide. L'expérience nationale semblait d'ailleurs irremplaçable *“le pas important c'était de faire avancer l'objectif injection de charbon, de*

⁴²⁶ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, janvier 1996.

⁴²⁷ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, janvier 1996

⁴²⁸ Le lien est particulièrement visible sur la question de l'équirépartition, qui a pesé, de façon importante sur la sélection de Würth. La technologie Armco ne semblait pas satisfaisante sur cette question *“un point qui nous avait quand même un peu déçu, c'est en regardant dans les tuyères, on avait l'impression qu'il y avait des tuyères où il y avait du charbon, et d'autres où on en voyait pas, des tuyères ou on en voyait pas autant”* (Chef de projet PCI). Würth basait son argumentation commerciale sur la critique des systèmes existants, dont il déclarait qu'elle avait été à l'origine du développement de son système alvéolaire, permettant un contrôle simple et mécanique tuyère par tuyère. *“on est parti du principe que malgré tout, quelques mois, leur technologie n'était pas forcément totalement stupide puisque ça se passait bien.. le, le, il n'y avait pas d'explosion en particulier, le fourneau avait pas mal maché, l'équirépartition, bon elle nous paraissait... -on avait été voir, bien sûr - elle nous paraissait bonne, il faut dire ce qui est, et intellectuellement plus satisfaisante, puisqu'on disait 'chaque tuyère a son doseur, donc on est tranquille”* (chef de projet PCI.)

voir un hf en France, avec nos lits de fusion , avec nos ingénieurs, se convaincre que c'était faisable, que sur le plan de l'exploitation c'était gérable, que s'il y avait des pannes, on savait s'en sortir, et que ça perturbait pas la marche des hf et les résultats d'exploitation, toutes ces choses là étaient très importantes pour des gens qui étaient extrêmement prudent dans le monde des hf”⁽⁴²⁹⁾. Le site de D. a été moteur dans l'organisation et l'allocation de financement aux essais d'U. Le chef de projet, membre du comité de suivi de l'opération, se souvient de l'intention expérimentale ayant présidé à l'opération “c'était vraiment pour faire des essais. Ben donc là c'était pas, allez () ça pouvait être fait sur quelques tuyères...” “Il y avait le côté Irsid, on disait ‘on ne va pas se lancer sans rien, on va essayer de se faire une idée par nous même, déjà..de ce qu'on peut... non pas de ce qu'on peut faire, mais de voir un petit peu si du charbon ça brûle, qu'est ce que ça fait dans un hf, de faire un petit peu nos essais”⁽⁴³⁰⁾.

Cahiers des charges et élaboration collective de l'installation

Les appels d'offre ont certes représenté une étape formelle, dans un processus plus large, mais ils ont par eux même constitué un outil important dans la dynamique d'apprentissage. Ils correspondent en fait à une variante visuelle et orale -et par conséquent de l'ordre de l'ajustement intime - des tableaux comparatifs dressés sur papier par les ingénieurs de K. (Bourdieu 1972, 1980). Ils représentent l'étape ultime d'élaboration de l'offre et de la demande technologique, le moment de vérité où le travail de construction du marché porte ses fruits. La demande, représentée par les acteurs de D. et en particulier le chef de projet, a confronté les offres en s'efforçant de les juxtaposer dans le temps - organisation d'une série d'entretiens groupés- et de les rendre comparables à partir de critères transversaux d'évaluation⁽⁴³¹⁾. De plus, les appels d'offre ont marqué également la structuration d'une *fragmentation* de l'installation, fondée sur une approche analytique du marché technologique.

La clôture de l'ensemble de cette dynamique d'élaboration conjointe de l'offre et de la demande de l'installation du hf 2 est intervenue par l'intermédiaire de la circulation du cahier des charges entre les acteurs de D. et le fournisseur retenu, et la circulation des plans représentant une projection des futures installations. Lorsque l'accord est intervenu sur ces éléments, ces objets de représentation collective de l'installation, d'abord outil de coordination, se sont transformés en repère conventionnel pour la réalisation des installations et l'exécution des contrats.

⁴²⁹ Entretien, ancien chercheur en charge de PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996

⁴³⁰ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, janvier 1996

⁴³¹ Les supermarchés sont réputés pour ce genre de mise en concurrence, mise en rang des offreurs, généralement convoqués en même temps, et amenés à patienter dans la même salle d'attente pendant que l'un d'eux fait ses offres.

CONCLUSION

La comparaison des schémas (articles voir annexe I) représentant les installations indique à la fois les ressemblances et les différences essentielles des deux objets techniques ayant constitués les premières installations à O. et à D.

La partie broyage, de principe assez semblable dans les deux cas (sécurité, granulométrie), révèle les logiques d'investissements différentes. Les plus marquantes concernent la capacité de broyage installée: deux broyeurs verticaux de 25 T/h mis en parallèle à O. ; et un broyeur horizontal de 30t/h à D. La différence de capacité (50 vs 30) traduit les choix différents effectués en matière de haut fourneau (grand haut fourneau représentatif à O vs haut fourneau moyen limitant les risques à D), de

stratégies d'investissement (surinvestissement systématique d'innovation vs surinvestissement de contournement et d'exploration des limites à D), de résolution de la question de la fiabilité (recommandations Armco et fiabilisation maison a posteriori vs optimisation par le marché). L'atelier de broyage français prévoit explicitement (représentation en pointillé) la possibilité d'alimenter un second haut fourneau sans modification. La différence de type de broyeur (2 verticaux vs 1 horizontal à boulet) traduit également deux manières de construire l'investissement et de régler la question de la fiabilité: J. Steel s'est conformé, pour la première installation, aux recommandations d'Armco. Etant donné les problèmes de fiabilité des broyeurs verticaux de l'époque, contrebalancés par un avantage en matière de consommation d'énergie, et pour respecter les exigences de fiabilité japonaises élevées (en matière de régularité de l'injection), l'installation d'O devait donc bénéficier de 2 broyeurs. A l'inverse, F. Steel a intégré Armco dans un mouvement d'élaboration de l'objet technique avec des utilisateurs, et des producteurs. L'optimisation de l'investissement et de la fiabilité de l'installation revenait à arbitrer entre deux broyeurs verticaux et un broyeur horizontal.

La partie injection, à l'inverse, se décline selon des principes relativement différents dans l'un et l'autre cas. Dans les deux cas, selon le schéma Armco (⁴³²), les silos de stockage et de distribution ont été mis sous atmosphère azotée pressurisée régularisant les débits et sécurisant l'installation. Comme dans le dispositif Armco, la régulation des débits s'appuie sur des mesures différentielles de stockage et de distribution fondées sur la montée. Mais l'installation d'O. a repris intégralement le principe Armco composé de trois silos de distribution mis en parallèle (l'un injecte, l'un attend, l'autre se remplit). L'installation de D. s'est écarté du système Armco en mettant en série deux silos: le premier dose le débit, et le second distribue le charbon (système Würth-site de D.) (⁴³³). L'innovation, résidant dans la mise en ligne des silos, repose sur le principe du *sas* assuré par le silo intermédiaire entre "*le côté basse pression et le côté haute pression de l'installation*" (⁴³⁴). La mise en ligne a permis de supprimer un silo dédié à la fiabilisation (le silo qui attend) chez Armco. Le second point essentiel de divergence réside dans le système de répartition. J. Steel a repris la répartition Armco: le charbon extrait du silo de distribution est mis sous pression et envoyé dans un 'éclateur' qui le répartit équitablement entre les tuyères de manière pneumatique. F. Steel a, à l'inverse, adopté le système Würth: le charbon est fluidisé dans la partie basse du silo de distribution, il est extrait mécaniquement par des doseurs vers les 23 lignes correspondant aux 23 tuyères du haut fourneau. L'innovation consiste donc à régler ligne par ligne le débit charbon à la sortie du silo de distribution.

La comparaison des premières installations montre la fidélité de J. Steel à la technologie établie par Armco. Cette fidélité trahit la logique technologique mise en œuvre: la fidélité à Armco,

⁴³² Bell, S. et Alii (1975) "Armco Coal Injection" in: AIME Ironmaking Proceedings, Toronto, April 1975, pp. 307-325.

⁴³³ Limpach, R. et Alii (1982) "Nouveau concept pour l'injection de combustibles solides au haut fourneau" in: Revue de Métallurgie, juin 1982, pp. 487-494.

considérée comme un point de passage obligé, et l'attitude de domestication et de modification de l'intérieur, à partir de la maîtrise des conditions de production de la technologie. La première installation française reprend certains éléments de la technologie Armco, mais pour l'essentiel, n'hésite pas à s'éloigner de cette technologie établie. La forme prise par l'installation traduit la mise en place d'une série d'alliances, via le marché, composant des couples ajustant demandes et offres. Cette distanciation traduit une stratégie d'hybridation de principes hybrides jugés favorables à l'optimisation de l'investissement réalisé, et une localisation de l'investissement adapté aux besoins spécifiques du site et du haut fourneau considéré.

1) Construction des espaces d'innovation et continuité technologique

Sous l'apparence lisse des courbes de diffusion de la technologie d'injection de charbon se cache une réalité complexe ponctuée de créations technologiques multiples. L'étude de cas comparative présentée ici met en scène deux créations technologiques apparemment regroupées dans la même catégorie "technologie d'injection de charbon au haut fourneau" et pourtant très différentes dans les processus suivis et dans la forme de l'objet technique mis au point. La spécificité de chacune d'entre elle doit être comprise comme un ancrage dans une fonction de production singulière, localisée.

La comparaison fait apparaître que ces formes reposent sur la dynamique du processus de création technologique.

L'apport essentiel de cette seconde partie concerne probablement l'éclaircissement de la question de la continuité-discontinuité. Nous avons démontré que cette frontière n'a rien de naturel. Elle dépend étroitement de la définition des espaces d'innovation et de leurs dynamiques. L'innovation vit dans un espace toujours singulier que lui construisent les acteurs. Il peut arriver que la continuité technologique soit forte, comme dans le cas japonais ou faible, comme dans le cas

⁴³⁴ Limpach et Alii (1982) op cit.

français. Dans un cas comme dans l'autre, la continuité-discontinuité se construit dans une logique d'investissement.

Grâce à la comparaison, il est possible de valider l'hypothèse fondatrice de ce chapitre, et au fond de toute théorie de l'innovation, selon laquelle la continuité technologique n'est pas automatique mais problématique, et est prise en charge de façon singulière par les acteurs dans chaque processus de création technologique.

Premièrement, y compris dans le cas japonais où l'illusion de continuité" est la plus forte - et explique sans doute que certains auteurs se soient autorisés à qualifier l'innovation à la japonaise d'imitatrice (Jolivet 1996) - une analyse détaillée révèle qu'il est beaucoup plus pertinent de parler d'articulation continuité - discontinuité. Car au fond, à y regarder de près, la continuité entre la technologie Armco et la technologie J. Steel n'a été qu'apparente. Dans un mouvement très similaire à celui décrit par Callon et Law dans la domestication des coquilles St Jacques, les acteurs de l'innovation japonais ont domestiqué la technologie plutôt qu'ils ne l'ont copié (⁴³⁵). C'est seulement sous cette hypothèse qu'il est possible de comprendre la réinvention d'une installation sur la base des plans de l'installation d'Ashland. Les ingénieurs d'Ashland n'ont pas fourni les plans de l'installation O. Pas plus qu'ils n'ont construit la première installation. Sur le plan de la dynamique d'apprentissage, cet épisode révèle une méthode proche de l'heuristique mais qui entretient également un rapport avec la raison pratique et graphique des ingénieurs. Les ingénieurs japonais ont d'abord bricolé les modèles et les plans d'Armco. Ils en ont tiré les plans de l'installation de O. Ce bricolage aurait été impossible sans qu'une compréhension et une compétence s'impriment dans les corps des concepteurs (Magaud et Sugita 1992 ⁴³⁶). Les ingénieurs du PET ont construit une installation adaptée à leurs besoins, d'abord en modifiant les plans avec l'aide des algorithmes fournis, ensuite en confrontant ces plans aux ingénieurs d'Armco, puis en les projetant dans la production d'une installation réelle. Les plans ont donc constitué une double photographie: d'un côté les savoirs des ingénieurs sont venus s'y imprimer et s'y coordonner, de l'autre la première installation y a progressivement pris forme. Les plans ont constitué l'intermédiaire porteur de la logique graphique des ingénieurs, un langage commun ayant facilité les échanges (Henderson 1995, Latour 1995). Comme le souligne la théorie de 'l'absorptive competence' (Cohen & Levinthal 1990 ; Pralahad et Hamel 1990), il est illusoire de croire qu'une telle opération consiste à transférer des savoirs existants dans un lieu vide de savoir.

⁴³⁵ Le terme imitation présente indiscutablement une certaine ambiguïté. Si imiter consiste à 'copier' sans valeur ajoutée, à 'piller', il est clair que le cas PCI démontre qu'il n'en est rien. A l'inverse si imitation rend compte d'une capacité à domestiquer, à apprivoiser, à bricoler, à utiliser la métis (ruses, formes, sens pratique) par fidélité à un modèle, ce type d'approche représente incontestablement une partie importante de la stratégie de J. Steel.

⁴³⁶ Magaud, J. et Sugita, K. (1992) *France-Japon: un produit, deux façons de faire*, Dossier de recherche du CEE n°43. Les auteurs ont mis en évidence l'importance de la logique graphique et de l'apprentissage par bricolage dans l'atelier japonais de Nagano. Ainsi, lorsqu'un nouveau modèle de téléviseur arrive, il n'est pas fragmenté en principes en tâches déléguées. Un 'schéma' de l'appareil et un prototype de l'appareil circule et est démonté et remonté par différents acteurs. "l'approche est visuelle et globale" p. 27.

L'apprentissage procède par recombinaison à partir de ce qui est considéré comme connu, et par élaboration, à partir de ce qui est considéré comme inconnu.

De fait, le processus d'innovation japonais a créé une double discontinuité: entre la technologie japonaise et la technologie étrangère, et entre l'espace technologique passé et avenir. L'ensemble de l'opération de domestication a reposé sur une posture allant dans le sens des choses à apprivoiser, dans le but d'avoir prise sur elles et de les déplacer plus aisément dans un cadre différent. La création de l'espace d'innovation de J. Steel se confond donc avec une stratégie consistant à se glisser entre un espace technologique étranger existant et un espace technologique national à venir afin de créer une technologie J. Steel, une technologie pour le Japon. Cette projection tient également du pari, elle est un effort de détournement. Elle passe par une opération de domestication. Le cas japonais illustre l'existence des espaces technologiques. Il montre que l'entreprise J. si elle souhaite déplacer la dynamique technologique et la faire passer par ses haut fourneaux doit d'abord se plier à la logique de cet espace, le comprendre, le qualifier. Ainsi chaque espace d'innovation fait référence à un espace technologique plus ou moins large, plus ou moins élaboré ou 'complet', correspondant à une "perception technologique" construite par les acteurs de l'innovation dans leur travail de représentation.

Du côté français, la frontière entre continuité et discontinuité technologique s'est posée de manière tout à fait différente. La lecture de l'espace technologique a été effectuée d'entrée à partir de la constitution d'un cadre local, le bilan énergétique de l'usine de D., à partir duquel des éléments hybrides ont été assemblés selon une démarche idiosyncrasique. En ce sens, l'installation construite est unique et repose sur un assemblage de technologies diverses qu'elle tient ensemble dans un alliage spécifique.

La frontière majeure constituée par les acteurs de l'innovation de l'usine de D. a épousé la délimitation d'une frontière des compétences externes et internes mêlées dans la co-conception de l'installation. Nombre d'éléments ont été empruntés à l'espace technologique existant, mais selon une logique éclatée, fragmentée constituant un assemblage inédit. Nombre d'autres aspects de l'objet technique ont fait l'objet d'une conception ad hoc créant au passage des solutions techniques originales.

Dans les deux cas, l'innovation ne se situe ni absolument dans une logique de continuité ni de discontinuité par rapport à l'espace technologique existant. Dans les deux cas la frontière continuité-discontinuité s'établit le long d'une ligne de tension, d'un arbitrage entre mobilisation, externalisation et élaboration. Dans les deux cas enfin, la délimitation de cette frontière, inscrite dans l'objet technique final a été indissociable du processus d'innovation.

Au Japon, l'étape de problématisation-simplification ayant ouvert l'espace d'innovation a porté sur le contenu de la technologie, selon une logique que nous qualifierons de production : la construction de l'objet technique et l'explicitation interne de ses conditions de production ont formé le support de l'accumulation de savoirs technologiques. Cette accumulation a été assurée principalement par le Département Central d'ingénierie, auquel la responsabilité de la coordination du processus d'investissement innovatif a incombé en priorité. L'engagement a permis un basculement, en inscrivant la création technologique dans l'espace de qualification, posant ainsi les conditions d'une créativité organisée et l'engagement au-delà de l'espace d'innovation.

En France, l'étape de problématisation-simplification s'est ouverte sur une négociation entre acteurs du contexte et acteurs de l'innovation. Ce cadre fixé pour l'ensemble du processus, était fondamentalement localisé. Un accord a été conclu sur le cadre à l'action avant d'entrer dans les contenus, en principe, en général, selon une logique que nous qualifierons d'utilisation. L'incarnation de cette logique est l'acteur, le chef de projet créé pour l'occasion. Le projet a suivi un processus de descente en généralité et de délégation en cascade progressive visant à préciser les contenus et à combler, de proche en proche, l'écart entre cadre général, et installation.

L'accumulation s'est trouvée très liée aux besoins d'élaboration repérés par l'étape de problématisation et structurée autour d'un point de passage obligé. Le point de passage obligé agit comme un point à élaborer pour faire tenir les équivalences. Au Japon, le guide de l'action a été composé autour d'une heuristique avec le fuel de façon à optimiser la fonction de production et à maintenir les avantages acquis. En France, le point de passage obligé a consisté à remplacer l'équivalent de 65 kg de coke. Une série de traductions a débouché sur la mise en place de caractéristiques : 65kg, O,9, sécurité, fiabilité

En conclusion, nous proposons de reprendre les éléments essentiels de la relation entre espace d'innovation et continuité technologique.

a) Continuité-discontinuité et espace d'innovation

L'étude des dynamiques d'apprentissages révèle un phénomène essentiel: l'importance des frontières posées par les acteurs entre ce qu'ils considèrent comme connu, inconnu ou à élaborer. Ces frontières ne sont nullement figées: de nouvelles zones à explorer apparaissent dans le frottement corporel provoqué avec certains éléments représentant l'objet, certains aspects de l'objet technique passe du statut d'inconnu au statut de connu. Chaque objet technique est ainsi doté d'une cosmologie singulière qui lui procure sa forme.

α) Entreprise japonaise

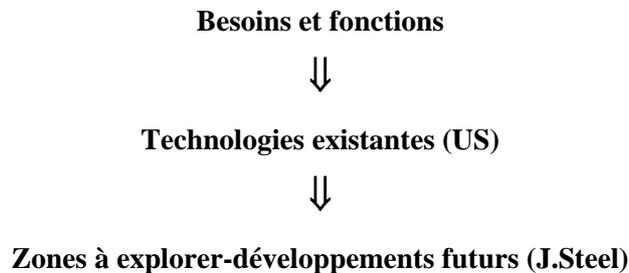
Le processus japonais a été caractérisé par un effort de construction de continuité technologique forte. Les termes du rapport rédigé par la section recherche haut fourneau du site de K. donne à voir le tracé d'une frontière entre continuité et discontinuité. On peut relever deux arguments démontrant cette orientation. Premièrement, l'objet technique a été inscrit dans une forte continuité par rapport aux compétences internes de l'entreprise. Cela s'est traduit notamment par le rapprochement systématique de l'injection de fuel et de l'injection de charbon. Cet effort de mise en relation a favorisé l'évolution des compétences internes au sein de la firme et le *passage du fuel au charbon*. Nous avons largement évoqué cet aspect précédemment. Deuxièmement, l'objet technique a été inscrit dans une forte continuité par rapport aux technologies existantes externe à l'entreprise. Le rapport rapprochait ainsi l'ensemble des expériences et des technologies existantes de façon à les mettre en perspective. Nous devrions dire ici, le rapport a mis les expériences passées dans sa perspective au sens où il les fait toutes converger vers la technologie en train de prendre forme. L'objet technique 'installation d'injection au hf japonais' a été pensé et présenté comme le fruit, le produit même des autres technologies d'injection de charbon, reléguées pour l'occasion au statut d'antécédents.

L'espace d'innovation s'est d'emblée situé à un niveau de validité assez large de l'espace technologique. En ce sens nous retrouvons ici la thèse Freemanienne du "Reverse Engineering". Mais celle-ci est trompeuse. Car l'objet technique en train de naître sous la plume des rédacteurs n'avait rien d'une copie. L'ensemble du processus démontre l'injection de connaissances internes à J. Steel autant que de connaissances transférées. L'organisation de l'espace d'innovation a reposé sur un effort colossal de prise de distance, de généralisation, de compréhension, d'englobement, et de dépassement des principaux efforts réalisés jusqu'alors. La continuité construite masque une discontinuité fondamentale: les acteurs de K. ont rangé les expériences selon une logique de l'avant et de l'après. Ils ont ouvert un espace d'innovation. Le rapport crée des liens entre des expériences que s'ignoraient jusque là et se désigne donc comme leur point de convergence analytique. Des expériences étrangères ⁽⁴³⁷⁾ ont certes commencé à explorer la piste des injections de charbon pulvérisé, mais de manière désordonnée, chaotique, presque incommensurable, "*avec des tailles de haut fourneau, sur des installations, sous des conditions de pression et de température du vent extrêmement variées*" ⁽⁴³⁸⁾, s'ignorant les unes les autres. Sous une apparente continuité technologique, le rapport introduit donc une frontière implicite à partir de l'ouverture de l'espace technologique au Japon. La frontière épouse

⁴³⁷ La distinction entre (Koku et Gaikaku) le Japon et l'Etranger traverse littéralement l'ensemble du rapport et constitue l'une des variables cosmologiques fondamentales.

⁴³⁸ Rapport acteurs de K.

la dynamique du processus d'innovation lui-même, chargé de déplacer celle-ci. Cette frontière est particulièrement lisible dans le tableau de synthèse proposé par les acteurs de K. organisé de la manière suivante:



Entreprise française

Par rapport au cas japonais, la continuité-discontinuité technologique a été construite selon un tout autre angle dans le cas de l'entreprise française. L'effort de localisation de l'innovation s'est accompagnée d'une localisation technologique forte. Cette logique est lisible à la fois dans le traitement des expériences passées et dans l'articulation organisationnelle interne-externe. Le caractère hybride, dépendant des conditions particulières de l'espace d'innovation s'est illustré par une logique fragmentée du caractère discontinu-continu de l'installation.

L'un des points marquants du processus d'innovation français a été la mise en place immédiate d'un processus de désapprentissage des connaissances internes. Les expériences pionnières menées en France dans les années 60 avaient en effet été à l'origine de la constitution d'un 'patrimoine' IrSID formé de rapports, de plans, de brevets et de compétences incorporées en la personne du chercheur ayant initié ces différents essais, C. Les acteurs du site de D. ont estimé qu'il était nécessaire d'écarter ces connaissances assimilées à un passé controversé "*Côté besoin technique, enjeu chez nous à Dunkerque, euh la première des choses ça a été de revoir un peu ses copies, oui c'est ça de prendre un peu ce qui se faisait et puis d'en tirer des conclusions. Alors les conclusions de Louvroil avec M. C. ..j'avais dit, et j'étais pas le seul, bon avec M. D., 'face à ce problème, on peut rien en tirer, on peut rien en tirer, le mieux c'est de l'oublier parce que ça ne pouvait pas marcher. Alors qu'est ce qui nous reste? Il nous reste à savoir comment ça marche dans les usines qui injectaient du charbon*" (439). C., au même titre que le patrimoine technologique qu'il représentait était extrêmement controversé à F. Steel. Un ingénieur se souvient du poids de certaines personnalités

au démarrage de l'Irsid *“Donc à l'époque (des premières injections) je dirais qu'il y avait des personnalités importantes... C., M., qui étaient à l'époque à l'Irsid, et que chacun voguait un petit peu...- c'était des polytechniciens - (ils) formaient chacun leur école et (ils) jouaient peut être un peu individuel, bon! -Comme on dit au rugby-.”* Nous avons déjà souligné que les acteurs de l'innovation ont accepté de consulter le chercheur pionnier des injections, pour mieux l'écarter *“on a demandé à C. et puis finalement, on fait ce qu'on a eu envie, hein”*.

A l'Irsid, néanmoins, l'approche a été sensiblement différente. Nous avons noté le rôle essentiel de l'Irsid dans la mise à disposition d'un modèle du haut fourneau et de modèles de calculs des taux d'équivalence du charbon, ayant permis aux acteurs de D. de considérer le fonctionnement interne du hf comme une boîte noire. De même, l'Irsid semble avoir estimé les limites d'injection du charbon à un taux de l'ordre de 120 kg, fixant ainsi l'horizon de progression possible des performances, lequel a également été intégré tel quel dans l'installation (30 t/ heure correspondent à environ 120 kg d'injection de charbon sur le hf 2). L'Irsid a donc joué un rôle essentiel dans le cadrage d'une certaine continuité technologique en fournissant les hypothèses essentielles des calculs de performance technico-économique. Le chercheur chargé de l'élaboration des ces modèles dans le cas du charbon se souvient que les premiers travaux ont été utilisés pour comprendre les modes de calcul du charbon, dont nous avons vu qu'ils ont ensuite été utilisés, sous forme de boîte noire par les acteurs de D.: *“Donc j'ai relu, ressorti du placard ces choses que je ne connaissait pas. C'était des rapports CECA et puis des notes qu'on a retrouvé dans les {rire}archives, sur des description technologiques de pilote d'installation qui avaient fonctionné à l'époque. Donc on a repris connaissance, , j'ai repris connaissance, et il y avait une personne qui devait être avec moi, de tous ces dossiers, pour comprendre comment ça se calculait, ce qui avait été conçu à l'époque et en refaire une lecture critique - qu'est ce qu'on pouvait en tirer d'applicable maintenant, maintenant étant 10-15 ans après.”*. L'un des savoir-faire de l'Irsid réside précisément dans cette capacité à offrir des modèles de calculs généraux applicables aux différents cas singuliers. *“Ca a du être encadré par toute un tas de calculs, comme l'Irsid sait faire, pour calculer les conséquences, les taux de remplacement, des calculs dans tous les sens, pour calculer le bilan d'énergie, l'influence sur le process... Donc on a apporté..l'éclairage technique complémentaire qui était nécessaire afin de chiffrer de façon économique l'injection de charbon. Ca donc, c'est le premier truc”*

Pour les chercheurs, le point essentiel était, ainsi que nous l'avons noté de 'faire progresser l'objectif charbon: *“L'Irsid avait dans ses cartons, du fait de ce qu'avait fait C., une technologie de répartition basée sur le système pneumatique, alors que là, les répartiteurs alvéolaires sont des systèmes mécaniques, euh, on a ...je sais plus pour quelle raison, il a été décidé de ne pas reprendre la partie exist..euh le savoir faire développé par C. n'a pas été repris, et donc on est parti sur le système*

⁴³⁹ Entretien, Direction département Fonte Dunkerque, Dunkerque, janvier 1996.

mécanique, on a copié disons le truc Arbed, plutôt que de...reprendre la technologie que l'irsid par la voie de C., avait expérimentée...Mais finalement, c'est pas décisif, par la suite on a vu se développer des systèmes mécaniques et pneumatiques..."

Vis à vis des expériences technologiques internationales - externes - la relation tissée par les acteurs de l'innovation a été marquée par le poids du processus d'innovation - la dynamique d'apprentissage / évaluation - et la logique d'investissement - caractérisée par une accumulation d'expertise. Nous avons largement évoqué la dynamique d'apprentissage dans ce qui précède. La dynamique de traduction s'est accompagnée d'une logique d'évaluation de l'offre et de la demande, des boîtes noires et des zones à explorer. Les acteurs de l'innovation de D. ont ainsi employé les services de CdF estimant plus satisfaisante leur connaissance du charbon "*nous on a pas l'habitude dans la sidérurgie etc, les Charbonnages de France ont plus l'habitude des charbons pulvérisés. On prend un engineering des Cdf pour construire l'atelier de préparation de charbon, dans lequel il y aura un broyeur horizontal FCB*"⁽⁴⁴⁰⁾. La logique d'investissement a également joué un rôle. Ainsi, nous avons évoqué précédemment le fait que les acteurs de l'innovation dans leurs visites n'ont pas pénétré loin dans l'exploration des conditions de production mises en œuvre, et se sont plus volontiers attachés à de grands principes de fonctionnement facilitant l'évaluation commune de plusieurs installations. Cette logique d'investissement a, par elle-même, générée une 'zone grise' obligeant les acteurs de D. à dépendre des mécanismes du marché pour la co-conception et la production de l'installation hf 2 de D.

Comme au Japon, néanmoins, l'expérience Armco a fortement influencée toute la partie broyage-sécurité de l'installation, considérée à la fois comme non maîtrisée en interne, et maîtrisée chez les fournisseurs potentiels. Les grands principes de l'atelier de broyage Armco ont été suivis: granulométrie fine (respect de qualité grain 80% inférieur ou égal à 74 microns); normes et dispositifs de sécurité par inertage; charbon à matière volatile faible pour démarrer les injections. Le fournisseur de broyeur était, comme au Japon, une entreprise licenciée par Babcock, le fournisseur de l'installation d'Ashland. A l'inverse, la 'philosophie de l'injection' a été élaborée, sur la base des essais réalisés par Würth -Arbed sous l'égide de la CECA, en rupture avec le 'patrimoine français' et avec le 'patrimoine Armco'.

Qu'est ce qu'on a pris ou (publication relectures etc) 'aspect information' montrer que le problème n'est pas seulement la disponibilité mais l'usage, l'utilité. Les acteurs mobilisent les éléments qui s'intègrent dans la dynamique et peuvent parfaitement décider soit de reprendre telle quelle ou de réélaborer, ou de rejeter un énoncé.

b) Savoir et Compétences accumulées

D'un point de vue formel, un regard rapide jeté aux deux investissements fait apparaître une forte similitude (investissements d'un montant très comparable, des retours sur investissements comparables une fois réglés les difficultés françaises de montée en cadence, des performances de même ordre (55 et 65 kg par tonne de fonte avec mise au mil totale autour de 470 kg), des investissements réalisés au début des années 80). Pourtant, cette analyse chiffrée masque un aspect fondamental. Après deux années de fonctionnement, les deux haut fourneaux fonctionnaient régulièrement et les nouvelles fonctions de production étaient en place, mais les savoir détenus sur ces fonctions de production étaient très contrastés.

Le hf 2 de Dunkerque fonctionnait parfaitement avec de hauts niveaux d'injection de charbon, mais comme nous le confiait en substance un ingénieur, ' sans que les acteurs de D. sachent vraiment pourquoi '. Les savoirs construits ont été étroitement dépendants de l'espace d'innovation et de sa dynamique: le chef de projet et ses proches collaborateurs ont acquis une expertise générale permettant l'évaluation d'injections de charbon performantes, et certains savoir-faire plus précis dédiés aux singularités du H.F. 2 et du cheminement suivi. Les savoir-faire d'utilisation ont également été élaborés progressivement et localement, par expérience et tâtonnement, et de façon très dépendante du H.F. 2.

A l'inverse, les acteurs japonais ont minutieusement élaboré des connaissances et des savoirs et savoir-faire de manière systématique. Les acteurs du PET, la section centrale d'ingénierie ont acquis les compétences et les algorithmes nécessaires à la production d'une installation d'injection de charbon de façon indépendante. Les études, recherches et instrumentations ont permis aux hauts fourneaux de J. Stemm d'intégrer l'injection de charbon dans la famille des injections au haut fourneau et par conséquent de partir de compétences et d'outils de gestion existants pour optimiser la nouvelle fonction de production. Les utilisateurs de leur côté, ont pu bénéficier d'une longue formation et d'une implication dans le processus d'innovation qui leur a permis de prendre rapidement en main le nouveau système technique et de rédiger un manuel d'opérateurs recueillant les principales techniques de conduites ainsi qu'une série d'expériences vécues et de conseils.

Si l'on s'en tenait à cette première installation, la maîtrise japonaise de la technologie et de ses conditions optimales d'utilisation paraîtrait très élevée. Les acteurs français, avec moins de moyens humains et organisationnels moindres et des bricolages locaux ont finalement réussi à atteindre des

⁴⁴⁰ Entretien, ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

performances similaires. Mais la valeur construite dans l'investissement japonais n'est pas strictement analysable financièrement sur le premier investissement. Il tient aussi à une capacité dynamique d'amélioration portant sur plusieurs investissements et de capacité de production et de commercialisation d'installations et de conseils sur l'injection de charbon. Incontestablement, en quelques mois, 'parti de zéro' J. Steel était devenu l'entreprise possédant les compétences les plus avancées en matière d'injection de charbon. Cette valeur ne peut se révéler que dans le processus de diffusion. Ce dernier seul révèle, sans que cela soit strictement prévisible, si les stratégies suivies sont payantes ou non.

Espace d'innovation et espace technologique

La question des frontières entre continuité et discontinuité est tout à fait cruciale dans la compréhension de la dynamique économique, et finalement de la richesse des nations. Sur ce point, la comparaison possède le mérite de mettre en évidence la singularité de chaque espace technologique, tel qu'il est construit et approprié dans les entreprises. Dans le cas de PCI, l'espace technologique construit autour de l'objet technique installé sur le hf 2 de D., en France, contraste fortement avec celui construit autour de l'objet technique installé sur le site de O. au Japon.

L'espace technologique n'est pas nécessairement mondial, 'objectif' (au sens développé par les auteurs du premier chapitre). L'existence d'une technologie ne constitue pas une condition suffisante pour que les acteurs l'intègrent obligatoirement dans leur raisonnement. Ainsi, Armco a représenté le seul fournisseur de technologie américain pour les français. Pour les japonais, Koppers, Petrocarbo, deux autres fournisseurs américains ont été ajoutés à la liste des fournisseurs américains. A l'inverse, l'espace technologique construit par les acteurs de D. comprenait des fournisseurs comme Würth, Delâtre ou Sprunk, tous européens et négligés dans l'analyse japonaise.

L'existence d'investissements préalables dans des réseaux technologiques (meeting technique, assistance technique, association etc) constitue une dimension 'objective' de construction de ces espaces, très souvent négligés (Lynn 1982, 1988) contribuant à la construction des espaces d'innovation: J.. Steel, a pu développer un accès privilégié aux sites chinois et à Armco du fait des relations techniques entretenues avec ces deux sociétés avant l'ouverture de l'espace d'innovation PCI; F. Steel a bénéficié de la réputation du chercheur pionnier C. dont les travaux étaient connus pour accéder aux sites d'Armco et de Donetz.

Reste qu'au-delà de ces facteurs objectifs, la construction des espaces d'innovations demeurent fortement contingents. Ils possèdent leur dynamique propre: Armco a représenté un point de passage obligé pour J. Steel: sans Armco et sa technologie, les acteurs de J. Steel ne se seraient sans doute pas lancés dans l'aventure. Pour les acteurs de D., pourtant, Armco n'a pas constitué un allié incontournable. Les acteurs dessinent activement les frontières de cet espace technologique en décidant de ce qui est connu, disponible, à élaborer ou inexistant. La dimension temporelle joue également un rôle: Würth n'avait pas organisé de mise à l'épreuve prolongée de sa technologie début 1980, lorsque J. Steel a pris la décision de transférer la technologie Armco. A l'inverse, la prise de décision de U. Steel est intervenue quelques semaines après cette mise à l'épreuve. La présentation d'un espace technologique objectif tend inévitablement à gommer ces singularités et à donner l'illusion d'une espace technologique commun à tout processus d'innovation.

Enfin, la construction des espaces d'innovations ressortit également de logiques stratégiques déterminant une logique d'investissement. Le cas japonais est à cet égard, très illustratif. Il indique l'intention japonaise d'appropriation de l'espace technologique mondial. Celle-ci s'oppose à une stratégie de localisation de l'investissement visant à externaliser le risque innovatif dans le cas français.

Espace d'innovation et espace industriels

L'espace technologique est étroitement articulé, mais non confondu, avec un espace industriel de référence. Pour déterminer ce qui est acquis ou non, faisable ou non, pertinent ou non, les sidérurgistes que nous avons rencontrés s'appuyaient très fréquemment sur des références 'industrielles'. Le site de D. a longtemps eu comme point de repère le site de Thyssen, en Allemagne "notre référence, ça a toujours été Thyssen à Schwelgern... parce qu'on a un frère jumeau là-bas, donc Thyssen" ⁽⁴⁴¹⁾. Des relations privilégiées ont été tissées entre les deux usines "*des frères jumeaux, je veux dire tout ce qu'on fait ici, on le fait en même temps là-bas, à peu près...*" (idem). De même, la construction d'une offre et d'une demande technologique a plus ou moins explicitement fait référence à un groupe d'utilisateurs. Nous avons évoqué l'importance de la référence à 'un haut fourneau japonais', aux haut fourneaux japonais dans la démarche suivie par les acteurs de l'innovation au Japon.

Dans le cas japonais, les cibles ont été 1) l'entreprise J. Steel et 2) l'espace industriel japonais. Ainsi, le hf de K., puis celui de O. ont formé les prototypes de l'élaboration d'une technologie adaptée à l'espace japonais "*Au départ, nous avions (bien) l'intention de revendre cette technologie Armco à*

⁴⁴¹ Entretien ingénieur section technique, site de D., janvier 1996.

d'autres entreprises japonaises" (⁴⁴²). L'hypothèse forte au fondement de ce raisonnement est la représentativité du hf 1 de O., ou ce qui revient au même, l'homogénéité de l'espace industriel japonais des hf. Cette proposition a une portée 'objective' et 'subjective'. Objective car en effet, si on le compare par exemple au parc américain ou français, le parc des hf japonais présente une forte homogénéité. Subjective parce que l'homogénéité postulée par les acteurs de l'innovation n'est pas strictement la même que celle que l'on peut mesurer. Les acteurs réfèrent également à un espace industriel social ou culturel, à une représentation de l'espace dont ils sont porteurs. On peut parfaitement comprendre (effet dit de prescription créatrice) que si cette représentation est 'partagée', elle donne vie, à travers la mise en œuvre d'une série d'innovation à un espace industriel national. De grands débats sont alors ouverts sur l'origine, la question de la poule et de l'œuf. Nous pensons que la question n'est pas là. Ce qui nous intéresse ici est le constat d'une forte co-construction des espaces et des acteurs qui interagissent dans les espaces d'innovation et tendent à donner vie à un espace économique national. Cela rejoint l'un des résultats majeur de l'analyse sociétale (Maurice et Al. 1991, Lanciano et Al. 1993) et des travaux menés sur les développements blocks (Carlsson 1995, Lundvall 1993). Cela rejoint également certains aspects des travaux menés sur les Réseaux Technico-Economiques (⁴⁴³).

Le cas de la France suggère un certain relativisme quant à l'ancrage 'national' des frontières de ces espaces. Nos interlocuteurs français ont eu tendance à mêler des références à un espace industriel national et européen, alors que les références de leurs collègues japonais étaient plus strictement nationales. Dans le cas de la sidérurgie, ce résultat est intéressant dans la mesure où la sidérurgie est l'industrie à avoir bénéficiée la première d'une vision européenne. Notons enfin que dans les espaces d'innovations étudiés, espaces technologiques et espaces industriels ne sont nullement alignés. Les acteurs de l'innovation japonais ont construit avec beaucoup de minutie un espace technologique international (particulièrement Etats Unis). Mais la cible essentielle de référence a été le marché japonais, et l'espace industriel construit s'est inscrit dans les frontières nationales et organisationnelles.

Le point essentiel nous paraît résider dans le repérage d'une correspondance entre l'espace industriel dont les acteurs de l'innovation sont porteurs et l'espace industriel plus objectivé que l'on peut effectivement observer. Nous allons voir que la généralisation est l'un des processus essentiels par lequel les représentations des acteurs de l'innovation influent sur la réalité à venir.

⁴⁴² Entretien ingénieur du PET, Futtsu, J. Steel, février 1996.

⁴⁴³ Il existe une forte correspondance entre ce que nous appelons espace technologique et ce que Callon et alii (1991) nomment le pôle ST intermédiaire entre Science et Technologie, et une forte correspondance entre ce que nous nommons espace industriel (en référence à l'analyse sociétale) et ce que l'analyse des RTE nomme le pôle TM.

Troisième Partie :
Au cœur des trajectoires technologiques (2): De la création à la diffusion, modalités de la généralisation

“L’ensemble social réel est un amas hétérogène et peu cohérent. Les équilibres globaux sont instables et changeants. Les éléments de stabilité et la continuité doivent recevoir des explications locales” **JD. Reynaud**
Les règles du jeu ⁽⁴⁴⁴⁾

Introduction

“Autour des artefacts s’expriment ‘deux caractéristiques propres à l’espèce humaine: son aptitude singulière à modifier l’environnement dans lequel elle vit à travers la création d’artefacts; l’aptitude correspondante à transmettre les

⁴⁴⁴ Reynaud JD. (1989) Les règles du jeu. L’action collective et la régulation sociale. Ed. Armand Colin. P 173.

modifications accumulées aux générations futures à travers des prescriptions et des procédures encodées dans le langage humain” **Donald Norman, Les artefacts cognitifs** ⁽⁴⁴⁵⁾

Une trajectoire technologique se compose d’une multitude de points, d’innovations hétérogènes dont les conditions de continuité et de discontinuité les uns avec les autres sont en partie fixés localement par les acteurs de l’innovation, dans le cours de la création technologique. Notre seconde partie a illustré la singularité irréductible de chaque processus d’innovation à partir de la présentation de deux processus individuels d’innovation s’inscrivant dans le cadre générique d’une même technologie, la technologie d’injection de charbon. L’ordre global, apparemment continu et homogène, est en fait constitué autour d’une multitude d’ordres locaux plus ou moins discontinus.

Si nous avons pu éclairer certains aspects de la création d’ordres locaux, cependant, nous n’avons pas, à ce stade éclairci les relations entre ces deux processus de création et la trajectoire technologique telle que nous avons pu la repérer au cours de la première partie. L’étape suivante, prise en charge par cette troisième partie consiste donc à retrouver le lien entre ces processus microéconomique d’innovation et la dynamique de l’ordre global, c’est à dire, ce que les économiste du changement technique ont nommé la *diffusion*, et que nous intitulerons la généralisation, c’est à dire, les conditions dans lesquels des apprentissages localisés dans un contexte innovatifs peuvent échapper à ce contexte et s’inscrire dans la dynamique globale d’un espace technologique.

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que la création technologique est nécessairement localisée, et s’exerce dans le cadre d’un espace d’innovation. Dès lors, comment expliquer l’utilisation de certaines innovations sur une échelle si large qu’elles semblent être devenues des standards incontournables? Comment comprendre l’utilisation de certains composants électroniques ou de certains matériaux dans une large gamme d’industries?

D’un point de vue économique, la création technologique n’acquiert ses effets vertueux que dans la mesure où elle innerve l’ensemble de la société et de l’économie. Une création qui ne se diffuse pas n’acquiert pas de valeur économique et ne contribue pas à la richesse des nations (Carlsson, Jacobsson, 1992 ⁴⁴⁶).

⁴⁴⁵ Norman, D. (1993) “Les artefacts cognitifs” in: Conein, B., Dodier, N. Thévenot, L. (eds) *Les objets dans l’action*. EHESS. Pp. 15-34.

⁴⁴⁶ On cite souvent Bill Gates, l’homme le plus riche du monde (valeur du patrimoine estimée à 13 milliards de dollars en 1995) et le cas de Microsoft (3 employés, un produit et 50 000 ff de CA env. en 1975; 17 800 employés, 200 produits et 30 000 000 000 env. de ff de CA en 1995). Cette valeur n’est pas attribuée au génie créatif de Bill Gates (les spécialistes estiment que d’autres logiciels sont plus performants) mais au fait que Microsoft “contrôle entre 80 et 85 % du segment le plus important du marché des logiciels d’ordinateurs personnels - le système d’exploitation” (Cusumano, Selby, (1995) *Microsoft secrets*, p. 4), touchant un marché estimé à 170 millions de personnes.

Par conséquent, le problème central qui va nous intéresser dans cette troisième et dernière partie va consister à comprendre comment les apprentissages locaux peuvent devenir des apprentissages généraux, globaux. Quelle relation existe-t-il entre l'innovation comme phénomène localisé et le développement technologique? Quels mécanismes et dispositifs intermédiaires lient les espaces d'innovation et les trajectoires technologiques?

Dans la ligne schumpétérienne, les travaux fondateurs de Mansfield et Griliches ont mis le doigt sur la centralité de cette question à l'articulation de la micro et de la macroéconomie. L'absence d'une théorie de l'innovation suffisamment élaborée a fortement limité la compréhension profonde des phénomènes en jeu (Freeman 1994).

Dans la seconde partie, nous avons posé les bases d'une théorie de l'innovation qui va nous permettre de combler ce vide. Il va donc être possible de revisiter la question essentielle des fondateurs de l'économie du changement technique à partir de ces nouveaux éléments.

A la recherche des mécanismes de généralisation

Rappelons la phrase de David: *“The kernel of the problem posed for private and public decision-making with regard to the setting of technology standards may be construed to be nothing more and nothing less than the fundamental issue with which all social organizations are confronted: where to position themselves on the terrain between the poles of ‘order’ and ‘freedom’”*. La première exploration du paradoxe de David nous a amené à concevoir une trajectoire technologique organisée autour d'une tension entre création et cumulativité. La standardisation y était conçue comme le mécanisme de sélection assurant l'approfondissement d'une voie technologique unique. Nous avons noté les limites de cette approche. En particulier, nous avons noté que cette vision des choses prenait pour acquise la question de la définition de l'ordre et du désordre. Cela nous a conduit à effectuer une seconde exploration, au coeur des mécanismes de production de la continuité -discontinuité et de l'innovation. Nous avons pu montrer que les acteurs mettent en place les frontières entre continuité et discontinuité au sein des espaces d'innovation. L'innovation peut ainsi être conçue comme la création d'un ordre local en rupture plus ou moins forte avec l'ordre existant. La standardisation peut dès lors être conçue comme un mécanisme de généralisation d'un ordre local à l'ensemble plus large de la société, du marché ou de la société.

La question de la généralisation fait partie des questions peu explorées en économie. Une expérience locale est censée donner le jour à deux formes de commodités: les biens et l'information. La commensurabilité des univers de circulation de ces commodités est postulée - le marché préexiste et est homogène - biens et information possèdent une généralité universelle ne posant pas de problème

de coordination et de transaction. Dans ce cadre ce qui est bon pour l'un est bon pour l'autre, quel que soit le contexte d'utilisation. Une innovation apparaissant en un point de l'économie se répand automatiquement dans l'ensemble de l'économie. A la limite, les agents rationnels sont amenés à effectuer tous le même choix. Cela fournit une explication du phénomène de standardisation. Mansfield a suivi cette ligne hypothétique en mettant en circulation un objet aux qualités universellement supérieures dans un milieu d'utilisateurs potentiels déjà constitué. Ces simplifications possèdent leurs avantages, et sont largement cohérentes avec l'hypothèse de rationalité universelle des agents. D'un autre côté la réflexion d'Akerlof (1970) sur les limites de la qualité universelle des biens montre fort judicieusement que l'information sur les conditions d'usage doit être construite et régulée par des institutions pour que la transaction puisse se dérouler dans des conditions satisfaisantes. L'étude des minorités et des frontières constituées entre les mondes sociaux oblige à reconnaître que les univers de circulation des biens ne sont là qu'après avoir été constitués, et qu'ils sont largement incommensurables. Doeringer et Piore ont ainsi fourni une démonstration de ce que le marché du travail est fondamentalement fragmenté, et que la qualité des personnes s'inscrit largement au sein d'espaces organisés différenciés leur donnant valeur et efficacité⁽⁴⁴⁷⁾.

Pour comprendre la manière dont un ordre local peut se généraliser, il est par conséquent nécessaire de réouvrir cet ensemble d'hypothèses fortes et instrumentales. Il est indispensable de se demander comment des univers de circulation des biens sont constitués et dans quelle mesure ils sont rendus commensurables. Il est tout aussi nécessaire de comprendre comment les connaissances et les objets techniques peuvent être transposés d'un contexte à un autre et gagner une certaine validité générale. En d'autres termes, la question de la généralisation correspond aux modalités de l'échange et de sa régulation.

Présentation du chapitre

La troisième partie se compose de trois chapitres, selon le principe des parties précédentes.

Un premier chapitre nous offrira l'occasion de situer la question de la généralisation et de ses enjeux dans le cadre des théories économiques existantes. Cela nous amènera à revisiter le modèle de diffusion de Mansfield (1968) beaucoup plus en détail, pour sa qualité canonique. Nous éclaircirons le jeu d'hypothèses posé par ce modèle. Une série d'avancées récentes, singulièrement en économie de la science et de la connaissance permettent d'envisager le dépassement de ce modèle de généralisation.

⁴⁴⁷ Doeringer, P, Piore, M. (1971) *Internal Markets and Manpower Analysis*. DC Heat & Co.

L'objet du second chapitre sera précisément de dresser un cadre conceptuel, une théorie de la généralisation permettant de penser à la fois la création et la diffusion technologique, et le rapport entretenu entre processus singulier d'innovation et dynamique des espaces technologiques, tels qu'ils ont été définis dans la première partie de cette thèse. En étendant le modèle d'Arthur, nous avancerons que l'adoption n'est pas dissociable de la constitution d'un monde commun, liant différents utilisateurs et producteurs de la technologie autour d'une théorie collective de l'objet technique, en relation à la constitution d'un dispositif institué d'accumulation collective de connaissance et de formation de compétence lié à l'exploitation de cette théorie.

Nous reviendrons alors sur le cas de l'injection de charbon au haut fourneau dans le chapitre 3. Nous remonterons suivant les deux processus singuliers de diffusion chez J et F. steel vers la dynamique de l'espace technologique et la formation d'une trajectoire technologique. Nous constaterons que les modalités de généralisation des apprentissages localisés ont suivi deux voies différentes dans le cas français et dans le cas japonais. Cependant, elles se sont télescopées, ont été mises en relation de concurrence et ont finalement œuvré à la constitution d'un monde commun aux injections de charbon, à tel point que les deux entreprises se sont aventurées dans une coopération sur ce thème à la fin des années 1990.

La compétition technologique travaille donc à différents niveaux. Elle ne peut se résumer aux caractéristiques objectives des objets techniques. Elle fait rage également dans la course la construction d'un monde commun affublé en particulier d'une perspective d'utilisation de la technologie, et d'une instrumentation destinée à en mesurer les performances. Le cas PCI offre une démonstration éclatante de l'importance de ce jeu, de la bataille à laquelle se livrent les acteurs dans la formation controversée d'une théorie collective de l'objet technique et l'inscription de la technologie dans une multitude de contextes variés qui la fait vivre.

Chapitre 1:
La généralité en question

“Indeed, any economic study which relates economic growth and development to technological change involves implicit or explicit assumptions about the way innovations, once originated in some points of the economic system, spread over the system itself” (Lissoni & Metcalfe, 1994)

IA Hypothèses du modèle classique de la diffusion

"Le mal dont souffrent les chefs-d'œuvre, c'est le respect excessif dont on les entoure" **Gabriel Fauré**, Œuvres Complètes pour Orgue de JS Bach.

Comme le souligne la citation de Lissoni et Metcalfe, toute théorie s'intéressant de près au lien entre développement économique et dynamique technologique forme inévitablement un modèle permettant d'expliquer comment une création technologique, une innovation nécessairement localisée, se répand au sein du système économique.

Le modèle de la 'diffusion- imitation' de Mansfield a délivré la première réponse théorique prenant pleinement en charge la question du passage de l'innovation à la technologie. La *diffusion* représente précisément le mécanisme par lequel un objet technique produit en un point de l'économie connaît une expansion et irrigue l'ensemble du système économique, à la condition que sa profitabilité soit supérieure à celle des autres objets techniques assumant une fonction identique. L'*imitation*, idée schumpeterienne, suggère qu'à partir du moment où un bien à profitabilité supérieure est introduit en un point de l'économie par un entrepreneur, celui-ci se trouve dans une situation de quasi-rente temporaire : il en tire bénéfice au fil de la diffusion de l'innovation. Dans une telle situation, classiquement, d'autres entrepreneurs sont bientôt attirés par le profit et tendent à imiter l'innovation, assurant ainsi les bases d'une fonction de production et d'une diffusion élargie, l'objet technique perdant du même coup progressivement son caractère innovatif, et l'innovateur sa quasi-rente, les profits tendant vers zéro à l'équilibre walrasien.

L'un des problèmes majeurs de ce cadre théorique tient au postulat formulé sur la généralisation : à partir du moment où un objet technique serait plus profitable, il se répandrait automatiquement et irrémédiablement au sein de l'économie, même si, ainsi qu'il a été noté dans la première partie, cette diffusion peut être plus ou moins rapide et évoluer selon un taux d'imitation plus ou moins élevé. La généralisation ne pose pas de problème dans ce cadre, elle n'est qu'une question de temps plus ou moins long, le temps de lever des incertitudes et de révéler aux différents acteurs la qualité intrinsèque de l'objet technique. Or la seconde partie de cette thèse nous a permis d'observer, dans un certain détail, les investissements consentis pour faire tenir un objet technique de façon stable dans un espace localisé, et pour créer un cadre susceptible d'en tirer partie économiquement. A quelles conditions l'innovation peut-elle sortir de ce contexte local favorable et trouver une efficacité dans d'autres contextes ? Dans les pages qui suivent, nous proposons de revenir sur les principales

hypothèses soutenant le modèle de Mansfield: nous en déduisons que la généralisation ne peut être considérée comme automatique que par une série d'approximations difficilement tenables et de conditions extrêmement restrictives. La question de la généralisation s'en trouvera nécessairement problématisée.

1) Modèle de diffusion-imitation : conditions d'une généralisation sans problème

“Because an innovation will not have its full economic impact until the imitation process is well under way, the rate of imitation is of considerable importance” (Mansfield 1961, p. 762)

Le modèle de la diffusion- imitation a été explicité par Mansfield (Mansfield 1961, 1968). On peut considérer ce modèle comme l'un des premiers efforts théoriques systématiques destinés à formuler une théorie de la généralisation : la dissémination dans le système économique global d'une innovation apparue en un point de l'économie. En effet, ce modèle est explicitement bâti sur une approche de la *diffusion*, le passage du micro au macro, la colonisation du marché par une innovation d'abord localisée. A travers ce modèle, Mansfield est l'un des premiers à avoir abordé la question de la formation d'un cadre collectif propice à la diffusion, mettant en lumière l'importance de la distribution de l'information et de sa circulation entre les adopteurs potentiels dans les anticipations des agents et la circulation de l'objet technique.

L'opérationnalisation de ce cadre théorique est passé, ainsi que nous l'avons noté dans la première partie de cette thèse, par un artifice consistant à partir du produit standardisé issue de la trajectoire technologique – la locomotive diesel dans sa forme finale la plus répandue post-diffusion – et du milieu d'adopteurs constitué après diffusion. L'un des intérêts de cette visée rétrospective tient à la mise en évidence de la constitution d'un marché, de la rencontre d'une offre et d'une demande technologique, à partir du moment où une innovation est créée et stabilisée en un point de l'économie. La théorie de la généralisation sous jacente repose sur une série d'hypothèses instrumentales. Celles-ci offrent la possibilité de repérer à quelles conditions extrêmement particulières, la généralisation devient automatique et linéaire et ne pose plus de question : les conditions de la 'diffusion pure et parfaite' sont fondées sur une économie à un bien et à un besoin mis en parfaite correspondance. En creux, cela nous amènera à repérer les éléments essentiels d'une théorie élargie de la généralisation.

1.1) diffusion d'un bien identique

L'une des hypothèses centrales du modèle mansfieldien tient, ainsi que nous l'avons remarqué, au fait que le bien diffusé demeure inchangé tout au long du processus de diffusion. La

crystallisation des caractéristiques du bien diffusé a été reprochée à Mansfield par ses successeurs. Elle est pourtant indispensable à l'équilibre de son modèle et à la représentativité des mesures fournies par ses modèles économétriques. Sans cette hypothèse que mesurer ? Comment définir les frontières entre objets techniques considérés comme identiques et ceux considérés comme différents ? Comment rendre compte du véritable foisonnement de caractéristiques d'un objet technique ? Comment choisir les caractéristiques pertinentes à l'analyse ?

Les caractéristiques du bien sont fixées. Elles se déclinent en attributs, eux-mêmes incorporés dans le bien dont on suppose qu'ils ont été acquis localement dans un espace d'innovation. L'attribut essentiel d'un objet technique en relation avec sa diffusion est, d'après Mansfield, sa *profitabilité*. La qualité essentielle d'un objet technique est donc le rapport coût- avantage tel qu'il est calculable au moment de la *décision d'acquisition*. Cette simplification permet à Mansfield de comparer les objets techniques entre eux, à partir d'un équivalent universel. Il lui est donc possible, dès lors de postuler que l'objet technique diffusé est intrinsèquement supérieur à tout autre objet technique remplissant une fonction identique. Ce jeu d'hypothèse permet à l'auteur d'évacuer la question de la compétition technologique. Cela rend les biens parfaitement substituables. L'auteur se trouve ainsi en mesure de postuler la correspondance parfaite des besoins des adopteurs et des caractéristiques du bien.

Le bien demeure identique et disponible tout au long du processus de diffusion. Les décisions prises par les agents sont des décisions d'acquisition d'un bien parfaitement identifié et stable sur le marché. En tout point du temps, le bien est offert à un prix identique, et avec des qualités identiques. Il n'est affecté ni par l'information et sa distribution, ni par son adoption. La production du bien et ses conditions sont donc réglées : il existe une fonction de production stabilisée produisant un bien standardisé. Le capital ne s'use pas, le capital humain demeure identique, et il n'existe ni apprentissage ni concurrence, ni transformation affectant l'offre : Il n'existe ni rendements d'échelle ni rendements croissants d'adoption.

Le bien est parfaitement compatible avec l'ensemble des systèmes techniques tout au long du processus de diffusion. En tout lieu de l'espace de diffusion, le bien fonctionne de la même manière, avec des performances identiques. L'utilisation du bien et ses conditions sont réglées. Tout se passe comme s'il existait une fonction d'utilité plus ou moins commune à l'ensemble des utilisateurs quelque soit le moment d'adoption et le lieu où ils se situent : il n'existe pas d'effet différencié lié aux interdépendances technologiques ou aux externalités de réseau, le bien peut être considéré comme indépendant.

Ce positionnement permet à l'auteur d'identifier une série d'objets techniques formant une famille technologique à un seul et unique modèle stable et de rendre ainsi équivalents les différents

contextes d'utilisation de ces objets. La dynamique de diffusion est dans ce cas, tout entière contenue dans la nature, dans les attributs du bien diffusé, indépendamment des contextes d'usage et de production du bien.

1.2) Une population connue d'adopteurs potentiels

Une seconde hypothèse centrale du modèle tient au caractère connu et délimité de la population d'adopteurs. Callon a mis le doigt sur les difficultés inhérentes à la délimitation de cette population (Callon 1992). Néanmoins, celle-ci est indissociable du caractère inchangé de l'objet technique dans un certain contexte de validité.

Mansfield boucle son modèle en consacrant son analyse exclusivement aux entreprises ayant adopté le bien, qu'il sélectionne *a-posteriori*. Les entreprises n'adoptant pas le bien défini, ou en adoptant un autre en substitution n'apparaissent donc dans l'analyse qu'autant qu'elles se convertissent in fine au standard étudié : modèle dit à saturation. Grâce à cette astuce, il est possible à l'auteur de faire préexister l'espace de circulation du bien, déjà constitué en début de période, à sa diffusion. L'espace de circulation du bien est homogène. Cet artifice permet à Mansfield de s'intéresser exclusivement à un milieu constitué autour du bien. L'objet est ainsi doté d'une généralité automatiquement universelle, permettant de tenir les conditions de disponibilité, de constance des attributs, d'homogénéité des conditions de production et d'utilisation du bien considéré et d'information révélée.

De plus, Mansfield (1961) s'intéresse exclusivement à la première décision d'acquisition prise, posant ainsi une hypothèse d'homogénéité du comportement d'adoption dans le temps et l'espace intra-firme (Mansfield 1963).

1.3) Une information progressivement révélée

La troisième hypothèse clé de l'analyse mansfieldienne repose sur le traitement réservé à l'information. Sur ce point l'auteur a été amené à s'éloigner sensiblement des théories classiques du marché. Pour expliquer le délai important observé dans la diffusion technologique, Mansfield a recouru à une argumentation évoquant l'incertitude particulière entourant les innovations. Relâchant l'hypothèse d'information parfaite, l'auteur estime que le délai d'adoption, dont les courbes en S forment la représentation, tient à une information imparfaite des agents. Ceux-ci construisent l'information, par "bouche à oreille", révélant ainsi les attributs objectifs du bien diffusé au fil de l'expérience accumulée. A ce titre, l'élément circulant est bien l'information, c'est à dire une connaissance formalisée, complète, objective et universellement accessible sur l'objet technique

permettant la formation d'anticipations, l'exercice d'un jugement et la prise de décision. La circulation de l'information entraîne la mise en circulation du bien dans la mesure où l'information et la décision possèdent une modalité unique à issue positive : la prise de connaissance de l'information révèle la supériorité de l'objet technique et entraîne la décision d'acquisition du bien sur le marché.

L'information révélée constitue l'élément moteur du modèle de Mansfield. La circulation de l'objet inchangé, dans le milieu homogène et figé est fonction de ce que les agents adopteurs savent de l'objet technique, de la frontière qu'ils posent entre connu et inconnu. Dans ce modèle, c'est en quelque sorte l'information qui fait circuler l'objet technique. L'information n'est, dans le cas de l'innovation, pas immédiatement disponible à tous les agents, par contraste avec le marché de concurrence pure et parfaite. Bien que nous n'ayons pas trouvé trace de cette hypothèse, cette asymétrie hypothétique est tout à fait compatible avec le caractère localisé des innovations émergentes. Pour que le déficit soit comblé et que le marché retrouve un équilibre, l'asymétrie doit être compensée, l'information construite ou plus exactement révélée. Ce modèle suggère que l'adoption d'un même bien par une multitude d'utilisateurs forme le fondement d'une expérience collective cumulative. Elle suppose la formation d'une base d'information permettant aux agents de reconnaître le caractère universel des attributs du bien. Lorsque cette base d'information est complète, le marché trouve un équilibre tout à fait équivalent à celui d'un marché classique.

L'utilisation faite par l'auteur de l'information vise à rendre compte de l'incertitude rencontrée par les firmes face à un nouveau produit, une innovation, dont les attributs, les caractéristiques et les performances sont mal ou inconnues des acteurs. Mansfield évoque l'existence d'un mécanisme de contagion de l'information par contact informel ('word of mouth'), permettant la réduction progressive de l'incertitude et du risque associé à l'adoption "*As more information and experience accumulate, it becomes less risky to begin using it. Competitive pressure mounts and 'bandwagons' effects occur*" (Mansfield 1961, p. 745). Chez Mansfield, deux mécanismes essentiels assurent le passage à une situation d'information parfaite : l'expérience acquise par les utilisateurs – 'learning by using' (Rosenberg 1982) – dans la mise en œuvre de l'objet technique et les interactions entre utilisateurs – 'learning by interacting' (Lundvall 1988) - contribuant à la fois à la circulation et à la mise en commune de l'information. Coombs et Alii précisent le modèle sous-jacent à ces hypothèses: "*In the case of diffusion of technological innovation, what diffuses is information about the innovation itself. Firms will have very little information, if any at all, about an innovation that has not been widely adopted and will, therefore, associate it with an high degree of risk. As more firms adopt the innovation, the information base available to potential adopters increases and the risk associated with the innovation decreases accordingly*" (⁴⁴⁸).

⁴⁴⁸ Coombs, R., Saviotti, P., Walsh, V. (1987) Economics and Technological Change. McMillan, cité par Lissoni & Metcalfe (1994).

En conclusion, retenons deux points principaux. Premièrement, Mansfield pose l'hypothèse d'une dichotomie entre économie de l'information et économie matérielle. L'apprentissage ne concerne que la mise en commun d'une information intervenant uniquement dans la formation des anticipations des agents et dans les décisions d'investissement, à l'exclusion des conditions de production et d'utilisation de l'objet technique.

Deuxièmement, Mansfield nous livre une série d'éléments de réflexion sur les conditions d'une 'diffusion pure et parfaite'. L'auteur définit la situation improbable dans laquelle la généralisation automatique d'une innovation formée en un point de l'économie coloniserait celle-ci, aboutissant à la formation d'un marché de concurrence pure et parfaite. Retenons quatre éléments principaux :

- l'information non disponible localement doit faire l'objet d'une accumulation et d'une distribution pour devenir parfaite,

- l'objet technique est un bien inchangé dont les caractéristiques sont fixées et supérieures, et dont la disponibilité et la compatibilité sont parfaites ;

- la population d'adopteurs est connue et délimitée avant même la mise en place de la diffusion, elle forme un espace de diffusion préexistant et homogène.

- il existe une dichotomie entre information et économie matérielle, l'information et sa circulation n'affectant exclusivement que les décisions d'investissement.

2) Modèle de diffusion- imitation : vers un clarification des fondements de l'imitation

Le concept d'imitation a été avancé par Schumpeter (Schumpeter 1937) pour désigner le mécanisme par lequel, lorsque qu'une innovation profitable voit le jour en un point de l'économie, le profit réalisé par l'entrepreneur- innovateur l'ayant mise au point et commercialisée attire la convoitise d'entrepreneurs- imitateurs, dont la stratégie consiste à reproduire l'innovation de façon à bénéficier des mêmes avantages. Les deux catégories d'entrepreneurs, à travers la recherche de leurs intérêts individuels, assurent les bases d'une fonction de production élargie, et facilitent une diffusion globale de l'innovation correspondante. Au fil de leur recrutement, les marges s'amenuisent jusqu'au retour à l'équilibre, point où les profits s'annulent, l'économie entrant dès lors dans une logique de reproduction.

Dans ce modèle, le concept d'imitation, désignant l'ajustement progressif des fonctions de production de différents entrepreneurs attirés par le dégagement d'une quasi-rente de l'innovateur,

cerne le mécanisme de généralisation par l'intermédiaire duquel une création localisée se répand dans le système économique, générant croissance et richesse.

2.1) Objet de l'imitation et nature de l'information

Dans son travail désormais célèbre sur la R/D, Arrow (1962) a proposé de considérer l'invention essentiellement comme une activité de production de connaissance - "*as the production of knowledge*". Selon cette perspective, un design peut être assimilé à une *information* (⁴⁴⁹), c'est à dire une *commodité* (un bien) reproductible pratiquement sans coût, indivisible, et dont la particularité est de n'être appropriable qu'imparfaitement et à l'aide d'une réglementation adaptée - "*no amount of legal protection can make a thoroughly appropriable commodity of something so intangible as information*" (Arrow 1962, p. 616).

La thèse d'Arrow invite à préciser la nature de l'information. L'information n'est pas un bien comme les autres. Romer est l'auteur d'une réflexion sur la question, l'ayant amené à classer les idées dans la catégorie des biens 'quasi- publics' (⁴⁵⁰). Cette appellation propose de rendre compte des caractéristiques spécifiques de l'appropriation des idées: les idées ne sont pas de stricts biens publics - "*many ideas are controlled by private individuals who respond to market incentives*" - pas plus d'ailleurs que de purs biens privés - "*This misses the notion, correctly suggested by public good analogy, that an idea can be used by many people at the same time*" (Romer, 1993, p. 64).

Deux attributs permettent de classer les biens en fonction de deux propriétés principales liées à leur usage et à leur nature: la *rivalité* -le bien ne peut être utilisé que par une personne à la fois- et l'*exclusivité* -propriété d'être approprié par une personne privée- (Romer 1990). Un bien est rival s'il est lié "*de façon inhérente à un objet physique*", si sa consommation est irréversible (⁴⁵¹). Plus un bien non rival est utilisé, plus sa valeur augmente "*nonrival goods have the unique feature that their value depends on the size of the market in which they can be used*" (Romer 1993, p. 74).

A ce titre, selon Romer, les idées possèdent l'intérêt d'être non-rivales, puisqu'une même idée peut être utilisée par plusieurs agents simultanément sans perte de valeur. La valeur des idées tend même, dans certains cas, à s'accroître avec leur diffusion. Elles sont, de plus, imparfaitement

⁴⁴⁹ L'innovation est considéré "*as a process for the production of information*" (Arrow 1962 p. 610).

⁴⁵⁰ Les biens quasi-publics bénéficient d'une croissance illimitée contrairement aux compétences "*When this person dies, the skills are lost, but not a nonrival good that this person produces - a scientific law; a principle of mechanical, electrical or chemical engineering; a mathematical result; software; a patent; a mechanical drawing; or a blueprint - lives on after the person is gone*" (Romer 1990 S75)

⁴⁵¹ Romer, P. (1990) "Endogeneous Technological Change" in: Journal of political Economy, Vol 98, n°5, S71-102. David critique l'attribution de cette propriété de non rivalité à l'information'. L'auteur avance que l'information peut être rivale (une personne peut se l'approprier) et propose de remplacer ce terme par 'infiniment extensible'. David suggère que la non exclusivité caractéristique des biens publics purs n'est pas attribuable à l'information (Dasgupta et David, 1994, p. 493).

appropriables. Prenons l'exemple d'un design. La plupart des designs sont produits par des firmes privées. Pourtant "*once the design is created, it can be used as often as desired, in as many productive activities as desired*" (Romer 1990 S74). Un point tout à fait essentiel est donc que les idées peuvent être utilisées, échangées, transférées en partie indépendamment de leurs créateurs (ou créatrices). Elles sont aisément transportables dans le temps et l'espace: leur utilisation et réutilisation n'est pas coûteuse. Cela incite Romer à classer les idées dans la catégorie des biens publics.

La production d'information peut requérir d'importants investissements, mais à l'inverse, sa reproduction et son utilisation sont pratiquement gratuites ('bien libre'). Ces hypothèses clarifient certains mécanismes de la dynamique d'imitation au cœur du modèle de Schumpeter.

Du point de vue de sa diffusion, en effet, l'information présente la particularité de pouvoir être reproduite et appropriée pratiquement sans frais. Par conséquent, elle peut être transférée aisément d'un contexte à l'autre et se généraliser.

Signalons que selon la thèse de Arrow, les propriétés qui rendent les idées intéressantes du point de vue de leur utilisation économique sont également celles qui en limitent le développement du point de vue de leur production. L'un des problèmes soulevés par le caractère de bien quasi-public des idées réside dans ce qu'il est convenu d'appeler les comportements de "*free-riding*" ('passagers clandestins'). Si les résultats des efforts de recherche et développement ne sont qu'imparfaitement appropriables, il existe un danger d'opportunisme: "*D'après ce modèle, il est toujours possible pour les firmes qui ne contribuent pas directement aux efforts de R&D d'avoir accès aux connaissances nouvelles générées et d'utiliser leur potentiel d'innovation économique, avec un coût d'information ou d'imitation relativement faible. Inversement, les véritables innovateurs ne peuvent pas échapper (complètement) au partage des profits avec d'autres firmes. Les fruits de la R&D sont considérés comme aisément (à coût réduit) diffusables et cela implique que les activités innovantes sont pratiquées à un niveau plus faible que celui qui serait socialement désirable*" (⁴⁵²). Ce mécanisme de transfert 'libre' des idées est décrit sous le terme générique de '*spillovers*'. A un niveau national, un débat a vu le jour à la fin des années 1980 à propos de la stratégie - considérée comme opportuniste - de la nation japonaise vis à vis de la recherche de base aux Etats Unis (⁴⁵³). L'appropriabilité imparfaite des produits de l'activité inventive conduirait selon ces thèses à une sous- optimalité structurelle des investissements dans la production des idées par déficience des mécanismes incitatifs.

⁴⁵² Cohendet, P., Heraud, JA, Zuscovitch, E. (1992) "Apprentissages technologiques, réseaux économiques et appropriabilité des innovations" in: Foray et Freeman (eds) *Technologie et richesse des nations*. op cit.

⁴⁵³ On trouve trace de ce débat dans AER, N. Rosenberg and E. Steinmuller (1988) "Why are Americans Such Poor Imitators" in: the *American Economic Review*, May 1988; E. Mansfield (1988) "Industrial R and D in Japan and the United States: a Comparative study", in: *American Economic Review*, May 1988, pp223-229. Jolivet (1996) pour un commentaire.

Cette défaillance du marché (Arrow 1962, Nelson 1959) invite donc et justifie la création de dispositifs institutionnels supplétifs favorisant la protection des investisseurs.

2.2) Questions relatives à l'exercice de l'imitation

Les mécanismes par lesquels une entreprise imite une autre entreprise demeurent relativement flous. La littérature désigne fréquemment ceux-ci sous les termes de *spillovers* ou d'imitation, sans que les fondements de ces phénomènes ait été véritablement clarifiés.

Lorsqu'une entreprise innovante met au point un nouveau produit ou un nouveau procédé, il serait peu rationnel qu'elle livre ses secrets à ses concurrents. Le problème de l'*appropriabilité* – c'est à dire des mécanismes par lesquels une entreprise peut protéger une innovation - a donc donné le jour à une série de réflexions approfondies et de débats. Certaines recherches se sont orientées vers l'analyse des pratiques d'appropriation utilisées par les entreprises. Des enquêtes menées auprès des entreprises montrent ainsi la diversité des moyens utilisés par celles-ci pour protéger leur capital d'idées et contrarier leur caractère de bien quasi-public⁽⁴⁵⁴⁾. Parmi les dispositifs qui semblent les plus discutés dans la littérature économique figurent 'le secret', le 'brevet', et le 'first mover advantage' : les deux premiers visent à décourager l'imitation ou à en contrôler l'étendue, le troisième vise à tirer un avantage concurrentiel de l'innovation en occupant une position dominante sur le marché liée à l'exploitation de la courbe d'apprentissage. D'autres auteurs, comme Rosenberg (1990) et Teece (1986) tendent à nuancer la validité de ces études. Ils rappellent, chacun à leur façon, que l'intégration des idées dans les produits et les procédés, leur incorporation dans des capitaux, dans des savoir-faire en partie tacites restent néanmoins l'une des voies essentielles pour en approprier les bénéfices et limiter les possibilités d'imitation⁽⁴⁵⁵⁾. Cette position présente l'avantage de mettre en relation appropriabilité et structure industrielle : Teece soutient ainsi que l'intégration verticale ('complementary assets' Teece 1986) est l'un des mécanismes essentiels de l'appropriation. .

Il nous semble utile de distinguer différentes situations. Il est possible d'envisager logiquement deux principales modalités non exclusives d'exercice de l'imitation : l'imitation du produit, de l'objet technique innovant et l'imitation de la fonction de production de l'entreprise innovante.

⁴⁵⁴ Levin, R., Klevorick, K., R., Nelson, R., Winter, S. (1987) "Appropriating the Returns from Industrial Research and Development" in: *Brooking Papers on Economic Activity: Microeconomics*, Vol 3, pp. 783-820. Cohen, W, Nelson, R., Walsh, J. (1996) "A First Look at the Results of the 1994 Carnegie Mellon Survey of Industrial R&D in the United States" presented at: International Workshop on Appropriability and Technological Opportunity in a Global Economy, NISTEP, Tokyo, February 1996.

⁴⁵⁵ Rosenberg, N. (1990) "Why do firms do basic research (with their own money)?" in: *Research Policy*, Vol . 19, pp. 165-174; Teece, D. (1986) "Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy" in: *Research Policy*, Vol 15, pp. 285-305. David, P., Mowery, D., Steinmuller, W. (1994) "Analyzing the

Dans le cas où les imitateurs s'intéressent prioritairement au produit, à l'objet technique, il est possible de distinguer deux cas : celui des innovations de produit et celui des innovations procédés.

Dans le premier cas, l'innovation est un bien disponible sur le marché. L'imitateur peut donc aisément se procurer un objet technique à imiter. L'imitation met alors en scène des compétences internes de la part de l'imitateur, pour créer une fonction de production lui permettant de produire un bien identique de manière compétitive. La fonction de production de l'entreprise imitatrice peut fort bien être différente de celle de l'entreprise innovante.

Dans le second cas, l'innovation est un procédé auquel il est possible d'accéder sur le marché. L'accès à un outil de production semble néanmoins plus propice à l'exercice d'un contrôle de la part de l'entreprise innovante. On peut penser dans ce cas, que si l'entreprise imitatrice n'est pas directement utilisatrice de ce procédé, ou est connue comme une concurrente, l'entreprise innovante peut fort bien exercer un contrôle sur la circulation de son procédé et refuser la vente. Dans ce cas, le secret et le contrôle peuvent se révéler être des outils de protection de l'innovateur. Si l'entreprise imitatrice réussit à acquérir le bien sur le marché, l'imitation nécessite la mise en œuvre de compétences de la part de l'imitateur, pour créer une fonction de production lui permettant de produire l'innovation de procédé de façon économique.

Dans les deux cas – innovation de produit et de procédé – les propositions de Schumpeter peuvent être rapprochées des démarches de 'reverse engineering', dans lesquelles une firme reconstruit une fonction de production à partir de l'analyse et du démontage d'un bien profitable acheté sur le marché.

Dans le cas où les imitateurs s'intéressent directement à la fonction de production, la question de l'accès à l'information devient encore plus épineuse, en dehors même des considérations de compétences. L'une des fonctions de la veille technologique et sans doute plus marginalement de l'espionnage industriel consiste précisément à compenser les difficultés inhérentes à l'accès à l'information par une activité dédiée à cette fin.

Cohendet et Alii (1992) soulignent l'existence d'une troisième modalité d'existence des 'spillovers', valable à la fois dans le cas de produit et de procédé, la 'mobilité des acteurs qualifiés'. La

Economic Payoffs from Basic Research" in: Mowery, D. (1994) *Science and Technology Policy in Interdependent Economies*. Kluwer. pp. 57-78.

mobilité des salariés ‘qualifiés’ sur les marchés internes et externes du travail nous semble de nature à poser des questions aussi épineuses que celle de l’imitation d’un objet technique.

2.3) Adopteurs imitateurs et modalités de mobilisation des choses.

L’une des astuces de la thèse mansfieldienne par rapport à l’œuvre de Schumpeter tient au glissement sémantique consenti sur le concept d’imitation. Mansfield, se référant explicitement à Schumpeter, a placé le concept schumpétérien d’imitation au centre de son modèle. Néanmoins, l’auteur a fait évoluer radicalement ce concept, en l’utilisant à propos d’une dynamique d’adoption. En effet, dans le cadre mansfieldien, ce ne sont plus les entrepreneurs, comme dans la théorie schumpétérienne, qui, attirés par le gain, imitent la fonction de production de l’innovateur, mais les adopteurs, dont les décisions d’investissement deviennent interdépendantes.

Le glissement sémantique nous fait donc passer d’une imitation fondée sur un ajustement de type ‘reverse engineering’, fondé sur le succès d’un objet technique sur le marché, à une imitation basée sur la révélation d’une information faisant progressivement converger les décisions des utilisateurs d’un objet technique standard.

Or, ainsi que l’ont souligné fort justement Kogut et Zander (1992), une différence fondamentale doit être faite entre ce qu’une entreprise doit savoir pour produire une innovation, et ce qu’elle ou une autre doit savoir pour utiliser cette innovation. Les auteurs illustrent leur idée en prenant l’exemple des logiciels qui assument précisément cette fonction : “*Being taught the functional skills of how to do something is different than being taught how to create it*” (Kogut & Zander, 1992, p. 391). Cette distinction essentielle rejoint la distinction que nous avons proposée entre conditions de production et conditions d’utilisation de l’innovation. Il n’est pas besoin de connaître le fonctionnement détaillé d’un ordinateur (‘substantive technology’) pour rédiger un texte sous word. Il suffit de connaître le manuel d’utilisation du programme.

Il en découle que Mansfield se situe dans la perspective d’une imitation se déroulant dans des conditions extrêmement spécifiques : les conditions de production y sont fixées, l’innovation est devenue une boîte noire disponible sur le marché, et l’information dont parle Mansfield concerne essentiellement la prise de décision d’acquisition d’un bien. Dans ce cas limite, l’imitation ne pose pas de problème puisque la simple observation des comportements d’adoption des autres agents fournit déjà une indication pertinente propre à alimenter les anticipations.

En conclusion de ce paragraphe, nous proposons de nous démarquer des positions de Mansfield sur deux points, de manière à aborder la question de la généralisation.

Premièrement, il nous semble indispensable de prendre en considération des situations de diffusion variées. Mansfield se situe dans une perspective extrêmement singulière, à un point limite, y compris du point de vue de la théorie schumpétérienne. L'un des intérêts de son travail consiste précisément à nous indiquer que pour pouvoir négliger la question de la généralisation, en considérant celle-ci comme automatique, il est nécessaire de poser un jeu d'hypothèses fortes et nombreuses, et de réduire la validité du modèle à quelques cas si particuliers que l'on peut difficilement parler d'innovation à leur propos, plus rien ne les distinguant de situations d'investissement ou de consommation tout à fait classiques. Il en résulte que l'imitation ne peut pas être considérée comme le seul et unique mécanisme de généralisation : la généralisation constitue une dynamique innovative particulièrement dans les cas où l'adopteur est une firme.

Deuxièmement nous avançons que la généralisation ne peut pas se ramener exclusivement à la reproduction d'une innovation supérieure, même si ce phénomène est l'une de ses modalités extrêmes, mais procède d'une dynamique technologique dans laquelle différentes innovations entrent en concurrence, s'hybrident, fusionnent, s'associent ou se dissocient pour former un espace technologique. Le processus de généralisation doit donc intégrer en un seul mouvement création et diffusion technologique d'une part, et rendre compte de la multidimensionalité de l'espace technologique. En ce sens, nous proposons de considérer la généralisation comme un processus d'apprentissage collectif et innovatif : à tout moment, de nouvelles innovations peuvent voir le jour en différents points de l'économie.

IB Technologie et apprentissages généralisés: les limites du modèle de diffusion

“When basic research in industry is isolated from the rest of the firm, wether organizationally or geographically, it is likely to become sterile and unproductive.” (Rosenberg, 1990, p. 170)

La validité extrêmement limitée du modèle proposé par Mansfield, fondée sur l’analyse d’un marché monopolistique pré-construit à un seul bien, invite à relâcher les hypothèses sur lesquelles il repose. Dans la suite, nous allons reprendre une à une les principales hypothèses au fondement du modèle mansfieldien, en indiquant leurs limites et les voies de leur dépassement à partir d’avancées récentes de l’économie du changement technique et de l’innovation.

1) De l’innovation au bien inchangé

La première question essentielle posée par le modèle de Mansfield concerne le statut des biens, le passage de l’innovation localisée au bien inchangé par le processus de diffusion. L’innovation, dans son cadre local, produit certes un objet technique relativement identifié. Le processus de sa création est néanmoins tout entier marqué par une forte instabilité et une incertitude élevée relative à ses caractéristiques et à ses attributs. L’un des objectifs essentiels de l’activité innovative consiste à stabiliser ces caractéristiques, à faire tenir ensemble les différents éléments composants un objet technique évoluant au fil du processus. Un second objectif tout aussi central vise à obtenir et à créer les conditions d’une performance technique et économique de cet assemblage. Le caractère localisé de l’investissement, la spécification progressive des ressources dans le fil de l’action sont employés à la production routinisée d’un certain output. La définition des caractéristiques de l’objet technique autant que l’obtention d’une certaine efficacité productive semblent donc étroitement dépendant de la mise en correspondance d’un objet technique et d’un contexte local. Quels sont donc les mécanismes par lesquels l’objet technique, extrait de son contexte local, irait trouver une efficacité dans une multitude de contextes différents ?

Cette position, consistant à ne sélectionner qu’un bien représentatif d’une technologie donnée, tend à simplifier à outrance certains phénomènes essentiels de la dynamique technologique. Même dans des cas exceptionnels, comme ceux de la Ford T ou du DC-3, l’objet technique et son contexte de production ont largement évolué dans le temps, sous la même appellation (Abernathy 1978, Sahal 1985). Premièrement, elle tend à suggérer qu’il existe une correspondance stricte entre une technologie et un bien diffusé standard. Cette position gomme l’existence d’une multitude d’objets techniques formant une famille technologique comme celle des injections de charbon au haut fourneau. Deuxièmement, en ne s’intéressant qu’au bien standard, elle ignore l’existence d’une multitude de créations technologiques localisées dont la diffusion demeure plus ou moins restreinte. Dans les termes d’Arthur, cette posture ignore la dimension compétitive de la dynamique technologique. Troisièmement, en repoussant hors du modèle le phénomène de création technologique localisé, elle

tend à linéariser le processus de généralisation et laisse de côté la dynamique créatrice de l'économie, laquelle génère en permanence de nouvelles créations, de nouvelles innovations.

Le concept de technologie vivante avancé par Zuscovitch et Willinger invite à nuancer radicalement l'hypothèse mansfieldienne. Les caractéristiques du bien ne sont standardisées que lorsque des conditions particulières sont réunies. Cela ne doit pas faire oublier le caractère bouillonnant, créatif, constellé par l'émergence d'une multitude d'objets techniques plus ou moins distincts (Arthur 1988) caractéristiques de bien des processus de diffusion. Les processus de diffusion sont généralement marqués par l'apparition d'une multitude d'innovations localisées (Arthur 1988, Cowan 1991, Lynn 1982). La technologie, ainsi que le soulignent Zuscovitch et Willinger (1993) évolue à travers la mise au point progressive d'objets techniques, dont les caractéristiques peuvent évoluer dans le temps. Un objet technique, comme un ordinateur (Steinmuller 1996) est composé d'une multitude d'éléments, dont chacun peut être assimilé à un réseau spécifique. Chaque élément est susceptible de rester stable ou de connaître des évolutions selon une dynamique particulière.

Marcie Tyre est l'auteur d'une analyse comparative dans laquelle il étudie l'introduction de nouveaux procédés au sein d'entreprises allemandes, italiennes et américaines (Tyre 1991 ⁴⁵⁶). Tyre montre que la performance atteinte dépend en bonne part des efforts développés pour adapter le nouvel objet technique et son contexte productif local: ce que Eyraud et Alii ont nommé l'*appropriation* technologique (Eyraud et Alii 1989). Plusieurs auteurs ont montré que l'objet technique voit certaines de ses caractéristiques évoluer en fonction des contextes dans lesquels il se diffuse (Bijker et Pinch 1987, Lynn 1982), singulièrement dans les premiers temps de son utilisation (Leonard-Barton 1988 ⁴⁵⁷).

Dans son étude, Tyre indique que les entreprises américaines ont obtenu, d'après ses calculs, de plus mauvaises performances que leurs concurrentes européennes, en matière d'appropriation technologique. L'auteur estime que ces différences tiennent aux modalités d'organisation des prises de décision d'une part, et d'autre part, à la construction des acteurs et de leurs relations, en particulier dans le lien établi entre fonction ingénierie et ingénieurs de production, lequel conditionne l'apprentissage par l'usage (Von Hippel et Tyre 1995 ⁴⁵⁸). Comme le souligne Hard (Hard 1994 ⁴⁵⁹) les ingénieurs passent une bonne partie de leur temps à bricoler, à faire en sorte que les 'choses fonctionnent' ('make it work') et que les produits désirés soient réalisés, c'est à dire à mettre en place

⁴⁵⁶ Tyre, M. (1991) "the introduction of new process technology : International differences in a multi-plant network" in : Research Policy, Vol 20, pp. 57-76.

⁴⁵⁷ Leonard-Barton D. (1988) " Implementation as Mutual Adaptation of Technology and Organization " in : Research Policy, Vol 17, pp. 251-265.

⁴⁵⁸ Von Hippel, E. et Tyre, M. (1995) "How learning by doing is done : problem identification in novel process equipment" in : Research Policy, Vol 24, pp. 1-12.

des ajustements locaux entre objet technique et contexte productif plutôt qu'à des considérations théoriques sur les idées.

Il résulte de ce qui précède, que les caractéristiques de l'objet technique diffusé, fut-il élevé ex-post au rang de standard, peuvent difficilement être considérées comme fixées dans le processus de diffusion. Son adaptation à différents contextes nécessite souvent, outre la transformation de ces contextes, l'adaptation de certaines de ses caractéristiques, sous peine de n'être pas approprié par les utilisateurs (Akrich 1987, Akrich et Alii 1988). Mansfield décrit donc une situation tout à fait exceptionnelle, voir idéale.

Pour introduire plus de réalisme et pouvoir penser la diversité importante de situation de diffusion, il nous semble utile de relâcher cette première hypothèse mansfieldienne, et d'accepter l'idée que certaines caractéristiques d'un design peuvent rester fixes alors que d'autres peuvent être plus variables. L'un des arbitrages essentiels mis en œuvre dans la conception d'un design tient au statut des caractéristiques : certaines sont fixées irrémédiablement, d'autres sont laissées flexibles et variables. Il s'agit donc de repérer les conditions dans lesquelles certaines caractéristiques de l'objet technique demeurent stables alors que d'autres sont nécessairement flexibles.

2) D'une population fluctuante d'utilisateurs à une population limitée d'adopteurs

La seconde hypothèse centrale du modèle de Mansfield concerne le caractère a-priori limité et connu de la population d'adopteurs de l'objet technique. Si comme le suggère les réflexions précédentes, l'étendue de la diffusion d'un objet technique dépend en bonne partie de ses caractéristiques, et de l'appropriation qui en est faite au sein de différents contextes, deux aspects de la diffusion doivent être soulignés. Premièrement, la diffusion procède inévitablement d'une logique processuelle, et à ce titre, les populations d'utilisateurs de l'objet technique ne peuvent être connues et limitées que progressivement au fil du déroulement de l'action. Bijker et Pinch offrent une illustration remarquable de ce point dans leur étude de la diffusion de la bicyclette (Bijker et Pinch 1987). Les auteurs montrent l'étroite correspondance ayant existé entre différenciation technologique – i.e. caractéristiques des objets techniques – et des groupes d'utilisateurs aux identités diversifiées. Deuxièmement, ni l'objet technique diffusé, ni les contextes de diffusion ne peuvent véritablement être considérés comme homogènes a-priori (Callon 1992). Il nous semble à ce titre, plus pertinent de considérer la diffusion, non pas comme un mécanisme global au sens strict, mais comme la diffusion d'une multitude d'objets techniques apparentés et substituables – proches de part les caractéristiques qu'ils possèdent en commun – à une multitude d'espaces locaux. C'est en ce sens que nous

⁴⁵⁹ Hard, M. (1994) "Technology as Practice : Local and Global Closure Processes in Diesel-Engine Design" in : Social Studies of Science, Vol. 24, pp. 549-585.

comprenons les efforts consentis pour structurer une base, un univers commun, soit par la standardisation – black boxing – de certains éléments de l’objet technique, soit par la mise en commun d’une théorie d’une technologie – au sens ici de théorie de l’objet technique.

De l’usage au multi-usage

L’usage et ses conditions forment un élément essentiel de la qualité d’un objet technique. En ce sens, comme l’ont proposé les tenants du modèle probit de diffusion technologique, la profitabilité d’un objet technique est variable en fonction des contextes dans lesquels il est inscrit. Si l’on ajoute à cette première réflexion l’idée selon laquelle l’innovation doit échapper à ses créateurs et être adaptée pour être adoptée (Latour 1989), on est amené à concevoir le passage de l’usage localisé, fait dans le cadre de l’espace d’innovation au multi-usage de l’objet technique, au sein de contextes locaux diversifiés. Cela pose donc à la fois la question de la généralité de l’objet technique, c’est à dire sa capacité à trouver une efficacité au sein de contextes différents, et la question des éléments limitant la population d’utilisateurs.

L’un des éléments limitatifs des usages possibles d’un objet technique tient à ce que Callon a proposé de nommer, à propos des connaissances scientifiques, la thèse de l’inutilité intrinsèque des énoncés. La connaissance produite n’a valeur que dans le cadre du collectif local dans lequel elle s’intègre. De là, on peut aisément comprendre que “*an isolated statement or theory is quite simply useless. () You will never see a mafioso carrying out a holdup in a theoretical physics laboratory.*” (Callon 1994, p. 402).

En d’autres termes, Callon met radicalement en cause l’hypothèse mansfieldienne de la compatibilité parfaite. Les conditions d’utilisation de l’objet technique ne sont aucunement réglées automatiquement, mais nécessite la mise en place d’investissements.

Il est possible d’étendre les réflexions de Callon au cas des objets techniques et de toutes les sortes de capitaux accumulés dans le cadre localisé de l’espace d’innovation. Ainsi que le suggère Callon, un chercheur de très haut niveau en physique théorique n’a plus aucune valeur s’il ne dispose pas d’un laboratoire équipé des outils sophistiqués dont il est coutumier, des collaborateurs compétents, des bibliothèques, des réseaux de recherche, des sources de financement lui permettant d’exercer ses talents. De même, l’utilisation d’un objet technique nécessite la mise en place d’une série d’investissements complémentaires. La généralité ne va pas de soi, et doit être expliquée, à la fois par l’orientation des investissements innovatifs réalisés au moment de la création technologique, qui, nous l’avons noté, peuvent viser un scénario de diffusion plus ou moins large, mais aussi par les

investissements indispensables que doivent consentir les adopteurs potentiels s'ils souhaitent se trouver en mesure d'utiliser l'objet technique.

En fonction des situations, les utilisateurs potentiels peuvent mettre en œuvre une variété de stratégies d'investissement, allant, comme dans le cas mansfieldien, de la pure acquisition d'un bien sur le marché sous hypothèse d'homogénéité des contextes de diffusion –logique d'utilisation pure-, jusqu'à la création technologique pure et simple et la mise en place d'une innovation concurrente –logique de production pure-. Entre ces deux pôles, on trouve une série de situations intermédiaires dans lesquelles certains éléments de l'objet technique diffusé peuvent être repris comme des boîtes noires, d'autres élaborés, d'autres enfin recréés.

Le milieu de diffusion est un milieu innovatif

L'un des points essentiels de la prise en compte de la variabilité des conditions d'utilisation consiste à montrer que le milieu des adopteurs potentiels repéré par Mansfield n'est en aucun cas donné ou statique, mais se construit au fil de l'innovation et de sa diffusion.

Un second point, tout aussi important consiste à réintroduire les producteurs et les innovateurs - Teece (1986) a démontré qu'ils ne se confondaient pas nécessairement- dans le modèle de diffusion. Mansfield postule une disponibilité parfaite du bien diffusé. Hard (1994), à partir du cas du développement du moteur diesel aux Etats Unis montre que cette hypothèse doit être relâchée. Lorsque Cummins a commencé à diffuser son premier moteur aux marins, il n'a pas réussi à produire un moteur suffisamment fiable. Lorsque Cummins a obtenu sa première commande importante de la part des services postaux, il n'a pas réussi à honorer cette commande, ni en qualité, ni en quantité : Hard note qu'à certains moments, les flux étaient inversés, il y avait plus de moteurs retournant à l'usine pour être remis en état que de moteurs neufs sortant de l'usine. Le passage d'un prototype exemplaire, artisanal, construit dans le cadre de l'espace d'innovation, à la production industrielle d'un bien suppose la mise en place de moyens de re-production de l'objet technique.

La thèse d'Abernathy (Abernathy 1978) éclaire l'importance de la construction de l'offre, et du passage d'une fonction de production de l'objet technique à une fonction industrielle de re-production d'un bien standardisé dans le développement de l'industrie automobile et la mise en place de sa dynamique industrielle. L'intégration, dans l'analyse, des économies d'échelles, des rendements croissants d'adoption permet en outre de faire le lien avec le travail d'Arthur (Arthur 1988).

La firme, mais également l'espace des relations inter-firmes forment les moteurs essentiels de la dynamique de formation des connaissances au fondement de l'innovation et de sa diffusion. Dans ce

contexte, la dynamique des relations établies entre les firmes, leur capacité à entrer en coopération (Lynn 1982, Tyre 1988), la qualité des liens établis entre producteurs et utilisateurs (Lundvall 1988, Carlsson 1995) forment des éléments essentiels à la diffusion.

Nous avons noté, dans la théorie d'Arthur, l'importance du passage d'une logique de firmes individuelle à une logique de comportement collectif. L'explication donnée par Arthur, reposant sur la loi des grands nombres- est d'ordre tautologique, et n'éclaire pas suffisamment un mécanisme aussi essentiel de son modèle. En se concentrant sur les effets de la dynamique d'adoption, Arthur néglige l'interprétation de cette dynamique. Comment une logique collective est-elle formée? Dans quelle mesure les firmes ont-elles tendance à se différencier les unes des autres ? Par l'intermédiaire de quels mécanismes (spécialisation ou intégration) (Joly, De Looze 1996) ?

Dasgupta et David mettent l'accent sur l'existence de structures incitatives (asymétrie, règle de priorité, droits de propriété, récompenses), sur la professionnalisation et sur la socialisation des scientifiques ('communality' et 'dévoilement', ostracisme, réputation, certification, rang, salaire fixe, évaluation par les pairs, langage commun). Cette vision met l'accent sur l'existence d'organisations, laboratoires, instituts, corps de métiers, groupes de chercheurs ayant pour fonction sociale la production de connaissances scientifiques.

Callon s'éloigne assez nettement de cette position en insistant sur la production de réseaux hybrides, dont la connaissance n'est qu'un aspect particulier "*the main result of scientific activity is not to produce information but to reconfigure heterogeneous networks*" (Callon 1994, p. 411). En d'autres termes, il ne s'agit pas d'étudier l'organisation de laboratoires, et de groupes de chercheurs produisant de l'information, mais, à l'inverse, de considérer l'activité scientifique comme la production de réseaux de chercheurs, d'instruments, de financements, d'énoncés, d'ouvrages de référence, de laboratoires. Callon élabore son raisonnement à partir de deux concepts, celui de 'collectifs locaux' ou de 'reconfigurations locales', et celui de 'réseaux'.

Dans cette perspective, il est possible de comprendre, ainsi que le souligne Callon (1994) que la question n'est pas nécessairement, pour une entreprise innovante, de conserver pour elle-même ses découvertes, mais à l'inverse de les faire partager, afin de mettre en place de nouveaux réseaux. Joly et De Looze (1996) décrivent ainsi les stratégies suivies par certaines firmes dans le domaine des biotechnologies, lesquelles misent explicitement sur la diffusion la plus large possible de leur innovation, et sa reprise par une multitude d'entreprises utilisatrices, y compris par leurs concurrents, au prix d'une forme de dumping. Une politique de protection trop stricte aurait sans doute constitué une incitation à développer des alternatives. Les auteurs prennent l'exemple d'une entreprise ayant réussi à devenir le fournisseur incontournable d'un procédé biotechnologique : "*After having filed a*

patent application ; Monsanto difused the 35S promoter wiedy, leaving it open to free utilization for research, notably in the academic milieu. This Super Promoter came to be used regularly by biologists. Those users who now want to commercialize the fruit of their research are required by Monsanto to obtain a licence. Theoritically, other promoters could be used ; however, it would be necessary to re-do the genetic construction and carry out numerous tests” (Joly, De Looze 1996, p. 1041).

Il est possible de comprendre la dynamique d'adoption à partir d'une théorie des clubs, c'est à dire d'un réseau ad hoc de producteurs et d'utilisateurs de biens collectifs, dont la généralité est limitée à ce réseau. En ce sens, la formule proposée par Cohendet et Alii semble tout à fait appropriée: *“les pratiques de coopération créent des biens publics de nature ‘privée’”* (Cohendet et Alii, 1992, p. 75). Les firmes tendent donc à construire des réseaux de compétences complémentaires à partir desquels les apprentissages soutenant l'innovation sont organisés. *“Non seulement la structure tend vers une organisation en réseau, mais la firme elle-même devient un réseau de qualifications scientifiques et techniques capables d'adopter de nouvelles technologies et de sélectionner des trajectoires de développement propres parmi les alternatives qui se présentent. Or les niveaux intra et inter-firmes ne sont pas indépendants. Dans ce contexte, la capacité d'accès au savoir-faire de firmes opérant dans des domaines connexes valorise davantage les ressources humaines propres de la firme”* (Cohendet et Alii, 1992, p. 74). L'Etat, dans cette perspective, peut avoir l'ambition de favoriser la constitution de réseaux, de 'milieux innovateurs' (Carlsson et Jacobsson 1992; Lundvall, 1993).

3) De l'information à la connaissance collective

De l'information à la connaissance

La conception de l'information développée par Mansfield est proche de celle du modèle de concurrence pure et parfaite. L'auteur estime que l'information pertinente pour les adopteurs potentiels – il se désintéresse des producteurs – est liée à la prise de décision d'acquisition d'un l'objet technique connu disponible sur le marché. Pourtant, même si l'on s'en tient à la prise de décision des adopteurs, les paragraphes précédents invitent à considérer que les adopteurs sont amenés à acquérir une information sur l'offre et sa diversité, autant que sur les spécificités de leur demande. Cela rejoint le travail de Foray et Mowery (Foray et Mowery 1989 ⁴⁶⁰) qui proposent de distinguer une information portant sur les résultats obtenus (la conscience –awareness- de l'existence d'une innovation facilitant la coordination et les décisions) et les connaissances nécessaires à une réelle implantation matérielle de l'objet technique.

⁴⁶⁰ Foray, D. et Mowery, D. (1989) “L'intégration de la R&D industrielle : nouvelles perspectives d'analyse” in : Revue économique, n°3, pp. 501-530.

La décision nécessite de porter un jugement, une évaluation sur les qualités relatives des différents objets techniques offerts, en relation avec les besoins et les moyens spécifiques de l'acquéreur. Cette capacité d'évaluation met en œuvre des compétences : elle peut être plus ou moins pertinente, et peut couvrir une zone plus ou moins limitée dans un détail plus ou moins fin. Dans son exemple un peu particulier, Hard (1994) montre que Cummins connaissait peu de choses concernant les expérimentations et les objets techniques mis au point dans le reste du monde. L'information est donc coûteuse, imparfaite et singulière à son contexte de production.

Même si l'on admet l'hypothèse minimale de focalisation sur la prise de décision, les adopteurs ne peuvent totalement ignorer la question de l'ajustement entre objet technique offert et contexte productif dans lequel ils souhaitent l'insérer (. La valeur de l'innovation n'est pas indépendante de ses conditions d'usage. Cela justifie, ainsi que l'a bien souligné Tyre, la mise en place de processus d'investissement ('search' Tyre 1988) destinés à éclaircir les conditions de cet ajustement, et donc la question du fonctionnement futur de l'objet technique et des performances attendues. Cela rejoint également la position de Pinch et Bijker qui considèrent que "*the meanings given to a particular artifact by various social groups do not just constitute (independent) selection criteria but actually go to make up the content of the artifact*" (Van Deb Belt & Rip 1987, p.141).

Au-delà de la question de la décision d'adoption, l'existence d'une information révélée collectivement pose une série de problèmes épineux, qui ont donné lieu à des développements théoriques récents dans le secteur de l'économie de la science. Nous proposons de rendre brièvement compte de la teneur de ce débat, dont les termes peuvent aisément être étendus au-delà de l'économie de la science.

La science pose un problème particulier à la rationalisation économique, du fait de sa situation au confluent du concept d'information et de bien public. Aussi l'économie de la science est-elle le siège de débats éclairants sur le traitement des connaissances en science économique. Dans les années 60, ainsi que nous l'avons noté, les premières réflexions marquantes sur la question ont assimilé strictement le produit de la science à de l'*information*, c'est à dire à un bien public durable. Trente ans plus tard, face au mouvement croissant de "*privatisation de la science*", un tel paradigme paraît bien difficilement soutenable (Callon 1994, David et Foray 1996 ⁴⁶¹): l'exemple de la controverse autour du dépôt de brevets sur le patrimoine génétique de l'être humain - programme Human Genom -, des changements de pratique de libre circulation des découvertes dans le domaine informatique, ou encore

⁴⁶¹ David, P. et Foray, D. (1996) "Information Distribution and the Growth of Economically Valuable Knowledge: A Rationale for Technological Infrastructures Policies" in: Teubal et Al. (eds) *Technological Infrastructure Policy. An International Perspective*. Kluwer. pp. 87-116; Callon, M. (1994) "Is Science a Public Good?" in: *Science, Technology and Human Values*, Vol 19, n°4, pp. 395-424.

les tendances récentes de plus en plus affirmées à ne publier que certains résultats incomplets dans les articles de biotechnologie forment autant de signes d'un changement radical de dynamique économique et interroge radicalement la pertinence des développements proposés jusqu'alors par l'économie de la science (McKenzie et Alii 1990, David et Foray 1996 ⁴⁶²).

Face à ces bouleversements, la publication récente d'un article (Dasgupta et David, 1994 ⁴⁶³) propose, avec un bonheur relatif, de fonder une '*nouvelle économie de la science*' sur la synthèse d'avancées réalisées en économie et en sociologie, permettant une meilleure prise en considération des évolutions récentes du paysage économique. Dasgupta et David proposent en particulier de reconsidérer la théorie de l'information au principe des travaux d'Arrow.

Selon les défenseurs de la '*nouvelle économie de la science*', le concept d'information sur lequel s'appuie Arrow, et dont découle le raisonnement de l'ancienne économie de la science, ne constitue qu'un cas limite des types de connaissances produites et utilisées dans les processus d'innovation - et plus largement, dans les situations économiques. Dasgupta et David invitent leurs lecteurs à reconnaître l'existence de plusieurs formes de connaissance variant en fonction de leur *degré de codification* : (a) la forme d'une information codifiée, et (b) la forme d'une connaissance tacite.

David et Foray ont développé ce point de vue: "*Codification and tacitness may be treated as locations along a continuum whose endpoints are represented by complete systematization on one side and by procedural knowledge on the other. Complete systematization of cognitive content uses a vocabulary of defined terms such that the interpretation of the text is unambiguous. Unsystematized procedural knowledge exists as expertise that particular individuals possess*" (David et Foray 1996, p. 95). Les auteurs proposent de considérer l'existence d'un *espace des savoirs* caractérisé par trois dimensions indiquant des degrés de 1) codification explicite (vs 'tacit'), 2) privatisation (vs public), 3) révélation (vs secrecy).

Dans cette perspective, l'information n'est qu'un cas limite de connaissance particulièrement codifiée. Selon cette approche, pour acquérir sa généralité universelle, l'information doit subir un encodage, passer par une traduction – coûteuse - l'inscrivant dans une forme aisément communicable, transportable dans le temps et dans l'espace à coût faible. L'encodage permet à l'information de gagner son autonomie "*codified information is typically organized and expressed in compact and standardizes formats in order to facilitate and reduce the cost of these operations. In contrast, tacit*

⁴⁶² McKenzie, M., Keating, P., Cambrosio, A. (1990) "Patents and Free Scientific Information in Biotechnology: Making Monoclonal Antibodies Proprietary" in: *Science, Technology, and Human Values*, Vol 15, n°1, winter 1990, pp. 65-83

⁴⁶³ Dasgupta, David, P. (1994) "Towards a new economics of science" in: *Research Policy*, Vol . 23, pp. 487-521.

knowledge cannot be dissociated from the work practices of research and production units” (David et Foray 1996, p.95).

Le point essentiel, par rapport à la théorie d’Arrow, consiste à montrer que, l’information représentant une forme particulièrement coûteuse de connaissance du fait de son encodage, une partie non négligeable des connaissances produites le sont sous une forme moins codifiée et plus aisément appropriable. En postulant que les acteurs ont la possibilité de produire des connaissances non codifiées, facilement appropriables, à un coût moindre que l’information, les développements proposés par David et Foray (1996) et Dasgupta et David (1994) renversent la perspective arrowienne ⁽⁴⁶⁴⁾. L’hypothèse de sous investissement local en R&D lié à la difficulté d’appropriation ne tient plus. La question devient à l’inverse comment inciter les agents producteurs d’information à partager celle-ci et à lui donner une forme autorisant sa circulation et son utilisation par d’autres acteurs. Quels sont les mécanismes incitant les acteurs à construire des bases d’information communes?

Tout dépend, nous disent les auteurs, des dispositifs institutionnels, et en particulier des mécanismes d’incitation, de récompense, et des coûts de codification liés à l’organisation dans laquelle les connaissances sont produites. Les caractéristiques des connaissances résultent *“of social organizations and of the attendant reward structures of those supporting the production of knowledge. The true nature of new knowledge does not stem from any intrinsic differences between knowledge that is scientific rather than technological, nor between basic and applied scientific knowledge. The critical factors governing the distribution and the utilization of new findings are those regarding the rules structures and behavioral norms about information disclosure that dominate in the particular social organizations within which new knowledge is found or improved”* (David et Foray, 1996, p. 94).

Dans l’exemple de la communauté scientifique, les auteurs estiment que les proportions respectives de savoirs tacites et d’information produits - déterminant le niveau d’accès et le coût d’accès des usagers - reflètent la structure des incitations, en particulier la fameuse règle du ‘premier arrivé’ encourageant le dévoilement pour obtenir la reconnaissance, et les mécanismes de réputation construits à long terme, dissuadent les tentatives d’opportunisme. La dynamique d’accumulation de connaissance tend, dans ce cas, à s’organiser autour de l’accumulation d’un stock de connaissance publique, alors qu’à l’inverse, l’objectif de la communauté technologique, prise généralement dans des formes de contrats privés, vise plutôt à obtenir une rente dérivée de la possession de certains savoirs appropriés.

⁴⁶⁴ Le texte de Cambrosio et Al (1988) vient appuyer cette thèse en montrant que dans un secteur de haute technologie proche de la science, la production d’hybridomes, les acteurs produisent une série de savoir faire et de savoir tacites tout à fait essentiels. Les auteurs évoquent en particulier la formation d’une manière de voir et de faire, transmise par l’exemple, et résultant de l’expérience, sans laquelle les instructions demeurent vides de sens. Cambrosio, A., Keating, P. (1988) “Going Monoclonal: Art, Science, and Magic in the Day-to-Day Use of Hybridoma Technology” in: *Social Problems*, Vol 35, n°3, June 1988, pp. 244-260.

La dichotomie information/ objet technique

Callon (1994) invite à adopter une vue moins tranchée de la séparation entre biens matériels et idées sur laquelle repose les thèses de Romer, Arrow et Mansfield. L'auteur conteste la validité du raisonnement tenu dans le modèle diffusionniste.

Le premier argument de l'auteur concerne le caractère immatériel souvent attaché aux idées ou à l'information. Rappelons que Romer établit une distinction entre les idées - bien immatériel circulant - et leur support matériel - disquette, connexions neuronales -. Callon montre que les concepts d' 'idée' ou de 'bien immatériel' sont trompeurs. Son argument principal est que toute information, pour devenir un bien échangeable, doit être inscrite sur une base matérielle (⁴⁶⁵). Par exemple, dans le cas de l'activité scientifique, sous quelle forme une connaissance scientifique est-elle échangée? Le produit final de l'activité scientifique est l'article ou l' 'énoncé' scientifique. Cet énoncé fait le plus souvent l'objet d'une inscription sur un support papier, publié dans une revue scientifique ou communiquée dans le cadre d'un colloque, acquis et ordonné dans une bibliothèque, enregistré et codifié dans les bases de données. Sans investissements réalisés dans les revues scientifiques, ou dans l'organisation de congrès et colloques, l'énoncé pourrait difficilement être porté à la connaissance de ses utilisateurs potentiels.

Deuxièmement, Callon conteste l'hypothèse attribuant aux énoncés scientifiques un caractère non exclusif. Dasgupta & David (1994) soulignent le caractère fondamentalement privé et localisé des idées. Pour devenir publiques, elles doivent faire l'objet d'une codification coûteuse. Cela introduit une dimension stratégique à l'analyse: *"the choice of a code for which many hold the key, itself constituted as a public good, is not a necessary feature of science: it is a decision, not an inevitability"* (Callon, 1994, p.400). Les connaissances peuvent être inscrites sur des supports plus ou moins facilement appropriables. *"Ease of appropriation appears to depend on the material or the base in which the information is inscribed. The more information is encoded in texts the harder it is to appropriate; the more is is inscribed in human bodies or technical artifacts, the easier it is to assure its excludability. For example, it is easier to duplicate a statement than to duplicate a mathematician or a sophisticated instrument whose blueprints are locked away in a safe"* (⁴⁶⁶).

⁴⁶⁵ Notons que cette vue semble correspondre aux pratiques mises en oeuvre en matière de droit de propriété. Pour une raison bien compréhensible du point de collectif, les idées qui peuvent traverser la tête d'un individu n'ouvre aucun droit. Seules les idées fixées sur un support tangibles ouvre automatiquement un droit d'auteur. Ainsi, dans le droit américain, l'une des conditions essentielles à la reconnaissance d'un copyright est la 'fixation' matérielle de l'idée 'fixed in any tangible medium of expression' (Besen, Raskind, 1991, p. 11).

⁴⁶⁶ Callon, M. (1994) "Is Science a Public Good?" in: *Science, Technology and Human Values*, Vol 19, n°4, pp. 399

De plus, pour devenir un bien public, la connaissance doit être non seulement codifiée mais aussi publiée. L'image du chercheur réalisant la photocopie d'un article pour quelques francs et appropriant ainsi son contenu informationnel, occulte donc des coûts supplémentaires nettement plus conséquents sans lesquels il lui serait tout bonnement impossible de connaître l'existence et de reproduire l'article considéré ⁽⁴⁶⁷⁾ ⁽⁴⁶⁸⁾. Aussi, si les coûts de re-production de l'information *stricto sensu* peuvent être limités, ils ne sont jamais nuls, et peuvent même être considérables. Etant donné les investissements requis pour produire un énoncé, et la rareté des compétences susceptible de les utiliser, Callon déduit que le savoir scientifique est largement appropriable (Rosenberg 1990).

Troisièmement, Callon discute le caractère non-rival des idées. Callon met en avant la proposition quelque peu déroutante selon laquelle un énoncé scientifique n'est pas moins rival qu'un objet courant comme une Ford Taunus. En fait, pour comprendre son propos, il est utile de reconsidérer la position de Romer. L'ambiguïté de cette position porte sur le statut de 'bien' des idées. Romer propose d'élargir le concept de bien pour y intégrer les idées, considérées indépendamment de leur base matérielle. Callon conteste l'existence d'idées sans support matériel. Il conteste l'établissement d'une frontière fixe entre monde des idées et monde des objets. La critique livrée par Callon sur ce point est en fait plus radicale. L'auteur explique que rien ne limite l'inscription des savoirs scientifiques aux articles et aux ouvrages ⁽⁴⁶⁹⁾ - c'est à dire aux produits finis traditionnels de la science-: celle-ci peut aisément être étendue aux brevets, projets, subventions, rapports, outils, équipements, compétences et autres produits 'intermédiaires', qui forment ensemble, un réseau d'objets complémentaires. Les énoncés scientifiques forment selon cette vision, la partie émergée de l'iceberg. Callon propose donc de reprendre la position 'matérialiste' proposée par les économistes mais en parlant, non plus simplement de bien, mais d'un ensemble de biens complémentaires: les énoncés scientifiques ne sont utilisables qu'associés, inscrit dans une fonction de production, et pas de manière autonome. A partir de là, Callon se trouve en mesure de refuser la distinction entre un énoncé scientifique et une Ford Taunus et de conclure "*science, even in its most codified forms, cannot therefore be considered a nonrival good*" (Callon 1994, p.403).

Il résulte de cette discussion que "*Scientific knowledge does not constitute a public good as defined in economic theory. The private or nonprivate nature of science is not an intrinsic property. Degrees of appropriability and of rivalry are the outcome of the strategic configurations of the*

⁴⁶⁷ Le travail de David et Foray ouvre une perspective relativement similaire en soutenant l'importance de la création d'*infrastructures* favorisant la mise en forme, le stockage, l'identification, le codage et le décodage, et l'acquisition d'informations. Cela comprend bien entendu les nouvelles technologies de l'information, mais aussi les structures collectives coopératives (associations professionnelles, instituts, centre technologiques et scientifiques) dont émanent le plus souvent les revues scientifiques et les colloques.

⁴⁶⁸ Romer raisonne à l'inverse sur le coût marginal de re-production d'une information (copie disquette d'un fichier ou photocopie d'un document, ou enregistrement sur bande d'une conversation, ou coût marginal de la connection à internet..), ce qui l'amène à la conclusion que le coût de reproduction d'une idée une fois émise est négligeable.

⁴⁶⁹ Il est suivi sur ce point par Dasgupta et David (1994).

relevant actors, of the investments that they have already made or are thinking of making. Insofar as they both can be seen as commodities, there is no difference between a Ford Taurus and the general theory of relativity” (Callon, 1994, p. 407).

Il est donc nécessaire de considérer ensemble la production de biens, d’acteurs et de connaissances pour saisir la dynamique de généralisation d’une innovation.

De l’imitation à l’investissement

La thèse de Callon possède l’avantage d’éclairer les conditions extrêmement limitées dans lesquelles l’imitation, au sens schumpétérien, souvent située au centre des modèles de diffusion, peut éventuellement être mise en œuvre. Elle suppose que la firme imitatrice et la firme innovatrice possèdent des bases de compétences et de connaissances similaires. Elle suppose également qu’un certain niveau d’investissement complémentaire soit consenti : l’imitation ne peut pas se résumer à la mise en circulation d’une idée.

Nous avons noté que Mansfield évite adroitement la question en ne s’intéressant à l’imitation que sous l’angle des adopteurs. Mais si l’on relâche l’hypothèse selon laquelle les conditions de production de l’objet technique sont réglées, ou si l’asymétrie de compétence et de ressources entre producteurs et utilisateurs n’est pas très grande, la question schumpétérienne de l’imitation doit être considérée.

L’idée selon laquelle -“*il est toujours possible pour les firmes qui ne contribuent pas directement aux efforts de R&D d’avoir accès aux connaissances nouvelles générées et d’utiliser leur potentiel d’innovation économique, avec un coût d’information et d’imitation relativement faible*” (Cohendet et Alii, 1992, p. 64⁴⁷⁰)- a été très discutée. Ce mécanisme a toutes les chances d’entretenir une illusion (⁴⁷¹).

Les difficultés et les coûts de l’imitation tendent à être largement mésestimés “ *il n’est jamais très facile d’accéder aux fruits de la recherche que l’on n’a pas faite soi-même*” (Cohendet et Alii, 1992, p. 64). L’une des raisons essentielles de cette sous estimation tient à la thèse de “*l’inutilité intrinsèque des énoncés*” -ou Collins’s Law- (Callon 1994). Cette thèse met en question l’idée

⁴⁷⁰ Cohendet, P., Heraud, JA, Zuscovitch, E. (1992) “Apprentissage technologique, réseaux économiques et appropriabilités des innovations” in: Foray et Freeman (eds) *Technologie et richesse des nations*. Op cit. pp. 61-78.

⁴⁷¹ Kogut et Zander montrent que l’automaticité de l’imitation est une illusion. Kogut, B; Zander, U. (1992) “Knowledge of the Firm, Combinative Capabilities, and the Replication of Technology” in: *Organization Science*, Vol 3, n°3, August 1992, pp. 383-397

répandue selon laquelle la circulation et l'usage de l'information seraient non-coûteuses. En fait, comme l'indique Callon, une information n'a de valeur que si un dispositif susceptible de l'utiliser a préalablement été mis en place. Callon note ainsi *"the impossibility of endowing a statement with any meaning if the work of the duplication of skills and instruments has not been done"* (Callon, 1994, p. 403).

Aussi, comme l'ont fort bien noté Cohen et Levinthal, seul les participants au jeu de la R&D possèdent réellement les moyens d'imiter une innovation. Cohendet et Alii (1992) proposent de considérer que *"les coûts d'adoption – une mesure de l'appropriabilité – sont fonction inverse de l'investissement en R& D des imitateurs"* (Cohendet et Alii, 1992, p.69). Les faibles coûts de reproduction de l'information, ou d'imitation, les mécanismes de spillovers masquent une condition sine qua non. D'importants investissements doivent avoir été préalablement consentis par les 'firmes adoptrices' : *"in this context, the decision to patent should be considered more as an option to enter into an economic activity than as the acquisition of a monopoly right"* (Joly, De looze, 1996, p. 1040). Cette proposition permet de préciser le cadre de la théorie mansfieldienne de la diffusion. L'une des particularités du groupe d'adopteurs de Mansfield est donc que les adopteurs de la technologie ont en commun d'avoir développé des efforts de R&D en relation avec l'objet technique considéré, de manière à construire leur capacité d'imitation ou d'absorption de cette nouvelle idée. *Economists have long argued that research spillovers diminish firms's incentive to invest in R&D by undermining the appropriability of returns to inventive activity () With an endogeneous absorptive capacity, the result changes"* *"the intuition is that as an industry becomes more competitive, the private loss associated with the public good character of R&D spillovers diminishes relative to the private benefit of being able to exploit competitors'spillovers"* (Cohen & levinthal, 1989, p.575-577).

Ainsi, l'éclaircissement des *conditions d'usage* des idées contribue à offrir une solution renouvelée à la question de savoir quelles firmes consentent à investir dans un bien quasi-public. On peut ainsi représenter en dynamique la population d'adopteurs potentiel mis en avant par Mansfield. Toutes les firmes souhaitant participer au jeu de l'innovation considérée sont largement incitées à former une dynamique de club (⁴⁷²). Du fait des exigences de la capacité d'absorption de l'information, ou des énoncés, seuls les participants au jeu de la R&D peuvent bénéficier du caractère collectif des connaissances formées. *"The observation that R&D creates a capacity to assimilate and exploit new knowledge sheds new light on a range of questions. For example, it provides a ready explanation of why some firms may invest in basic research even when the preponderance of findings spill out into the public domain. Specifically, firms may conduct basic research less for particular results than to be able to identify and exploit potentially useful scientific and technological knowledge generated by universities or government laboratories, and thereby gain a first-mover advantage in*

exploiting new technologies. Likewise, basic research may permit firms to act as a rapid second mover in the face of spillovers from a competitor's innovation" (Cohen et Al. 1989, p. 593.)

Ce mécanisme souligne la spécificité des savoirs formés, dont la généralité épouse les frontières du club dans lequel ils sont amenés à se diffuser. En ce sens, les savoirs émanant de l'innovation sont fondamentalement localisés: *"le développement de nouvelles technologies apparaît fondamentalement comme un processus d'apprentissage localisé et irréversible - c'est à dire dépendant du contexte économique et de la trajectoire passée - un processus dont il est difficile d'accéder aux fruits, même lorsque ceux-ci apparaissent comme une 'information publique'. La compétition économique porte sur la connaissance opérationnelle de production, le savoir faire technique, et non sur les dernières découvertes théoriques 'inscrites dans l'annuaire des technologies'"* (Cohendet et Alii, 1992, p. 64).

D'un autre côté, Joly et de Looze (1996⁴⁷³) soulignent que si les firmes sont proches du point de vue de 'leur profils technologiques', la protection offerte par le secret et les savoir –faire reste limitée, dans la mesure où même sans imitation, la probabilité que certaines d'entre elles créent des technologies similaires est forte : *"when firms have a common technological base, the probability of them producing similar innovations is high, even in the absence of spillovers or of the possibility of imitation"* (Joly, De Looze 1996, p. 1039). L'imitation n'est donc pas le seul et unique mécanisme par lequel une innovation peut se diffuser. Le droit de la propriété intellectuelle, et particulièrement les brevets n'ont alors pas pour fonction d'éviter l'imitation, mais de marquer l'engagement dans entreprise sur un territoire économique (Joly, De looze 1996).

La base d'information relative aux attributs, aux performances, à l'usage de l'objet technique diffusé pose le problème bien connu des mécanismes d'incitation à la production des biens publics ou quasi-publics (⁴⁷⁴). Il existe une tension entre bénéfices privés et sociaux (Arrow 1962, p. 610). La question des droits de propriétés intellectuels, comme mécanisme institutionnel (Foray 1995, Besen et Raskin, 1991, Ordovery, 1991, Scotchmer 1991⁴⁷⁵) s'inscrit dans cette perspective: le dispositif de propriété intellectuelle viserait à suppléer le marché et ses défaillances sur ce point. Les différents droits de propriété intellectuelle correspondent par conséquent toujours à la recherche d'un arbitrage

⁴⁷² Buchanan, J. (1965) "An economic theory of clubs" in: Economica, Vol 32, n°1, pp. 1-14.

⁴⁷³ Joly, PB, De Looze MA (1996) "An analysis of innovation strategies and industrial differentiation through patent applications : the case of plant biotechnology" in : Research Policy, Vol. 25, pp.1027-1046.

⁴⁷⁴ Olson, M. (1968) *The Logic of Collective Action*. Schocken Books.

⁴⁷⁵ Scotchmer, S. (1991) "Standing on the Shoulders of Giants" in: Journal of Economic Perspective, Vol 5, n°1, Winter 1991, pp. 29-41; Ordovery, J. (1991) "A Patent System for Both Diffusion and Exclusion" in: Journal of Economic Perspectives, Vol 5, n°1, Winter 1991, pp. 43-60; Besen, S. et Raskin, L. (1991) "An Introduction to the Law and Economics of Intellectual Property" in: Journal of Economic Perspectives, Vol 5, n°1, Winter 1991, pp. 3-28; Foray, D. (1995) "Les brevets dans la nouvelle économie de l'innovation" in: Baslé, M., Dufourt D., Héraud, JA., Perrin, J. (eds) *Changements institutionnels et changements technologiques. Evaluation, droits de propriété intellectuelle, système national d'innovation*. CNRS Ed. Pp. 125-151

entre d'une part, une incitation 'individuelle' à investir et, d'autre part une exigence collective de diffusion, le brevet étant conçu comme un mécanisme essentiel de collectivisation de l'information (Ordovery 1991, Foray 1995). L'un des avantages de cette mise en commun consisterait à faciliter la coordination des stratégies des entreprises, en incitant à la différenciation (Joly et De Looze 1996⁴⁷⁶).

Pourtant la thèse d'Arrow, aussi séduisante soit-elle sur le plan intellectuel, est fondamentalement incomplète et insatisfaisante. Dans la réalité, d'autres mécanismes aussi fondamentaux interviennent. Ainsi, comment comprendre que certaines entreprises partagent volontairement leurs expériences et leur information au détriment de leur intérêt individuel calculé (⁴⁷⁷)? Allen (1983) montre ainsi comment dans la sidérurgie britannique du XIX^{ème} siècle, les entreprises ont spontanément adopté des attitudes coopératives les unes vis à vis des autres, leur permettant de construire une base commune d'information facilitant la diffusion des technologies les plus avancées et les pratiques les plus performantes. Les travaux récents de l'économie du changement technique et de l'innovation tendent à indiquer que ces phénomènes coopératifs sont la norme plutôt que l'exception (Dahmen 1989, Carlsson 1995, Lundvall 1993). Ceux-ci s'inscrivent dans le cadre d'un milieu innovant délimitant les frontières de ce que Allen a nommé *collective invention*. Le comportement de ces entreprises semble défier la thèse de Arrow sur deux points: ils conduisent à douter de l'hypothèse d'un sous-investissement chronique lié à une appropriation imparfaite de l'information et ils contrarient l'idée de l'automatisme des spillovers.

Il nous semble donc utile d'envisager une gamme d'action élargie de la part des adopteurs, en fonction de l'asymétrie de compétence et de ressources productives existants entre eux et les producteurs, et en fonction de la nature de l'offre à laquelle ceux-ci sont confrontés. Lorsque l'asymétrie est forte, et que l'offre est unique, alors, le modèle de Mansfield de l'imitation d'adoption s'applique. En toutes autres circonstances, il est indispensable de réintroduire une capacité de création technologique dans l'économie, l'investissement peut alors prendre trois modalités : l'acquisition d'un objet technique existant et sa mobilisation comme boîte noire, l'adaptation de certaines de ses caractéristiques, ou la création pure et simple, c'est à dire la mise en œuvre d'un processus de création technologique.

En conclusion, il apparaît donc que les conditions posées par Mansfield pour soutenir l'idée d'une généralisation automatique de l'innovation au sein de l'économie sont extrêmement restrictives et forment un jeu d'hypothèses fortes rendant compte de situations extrêmement singulières. Il semble donc tout à fait indispensable d'ouvrir et de problématiser la question de la généralisation pour pouvoir penser une variété de situations de diffusion: quels sont donc les mécanismes par lesquels une

⁴⁷⁶ Les auteurs cités exposent cette thèse pour la contester.

⁴⁷⁷ Allen (1983) "Collective invention" in: Journal of Economic Behavior and Organization, Vol 4, pp. 1-24.

innovation localisée se répand au sein de contextes variés et gagne une certaine généralité au sein de l'économie dans son ensemble ? Toute la question, qu'il nous paraît donc difficile d'éluder, consiste alors à s'efforcer de comprendre comment de local, une innovation peut devenir générale et pourquoi. C'est à ce niveau que la question de la standardisation trouve un sens radicalement nouveau par rapport à son analyse dans la littérature existante. Au lieu de considérer la standardisation comme le produit mécanique de la diffusion, il s'agit de comprendre que la standardisation remplit précisément ce rôle d'extension des savoirs, et de l'efficacité des choses.

Une part importante de la question suppose de penser les dispositifs institutionnels permettant la mise en place d'apprentissage et d'accumulation collectifs, la mise en place de réseaux mettant en relation producteurs, utilisateurs, et constituant des espaces de circulation des biens, des connaissances et des personnes. Cela suppose, d'un point de vue économique, d'éviter une visée trop structuraliste, écrasant le temps et l'espace dans lesquels se déroule l'action, tout en allant au delà d'une analyse en terme de rationalité individuelle et de comportements individuels agrégés : selon l'expression employée par Piore (Piore 1983) *“To understand these phenomena, one therefore needs a paradigm which recognizes and encompasses social, as opposed to individual, phenomena”* (⁴⁷⁸).

⁴⁷⁸ Piore, M. (1983) “Labor Market Segmentation : To What Paradigm Does it Belong ? ” in : American Economic Review, May 1983, Vol.73, n°2, pp. 249-254.

Chapitre 2: Proposition pour une théorie de la généralisation

“The effort that the book does require is an initial derailment of the mind from the tracks of common sense. Our cultural environment - the everyday world - has to be turned into a strange place if we are to see that its perceived orderliness is a remarkable and mysterious human accomplishment.” (Collins 1985 Changing Order, p.1)

Comme l’ont noté de nombreux auteurs depuis Joseph Schumpeter et Edwin Mansfield, une innovation qui ne se diffuse pas est une innovation qui, sur le plan de l’économie dans son ensemble n’est pas à même de générer de la croissance et de la richesse. La question de ce que les économistes ont nommé la diffusion de l’innovation est donc au cœur d’une approche du développement technologique (Mansfield 1961). Malgré sa centralité, les efforts qui y ont été consacrés, et son repérage relativement ancien, il n’est pas faut de dire que les mécanismes par lesquels une innovation se diffuse à l’économie - les modalités d’émergence de territoires économiques autour d’innovations technologiques, et les conditions de succès et d’échec des innovations et de leur diffusion- demeurent relativement mystérieuses. L’enjeu représenté par ces questions de passages de l’innovation micro à la technologie macro, et de l’innovation localisée au progrès technique global pour l’ensemble de l’économie, n’est, au fond, rien moins que de s’attaquer aux mécanismes au fondement de la constitution d’une économie, de la transformation d’une société (⁴⁷⁹).

La réponse mansfieldienne, en bonne part dictée par des impératifs de simplification liés à la mesure économétrique, est, on l’a vu, insatisfaisante : elle décrit une économie dans laquelle ni la

⁴⁷⁹ Bijker, W., Law, J. (1992) *Shaping Technology/ Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press. “How is it that actors (people, organizations) are both shaped by, but yet help to shape, the context in or with which they are recursively implicated. So it is that a fairly matter of fact and practical question – what we can say about the firming up of technologies – leads us not only into the concerns of historians but also to the heart of sociological and political theory to the problem of social order” (p.10)

technologie, ni l'espace économique ne sont réellement affecté et transformés par la diffusion. Comment alors comprendre le développement technologique et la croissance économique dans cet univers profondément stable, sans changement? Chez Mansfield, l'économie –telle qu'elle est constituée après la diffusion- est placée artificiellement à l'origine de l'action. Elle préexiste à la diffusion et par conséquent, l'objet technique vient s'inscrire naturellement dans un univers créé pour l'accueillir. Dans une telle perspective, le constat de corrélation entre profitabilité supérieure et diffusion est proprement tautologique, puisqu'il est un artefact méthodologique.

Nous partons de l'idée, à l'inverse, que toute innovation est à la fois porteuse de promesses – croissance et richesse- et de risques –échec, erreur- pour une économie et une société, et qu'elle y introduit nécessairement une forme de discontinuité, une forme de rupture plus ou moins marquée, une menace potentielle pour l'ordre existant. C'est en s'inscrivant dans des territoires, en transformant la société, que l'innovation génère un développement économique. Le développement de l'automobile (Abernathy 1978), l'électrification des Etats Unis (Hughes 1983) ont été concomitants de création de nouvelles activités – et de destruction d'anciennes activités-, de nouvelles usines, d'une nouvelle consommation, de nouvelles compétences et de nouvelles régulations. La forme de la technologie est à la fois le reflet d'un certain compromis social innovant, formé en certains lieux, et le vecteur de transformation de la société et de l'économie plus globale. Pour comprendre comment ces effets se produisent, il est utile de penser le processus par lequel la technologie et les contextes dans lesquels celle-ci se forme et est utilisée sont conjointement élaborés.

Etant donné l'ampleur des questions soulevées, on ne peut espérer mieux à ce stade que de proposer quelques pistes exploratoires permettant de mieux repérer les phénomènes en jeu. Une manière de poser le problème consiste à s'intéresser à ce que nous appelons la généralisation des innovations. Nous entendons par généralisation les mécanismes par lesquels les apprentissages locaux réalisés dans le processus d'innovation débordent ce contexte de départ, autorisant la circulation élargie des objets techniques et des ressources constituées dans les premières étapes en étendant leur validité. Il s'agit donc de s'interroger sur la manière dont les innovations, conçues comme des processus localisés de création de technologie, se généralisent, circulent au sein d'une économie, font l'objet d'échange, et s'inscrivent en les forgeant, dans des territoires économiques. La notion de territoire économique peut en première approximation être définie comme combinant des espaces d'échange et de transactions entre producteurs, utilisateurs et institutions et des lieux organisés d'accumulation du capital et de production des biens. Il s'agit en particulier de s'écarter d'une vision homogène du marché et de l'entreprise, et de mettre en avant la constitution de réseaux d'échanges et de production largement transversaux, toujours inscrits et coordonnés autour d'une matérialité spécifique plus restreinte que l'économie dans son ensemble (Callon 1991, Dahmen 1989, Carlsson et Jacobsson 1995).

Le chapitre 2 présente un effort de conceptualisation de la question de la généralisation d'une innovation, ou ce qui revient au même, de la formation d'un marché technologique. Cette question est tout aussi fondamentale que débattue. Plutôt que de chercher à y apporter une réponse définitive, les paragraphes qui suivent s'efforcent d'en explorer les principaux aspects. Mansfield prend pour acquis la construction d'un marché homogène, la qualification des biens, et le caractère échangeable de l'information. Toutes ces hypothèses sont non seulement discutables, mais leur mise en question seule ouvre la possibilité d'une théorie de la généralisation. En ce sens, ce qui suit à une vocation exploratoire: proposer des pistes de réflexions théoriques pour réduire le fossé entre innovation et technologie, entre la création technologique et la dynamique des espaces technologiques.

Comme l'a fort bien montré Collins (1985⁴⁸⁰) à partir d'une étude portant sur la réplification d'instruments scientifiques, toute élaboration est nécessairement marquée par son contexte de production. Le cadre de l'action collective progressivement négocié et dessiné par les acteurs. Concevoir l'innovation comme productrice d'information revient à lisser totalement les incertitudes, les pratiques, les perceptions, les débats, les controverses qui l'agitent, et finalement l'idée même que la science pourrait produire de nouveaux énoncés. Sortir de ce piège intellectuel revient à reconnaître que toute innovation est en ce sens 'localisée' (Gaffard, 1990)⁽⁴⁸¹⁾. La question de la généralisation apparaît alors, et alors seulement dans sa dimension improbable, imprescriptible et problématique: "*It is not disorder that is mysterious but order, that order which is so manifest in nearly every human activity*" (Collins, 1985, p. 45). Si toute innovation est 'localisée', au sens où elle entretient une relation étroite avec son contexte de production, comment une telle connaissance peut-elle 'migrer' vers d'autres contextes et y trouver une efficacité? Le problème désormais classique des 'transferts de technologie' représente l'une des facettes de cette question.

Au chapitre précédent, nous avons montré que l'innovation forme un processus improbable d'élaboration d'un objet technique. Nous avons insisté sur la dimension pratique de cette élaboration, conférant à l'innovation une incertitude radicale. La question n'est pas uniquement de savoir si l'investissement réalisé représente une allocation rationnelle de ressources financières. Il s'agit avant toute chose de surmonter les difficultés attenantes au rapport pratique au monde que nécessite l'élaboration d'un objet technique. Comment créer un objet permettant à coup sûr d'obtenir un certain

⁴⁸⁰ Collins, H. (1985) *Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice*. Sage.

⁴⁸¹ Le caractère codifié de la science ou de l'information mis en opposition avec la caractère tacite de certaines connaissances est très discutable. Un geste ne peut-il pas être codifié? Une confusion fréquente assimile implicitement 'abstraction', 'codification' et 'information'. Une danse possède son code au même titre qu'un énoncé scientifique. Le registre n'est pas le même. Est-il certain que les gestes ne peuvent pas être porteurs d'information? Pensons à des situations extrêmes comme la plongée sous-marine, où les personnes sont privées de la parole et de l'écrit, elles se transmettent les informations par geste.

résultat, de façon stable et reproductible (⁴⁸²)? La fable de La Fontaine, *La laitière et le pot au lait*, présente une allégorie touchant au cœur du débat: le calcul économique et d'investissement de Perette ne vaut que si le pot au lait transporte bel et bien son contenu à destination, que si l'objet technique destiné à empêcher le lait de se répandre et le travailleur Perette mènent à bien leur mission sans que surviennent d'incident regrettable, imprévu: l'univers pratique doit être domestiqué au point d'être rendu prédictible. Après viennent les calculs économiques.

Aussi, la valeur d'une innovation tient en bonne partie à la reconnaissance de sa capacité à stabiliser certaines relations, à domestiquer certaines forces de manière prévisible et fiable: avant tout, les acteurs sont intéressés à savoir que "ça marche". Cela signifie que les acteurs reconnaissent l'importance de l'incertitude des rapports pratiques au monde et l'intérêt d'objets permettant de limiter l'exploration de ce rapport et l'élaboration de nouvelle technologie. Nous allons montrer qu'alternativement à l'idée répandue en économie selon laquelle la propriété intellectuelle récompense un 'effort individuel d'invention', il est possible, et pertinent de l'analyser d'abord comme la reconnaissance 'collective' d'une voie technologique stabilisée et reproductible, une reconnaissance sociale de la faisabilité effective d'une domestication particulière.

Comme nous le confiait un acteur, lorsque d'importants investissements sont en jeu, "*c'est bien agréable d'être le deuxième ou d'être le troisième.*" ('penguin effect' David 1987)(⁴⁸³). Le concept de 'boîte noire' prend ici tout son sens, dans la mesure où l'élaboration d'un objet technique permettant de stabiliser une relation entre des inputs et des outputs permet à ses utilisateurs potentiels d'éviter (ou de limiter) de replonger dans le rapport incertain et coûteux à la domestication des événements. Lorsque de telles boîtes noires n'existent pas, elles doivent être élaborées, mais leur existence, leur disponibilité sous une forme ou sous une autre ouvre un espace de choix aux acteurs.

Les réflexions précédentes soulignent l'importance de plusieurs éléments clés du processus de généralisation. Premièrement, il est essentiel de comprendre comment une reconnaissance est attribuée à un apprentissage localisé. Deuxièmement, il est nécessaire de qualifier le processus de 'mise en boîte noire'. Troisièmement, il est indispensable de traiter la question du rapport entre utilisateur et boîte noire.

⁴⁸² On peut penser par exemple aux difficultés rencontrées par les chercheurs du CNEXO pour fixer les larves de coquilles. Si les larves se fixent une année, mais pas l'année suivante, en d'autres termes si les chercheurs n'ont pas stabilisé les résultats de leur dispositif technique, le processus d'innovation n'est pas accompli. Il est donc nécessaire de savoir quel type de filière placer dans la baie de St brieuc mais également à quel endroit les placer, et à quel moment. A ce propos, ce que nous appelons rapport pratique au monde est bien illustré par cet exemple. Ce rapport pratique peut fort bien passer par des hypothèses et des théories, par des cartes de la baie et des indicateurs. In fine, ce qui détermine le succès de l'opération est de placer les filières appropriées au bon endroit au bon moment.

De l'innovation à la technologie

Comment passe t-on de l'innovation à la technologie ? En première approximation, on peut définir la technologie comme la science collective d'un objet technique, composé d'une 'famille de méthodes permettant d'associer et de canaliser d'autres entités et forces, humaines et non humaines. C'est une méthode, une méthode singulière, pour guider l'ingénierie hétérogène, pour la construction d'un système relativement stable de pièces assemblées possédant certaines propriétés émergentes au sein d'un environnement hostile ou indifférent' (Law 1987, p. 115). Si l'innovation requérait un mouvement de contraction, de pliage de l'espace technologique au sein d'un espace d'innovation très localisé, la généralisation suppose un mouvement inverse, d'expansion, de dépliage de l'innovation au sein de l'espace technologique global. Comment un ordre local peut-il gagner la société dans son ensemble ?

La réponse tient dans la différence fondamentale existant entre rapport de production et rapport d'utilisation. Comme le notent Bijker et Law (1992), dans la plupart des situations, nous utilisons les objets et les outils qui nous environnent comme des boîtes noires : quelqu'un d'autre dans la société les a conçues, les a stabilisées, a imaginé ce que nous pourrions en faire, a créé une interface utilisateur nous permettant d'utiliser cet objet dans une multitude de situations sans avoir à le démonter, à le transformer, à le produire, ni pire encore à l'inventer. S'il fallait ne serait ce que pénétrer les conditions de production de la plupart des objets que nous utilisons quotidiennement et qui nous permette de nous consacrer pleinement à certaines activités comme le travail, les loisirs, l'éducation des enfants, le travail domestique, nous nous trouverions guère plus avancés que l'homme des cavernes. Allumer un feu sans briquet et sans allumettes, comme le savent bien les fumeurs s'étant trouvés dans ce type de situation, amène rapidement à méditer sur l'utilité de ces multiples petits objets peuplant notre vie quotidienne, et pousse à devenir créatif sur une stratégie de substitution. L'usage d'un briquet prêt à l'emploi ne décuple pas seulement mes capacités, il économise pour la société, par l'approfondissement de la division du travail –spécialisation et intégration–, des compétences et des ressources pour la société. C'est souvent dans les situations de défaillance que la conscience affleure. Mais la plupart du temps, nous n'y prêtons même plus garde "*Most of the time, most of us take our technologies for granted. These work more or less adequately, so we don't inquire about why or how it is they work. We don't inquire about the design decisions that shape our artifacts. We don't think very much about the ways in which professional, political, or economic factors may have given form to those designs – or the way in which they were implemented in practice. And even when our technologies do go wrong, typically, our first instinct is to call the repair person. There are*

⁴⁸³ Entretien Direction Technique, siège de F. Steel, Paris janvier 1996.

*routine methods for putting them right : it doesn't occur to us to inquire deep into their provenance ()
The conduct of daily life surely demands a tactical lack of curiosity !"(Bijker et Law, 1992, p.2).*

S'il est rationnel pour l'utilisateur de ne pas s'interroger en permanence sur ses pratiques, il revient à l'analyste, à l'inverse d'éclairer l'économie de ces pratiques : dans quelle mesure sont-elles rendues possibles et en quoi trouvent-elles une forme d'efficacité pratique? Dans la suite, nous allons donc nous intéresser aux mécanismes par lesquels des objets techniques comme l'automobile, le convertisseur Bessemer ou le briquet, mis au point d'abord en un point de l'économie par un innovateur, en sont venus à être utilisés de façon routinière par une multitude d'agents économiques, ignorant imperturbablement les méandres du processus de création et de généralisation ayant contribué à inscrire l'objet technique dans la société.

Dans la suite, nous proposons un modèle conceptuel destiné à penser la dynamique par laquelle une innovation localisée se généralise au sein d'une société, en s'inscrivant dans des territoires économiques qu'elle contribue à former. Le chapitre est articulé autour de deux sections. Notre première section sera consacrée à la formulation d'un cadre exploratoire permettant de décrire le processus de généralisation des innovations et leur relation avec la dynamique des espaces technologiques. La seconde section proposera une analyse du processus d'investissement sous-jacent à la généralisation, et aboutissant à la constitution d'irréversibilités et de territoires économiques.

IA Innovations singulières et généralisation

Que se passe-t-il après que les acteurs de l'entreprise aient mis en œuvre leur projet et qu'une première installation, une première version de la fonction de production nouvelle se soit matérialisée, qu'une première série de produits ait été délivrés ? Sans réduire abusivement la variété des situations de généralisation, est-t-il possible de fournir un cadre analytique articulant les moments clés du processus par lequel une création technologique localisée déborde son contexte de départ et se répand dans la société ?

Dans un article où il cherche à modéliser les relations entre conception et diffusion, Callon met le doigt sur une question sensible: "Comment donner un sens à cette étrange expression: population d'adopteurs potentiels?" (Callon, 1992). L'idée de population d'adopteurs potentiels rejoint largement celle de 'milieu'. Dans ce modèle, l'objet technique ou l'information est transféré(e) d'un milieu à un autre par l'opération de la diffusion (Latour 1986). Nous avons montré que ce processus demeure en fait très obscur (chapitre 1). Des travaux récents ont cherché, alternativement, à situer la dynamique de diffusion à partir de la qualification des liens dynamiques au sein d'une population d'adopteurs (David 1992, David et Foray 1994, Dalle 1995).

Dans la suite nous proposons de considérer le modèle de la diffusion comme un cas limite, celui du marché pur et parfait: aucune question ne se pose plus sur les qualités des biens échangés, sur l'identité des producteurs et des consommateurs, sur le lieu et les modalités de l'échange. Le modèle de diffusion met en présence un offreur et un consommateur parfaitement rationnel dans une relation symétrique d'échange d'un bien contre sa valeur monétaire. Pour des raisons largement évoquées dans les lignes précédentes, ce cas ne peut être au mieux qu'un cas limite de la création technologique: il

s'applique nettement plus volontiers à des situations de production routinières. Se pose alors la question de toutes les situations ne s'inscrivant pas dans le cadre d'un marché pur et parfait. Comment un certain nombre d'adopteurs ont-ils connaissance de l'existence d'une innovation? Comment identifient-ils celle-ci? Comment déterminent-ils si cette innovation présente ou non un intérêt dans leur contexte particulier? Quelle type de relation établissent-ils avec les producteurs et avec d'autres utilisateurs?

L'approche proposée ici consiste à considérer que la 'diffusion' d'une technologie prend place dans un réseau ou un espace d'acteurs en interaction ⁽⁴⁸⁴⁾ (Carlsson 1995, Edqvist 1997, Lundvall 1993). Les déplacements de l'objet technique correspondent à sa 'circulation' entre des acteurs mis en relation. Dans cette approche, il est aussi essentiel de caractériser la construction d'un réseau ou d'un espace, et de qualifier les relations établies entre les acteurs de ce réseau que de qualifier l'objet technique en lui-même: la qualification de l'objet technique est indissociable de la construction d'un réseau producteurs- utilisateurs (Lundvall 1988). Lundvall (1988) explique ainsi que les formes prises par *les marchés* peuvent être extrêmement variables: le marché pur correspond selon l'auteur à une configuration très particulière dans laquelle "*the product is simple, its use-value characteristics changing but slowly, and the expenditure for its procurement forms a negligible part of the user's budget*" (Lundvall 1988, p. 353). Il prône la solution du marché organisé autour des relations utilisateur- producteur. Autour du concept de système national d'innovation s'est récemment organisé une réflexion poussée sur l'importance des relations entre acteurs (principalement des firmes et des institutions publiques dans ces écrits) dans la genèse, la diffusion et l'utilisation technologique: Carlsson évoque ainsi le concept de *technological system* "*defined as a network of agents interacting in a specific economic/industrial area under a particular institutional infrastructure or set of infrastructures and involved in the generation, diffusion, and utilization of technology*" (Carlsson 1995, p. 49).

Les acteurs constituent un 'monde commun', forgent une représentation collective de l'objet technique, de ses performances relatives, de sa valeur. Ils classent celui-ci dans les catégories plus larges d'un espace technologique en le mettant virtuellement en rapport avec d'autres objets techniques jugés équivalents. C'est à ce prix que l'on peut parler avec Arthur de 'technologies concurrentes'. Sans un laborieux travail de mise en relation, d'identification, de jugement collectif, de

⁴⁸⁴ Lundvall BA. (1988) "Innovation as an Interactive Process" in: Dosi et Alii (eds) *Technical Change and Economic Theory*, Pinter Pub.; Lundvall (1993); Lundvall (1992); Carlsson, B. (1989); Carlsson et Al. (1992); Carlsson, B.(ed) (1995); Callon (1991); (Callon 1992). L'ensemble de ces auteurs ont montré le rôle essentiel des relations établies entre acteurs, et en particulier le rôle de la qualité des liens établis avec des utilisateurs performants dans le développement et la diffusion des innovations. La diffusion ne s'effectue pas dans un vide socio-économique. Elle dépend étroitement de la qualité d'un tissu de relations économiques. Lundvall parle d'espaces d'interaction. Maurice et Alii (1993) parlent d'espaces d'innovation, d'organisation et d'espace industriel. Carlsson et Jacobsson parlent de réseaux de compétences et de connaissances. Callon de réseaux technico-économiques. A ce stade, les convergences nous importent plus que les divergences: toutes ces approches ont montré que la diffusion ne se déroule pas dans un vide socio-économique.

classement, de représentation de l'objet et de ses qualités, le marché ne peut exister. Cette position permet de comprendre le lien indéfectible existant entre coopération et compétition, pensées en termes manichéens par l'économie traditionnelle comme deux termes strictement antagonistes.

Alors que la création technologique consistait en un mouvement de pliage, de représentation (Callon 1986), de contraction de la société au sein d'un espace localisé, nous proposons de concevoir la généralisation comme un mouvement de dépliage, d'extension, de projection de l'objet technique au sein de l'économie. Alors que l'espace d'innovation fournissait un cadre d'action contrôlable et manipulable par les acteurs de l'innovation, la généralisation se déroule dans un cadre d'action étendu, dans lequel l'innovation, et le processus d'investissement, échappent en partie à ses créateurs pour devenir une ressource collective (Latour 1989).

Il est possible de représenter la généralisation comme la constitution de zones concentriques, de territoires de plus en plus large dans lequel l'innovation localisée de départ trouve à s'inscrire dans des systèmes plus ou moins complexes, dans des interdépendances plus ou moins nombreuses et hétérogènes, dans des sphères plus ou moins distantes de son lieu de création.

Nous proposons d'analyser et de décrire ce processus d'expansion à partir de trois moments analytiques clés : *l'appropriation*, *la généralisation*, et *l'extension*. *L'appropriation* représente le moment essentiel où l'initiative passe aux utilisateurs, jusque là virtuellement représentés, de l'objet technique. Dans cette épreuve critique se joue l'avenir de l'objet technique, la confrontation des espérances des concepteurs à la réalité du contexte de son fonctionnement réel. La tension fondamentale peut souvent se résumer à une question simple et pratique : est ce que ça tient, est ce que ça marche conformément aux attentes ? Sur la base de cette épreuve de réalité s'organise alors la *généralisation* à partir d'une épreuve de *qualification* de l'objet technique, de représentation collective de ses qualités et de ses performances passées et futures, et de *l'inscription* d'une variété de représentations au sein de contextes divers. *L'inscription* constitue alors une projection de l'objet technique et de ses qualités dans l'espace et dans le temps, dans des territoires économiques, à travers la formation d'anticipations et l'articulation de plans d'action correspondant. *L'extension* constitue la dernière étape de ce processus d'expansion. L'activité industrielle s'organise autour des objets techniques accomplissant une théorie technologique unifiée fournissant un cadre de référence collectif.

1) Appropriation de la solution technique

De même que Mansfield a procédé à un glissement sémantique concernant le concept d'imitation, nous proposons de faire glisser le sens traditionnel du concept d'appropriation du monde des innovateurs et des producteurs, au monde des utilisateurs.

Tout espace d'innovation repose sur la *simplification* d'un monde qui ne l'est pas. L'objet technique est le fruit de ce milieu favorable à son élaboration. Mais pour se généraliser, il doit sortir de l'univers qui l'a produit, et gagner une autonomie par rapport aux acteurs de l'innovation. Il doit être reconnu comme un instrument utile par d'autres acteurs, c'est à dire *approprié* par eux. Il doit transformer les réseaux existants pour y trouver son efficacité.

Toute innovation formule une série d'hypothèses sur sa production et son usage futur. Les utilisateurs et producteurs se trouvent directement impliqués, ou sont représentés sous des formes diverses dans les espaces d'innovation (Akrich 1995⁴⁸⁵). Mais la mise en circulation de l'objet technique est souvent l'occasion pour les utilisateurs et les producteurs réellement impliqués de contester les *compétences* et les *rôles* qui leur ont été attribués.

L'expression de cette tension fondamentale entre hypothèses et réalité est mise en scène, dès les premières étapes suivant la réalisation de l'objet technique, à travers *la prise en main* de l'objet technique par ses premiers utilisateurs. Comme l'a souligné Von Hippel (Von Hippel 1986, 1988⁴⁸⁶), la détermination de ces premiers utilisateurs constitue une variable stratégique pour les concepteurs : c'est l'art de choisir les bons *portes-parole* (Akrich et Alii 1988), les bons *lead-users* (Von Hippel 1986). Les acteurs de l'innovation sélectionnent le plus souvent quelques représentants dont les réactions et les relations peuvent être contrôlées : que ce soit le choix d'un site d'implantation d'une première installation, dans le cas de procédé comme l'injection de charbon, ou de populations ciblées dans le cas du lancement limité d'une série de produits à petite échelle. Cette première mise à l'épreuve, son suivi, et les accommodements qui en résultent assume un rôle éminent dans la généralisation d'une innovation

1.1) Prise en main par les utilisateurs

Akrich a très clairement délimité ce phénomène à travers les concepts d'*inscription* et de *scénario*: "*Par la définition des caractéristiques de son objet, le concepteur avance un certain nombre d'hypothèses sur les éléments qui composent le monde dans lequel l'objet est destiné à s'insérer. Il propose un script, un scénario qui se veut prédétermination des mises en scène que les utilisateurs sont appelés à imaginer à partir du dispositif technique et des pré-scriptures (notices, contrats, conseils..) qui l'accompagnent*" (Akrich, 1987, p. 52⁴⁸⁷).

⁴⁸⁵ Akrich, M. (1995) "User's representations: practices, methods and sociology" in: Rip, A, Misa, T. Schot, J. (eds) : *Managing Technology in Society*. Cambridge UP.

⁴⁸⁶ Von Hippel, E. (1986) "Lead Users: A Source of novel Product Concepts" in: *Management Science*, Vol. 32, n°7, July 1986, pp. 791-805. Von Hippel, E. (1988) *The Sources of Innovation*. Oxford UP.

⁴⁸⁷ Callon, M. et Latour, B. (1981) "Unscrewing the big Leviathan: how actors macro-structure reality and how sociologists help them to do so" in: Knorr-Cetina, K., Cicourel, A. (eds) *Advances in Social Theory and Methodology: Toward an*

La généralisation se trouve, dans une mesure que nous allons nous efforcer de définir, pré-inscrite dans l'espace d'innovation. Les efforts de problématisation- simplification impliquent un travail de représentation. L'objet technique représente la prise en charge d'un problème repéré dans un espace technologique. L'espace technologique se trouve plié dans le travail innovatif. L'espace d'innovation s'efforce de proposer un dépassement, une reformulation incontournable de l'espace technologique dans lequel il s'inscrit. L'engagement scelle le sens de cette représentation en l'inscrivant dans un contexte organisationnel. La mise en projet consiste ainsi à donner un visage plus défini aux utilisateurs, aux producteurs, à l'objet technique. Il délimite le cadre de leurs interactions, et en particulier le niveau et la forme de l'implication des producteurs et des utilisateurs dans le processus d'innovation. Il désigne le lieu et les acteurs de la prise en main de la première installation, dans laquelle se confrontent les logiques d'innovation et d'usage de la technologie naissante.

Pourtant, considérer la dynamique de généralisation du strict point de vue des acteurs de l'innovation revient à adopter sans discussion leurs *simplifications* et les *traductions* et *équivalences* qu'ils cherchent à inscrire dans la société: "*Dans cette perspective, dès que l'objet technique devient objet de consommation ou objet d'utilisation, il cesse d'intéresser l'analyste qui ne voit dans l'utilisateur que le prolongement non problématique du réseau constitué par l'innovateur. Autrement dit, cette analyse a certes redonné de l'épaisseur aux objets, mais cela, au détriment des acteurs qui s'en saisissent*" (Akrich, 1993, p. 36).

Il est indispensable de retrouver ce point de vue pour comprendre la dynamique de l'espace d'innovation. Il est tout aussi indispensable d'observer sa confrontation avec d'autres points de vue lors de la généralisation. Akrich (1993) a indiqué les limites d'une approche de l'utilisation comme prolongement ou déroulement de l'innovation: "*En privilégiant la continuité et la transparence des espaces de circulation que suppose l'idée du réseau, la sociologie des techniques s'est rendue passible d'une critique qui lui est souvent opposée, à savoir que ses modèles d'acteurs et d'action sont pauvres*" (Akrich, 1993, p. 37). En d'autres termes, si l'analyse en termes d'espace d'innovation convient au traitement des objets en train de se faire, elle aborde péniblement celle des objets faits, autonomes, 'qui tiennent', lesquels constituent une autre facette de la réalité.

Les acteurs du contexte, spécifiquement les utilisateurs, peuvent refuser le rôle qui leur est attribué: Renault peut fort bien proposer un avenir automobile ne passant pas, malgré les prédictions

Integration of Micro and Macro Sociologies. Routledge. Pp. 277-303.; Latour, B. et Woolgar, S. (1979) *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts*. Princeton UP. Akrich, M. (1987) "Comment décrire les objets techniques?" in: *Techniques et Cultures*, n°9, pp. 49-64.

d'EDF, par la voiture électrique (Callon et Latour 1981⁴⁸⁸). Le contexte d'utilisation peut se révéler plus complexe qu'il n'avait d'abord été anticipé (Akrich 1989⁴⁸⁹). Les utilisateurs peuvent profondément modifier l'objet technique ou le rejeter (Rosenberg 1982, Maurice et Alii 1986, Akrich 1992, 1993⁴⁹⁰).

Le passage de la conception à l'usage constitue donc une épreuve fondamentale dans la qualification progressive de l'objet technique: elle articule des "*mécanismes par lesquels se réalise le renversement caractéristique d'une action réussie, qui réattribue à l'acteur la paternité de l'action tout en ramenant son rapport au dispositif technique à une relation instrumentale.*" (Akrich, 1993, p. 55).

1.2) Espace d'innovation et représentation

L'ouverture d'un espace d'innovation correspond à la mise en place d'une problématisation mettant en relation virtuelle une série d'acteurs. Elle s'appuie en particulier sur la définition d'utilisateurs potentiels, mis virtuellement en réseau, et intéressés à la résolution d'un problème. L'objet technique est censé prendre en charge le problème intéressant les utilisateurs et y apporter une solution. Dans sa constitution même, dans sa forme, il incorpore une certaine représentation des utilisateurs –scénario (Akrich 1987, Latour 1989), et est porteur d'une certaine validité – ie il vise une population ciblée. A travers la *représentation* (Callon 1986), dont les modalités au sein du processus de création technologique peuvent être plus ou moins fictives (Akrich 1995), les concepteurs anticipent donc sur les conditions d'usage de l'objet technique et sur l'*utilité* – formulé sous forme d'*intérêt* (Callon 1986)- que pourront en retirer les utilisateurs. Akrich montre l'étroite correspondance tissée entre caractéristiques de l'objet technique un script incorporé dans l'objet technique (inscription d'hypothèses sur son contexte de fonctionnement): "*L'objet technique définit des acteurs, l'espace dans lequel ils se meuvent et () des relations entre ces acteurs. Mais ils font plus que cela: ils donnent une mesure de ces relations, établissent des hiérarchies, définissent des normes*". (Akrich 1987, p. 56).

⁴⁸⁸ Callon, M., Latour, B. (1981) "Unscrewing the Big Leviathan: How Actors Macrostructure Reality and How Sociologists Help Them to Do So" in: Knorr-Cetina, K., Cicourel, A. (eds) *Advances in Social Theory and Methodology: Towards an Integration of Micro and Macro Sociologies*. Routledge. Pp. 277-303.

⁴⁸⁹ Nous avons déjà cité l'exemple proposé par Akrich dans le cas d'une machine agricole au Nicaragua, et la destabilisation d'un système technique patiemment construit par la présence inopinée d'un parasite, venu d'un bosquet de bambou situé à la lisière du champ expérimental. Akrich, M. (1989) "La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques." In: *Anthropologie et Sociétés*, Vol 13, n°2, 1989, pp. 31-54.

⁴⁹⁰ Akrich, M. (1992) "The Description of Technical Objects" in: Bijker, W., Law, J. (eds) *Shaping Technology/ Building Society: Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press. Pp. 205-240.; Akrich, M. (1993) "Les objets techniques et leurs utilisateurs. De la conception à l'action." In: Conein, B.; Dodier, N.; Thévenot, L. (eds) *Les objets dans l'action: de la maison au laboratoire*. EHESS. Pp.35-57.

La mise en place d'un espace d'innovation passe par un exercice de *traduction* et de *représentation* (Callon 1986, Akrich et Alii 1988). *La problématisation* constitue une étape fondamentale de sélection, de délimitation de frontières entre représentants et représentés. Elle désigne les acteurs de l'innovation comme les porte-parole d'un univers, d'un contexte plus large. *La simplification* constitue une étape de mise en équivalence aboutissant à la définition progressive de caractéristiques de l'objet technique. Les caractéristiques de l'objet technique sont le fruit de certains arbitrages et associent certains acteurs. L'engagement et sa forme dotent les acteurs d'une épaisseur organisationnelle. Elle s'accompagne d'une inscription de l'innovation dans les réseaux existants et contribue à en délimiter la généralité et la validité. La mise en projet qui en résulte contribue à déterminer les conditions de production et d'utilisation de l'innovation. Elle délimite en particulier les modalités de l'implication des utilisateurs, leur identité concrète, et dans le même temps, contribue à définir leur représentativité. Cette implication peut remonter plus ou moins vers les conditions de production de l'artefact. Elle s'inscrit largement dans les caractéristiques physiques de l'objet technique, plus ou moins rigidifiées, prenant en considération plus ou moins en détail le contexte de l'utilisation.

Callon (1992) a mis en valeur l'importance du travail de *traduction* intervenant dans la mise en place d'un espace d'innovation. Ce travail a pour effet d'établir un réseau de 'représentants' et de 'représentés', mis en équivalence. Lorsque ce travail réussit, il permet l'extension rapide de l'espace d'innovation et la circulation d'une série d'objets 'intermédiaires' et d'instruments créés dans le contexte innovatif à un réseau plus large d'acteurs.

Un modèle de déroulement de l'innovation fondé sur la représentativité a pourtant toutes les chances d'être trompeur. Ainsi que nous l'avons souligné, la mobilisation d'acteurs et de ressources convoqués dans l'espace d'innovation transforme ces acteurs et ces ressources, elle les spécifie et les localisent. Leur représentativité est donc altérée par le processus même de création technologique.

Lorsque l'objet est constitué, le prototype achevé, la première installation prête à l'emploi, le processus n'est pas achevé, loin s'en faut. Pour se diffuser, il ne suffit pas à l'objet technique de correspondre à la mise en relation de matières, d'acteurs et de produits. Il doit encore passer une série d'épreuves dont il sortira largement transformé ou abandonné, épreuves d'appropriation visant à l'instrumentalisé, autrement à en faire un bien.

Or cette instrumentalisation ne se passe jamais comme prévu. Il n'est pas faut de dire que les conditions d'usage de l'objet technique dans les situations d'innovation sont imprescriptibles. Akrich et Alii (1988) ont noté que la fidélité de la représentation ne peut être parfaite : le traducteur, le porte – parole aussi plein de bonne volonté soit-il trahit toujours la diversité et la complexité des points de

vue. Plus largement, les travaux des ergonomes ont montrés que la complexité des situations de travail, aussi soigneux que soit le travail de conception, ne peut jamais être parfaitement prévu (Durafour et Alii 1988). Y compris dans les situations où les représentants des utilisateurs ont été pertinemment sélectionnés, et où les conditions de leur implication dans le processus de conception ont été bien instrumentées, les conditions d'usage ne peuvent être parfaitement représentées et prises en compte. Même si la représentation est parfaite, et que les utilisateurs sont compétents dans l'expression de leurs besoins, ils ne peuvent pas l'être totalement dans l'expression d'anticipations de leurs besoins.

Enfin, les acteurs représentés conservent toujours une capacité d'action, une autonomie inaliénable (De Terssac 1992), sans laquelle précisément l'opération d'instrumentalisation ne saurait avoir lieu : pour fonctionner, l'objet technique doit être *approprié*, c'est à dire avoir subi une appropriation. L'*appropriation* est susceptible de profondément transformer les caractéristiques de l'objet technique sur certains points, ou même, dans les cas les plus dramatiques, d'aboutir au rejet pur et simple, à l'échec de l'innovation.

1.3) Appropriation

“L'objet technique ne peut pas plus être confondu avec un dispositif matériel qu'avec l'ensemble des usages “remplis” par ce dispositif: il se définit très exactement comme le rapport construit entre ces deux termes” ⁽⁴⁹¹⁾.

Le scénario se déroule rarement comme prévu. Les échecs ne sont pas rares en matière d'innovation, à l'occasion, à l'inverse, les performances peuvent dépasser les attentes. L'économie s'est beaucoup intéressé aux décisions, et l'usage et son importance, sont demeurées partiellement dans l'ombre. Or les usages de caractérisent par une forte hétérogénéité, en fonction des contextes dans lesquels ils se déroulent (Eyraud et Alii 1989), et ils sont fréquemment créatifs : aussi échappent-ils régulièrement aux anticipations des concepteurs. Les utilisateurs s'approprient l'objet technique en transformant leur fonction de production, mais aussi, bien souvent, en modifiant l'objet technique lui même, pour l'adapter à leurs besoins particuliers. A partir de son travail sur le marché des véhicules d'occasion, Akerlof (Akerlof 1970) nous rappelle que cette différenciation des usages se traduit par des différences de qualité et de performance dans le domaine des véhicules d'occasion. Comme le souligne Akrich (1993), il s'agit de restituer aux utilisateurs une capacité d'action et de décision, en renversant la perspective de la conception.

⁴⁹¹ Akrich, M. (1987) “Comment décrire les objets techniques?” in: *Techniques et Cultures*, n°9, pp. 49-64.

La position que nous défendons ici à de quoi suprendre. Nous affirmons que les utilisateurs, et en particulier les premiers utilisateurs font subir une profonde transformation à l'innovation. Il s'agit de considérer les utilisateurs non comme de simples 'consommateurs', dont la seule latitude consisterait à effectuer un choix d'allocation budgétaire entre des produits figés, mais comme de véritables acteurs, intervenant sur l'innovation et sur sa définition. Ceux-ci consentent un effort d'articulation du nouvel objet technique et de son contexte spécifique, intégrant ce que Maurice et Alii (1986) ont nommé le '*nouvel espace de travail*', le déplacement de l'innovation au sein d'un espace productif, l'inscription de l'objet technique au sein d'un contexte d'action finalisé : "c'est précisément à cet endroit que se joue l'efficacité d'un objet technique, dans ce clignotement incessant entre 'intérieur' et 'extérieur'" (Akrich 1987, p. 51).

Ce temps d'ajustement, nécessairement éphémère, a été repéré par les industriels sous le terme de 'montée en cadence', dont Charrue et Midler ont montré qu'ils constituaient des dynamiques d'apprentissages essentielles à la performance productive (Midler & Charrue 1992⁴⁹²). Les utilisateurs opèrent un retournement, un détournement essentiel à l'objectivation de l'innovation. Ainsi que le souligne Latour (1989), pour se diffuser, l'innovation doit échapper à ses concepteurs. Les utilisateurs déplacent, mettent en mouvement, transforment l'innovation en objet en l'intégrant dans un contexte technico-économique dont il devient un élément parmi d'autres. Alors que les acteurs de l'innovation ont construit un espace d'innovation contextualisant les utilisateurs, ces derniers renversent la perspective "*ce sont les réactions des utilisateurs qui donnent un contenu au projet du concepteur, de même que l'environnement réel de l'utilisateur est en partie spécifié par l'introduction d'un nouveau dispositif*" (Akrich 1987, p. 52).

Les études menées dans certains pays du tiers monde par Akrich (1987, 1989) possèdent l'intérêt de décrire la mise en relation d'un objet technique s'accompagnant de la mise en place de réseaux et d'espaces sociaux ad hoc. Dans le cas d'innovations mises en place dans le cadre d'entreprises industrielles, comme dans le cas PCI, l'articulation conception - usage est généralement moins spectaculaire, dans la mesure où les relations entre concepteurs et utilisateurs sont déjà relativement construites et médiatisées. Les travaux de Maurice et Alii (1986, 1988) ont cependant bien montré le travail d'appropriation entourant l'implantation d'une innovation dans les entreprises industrielles.

Dans leur travail sur l'implantation de machines outils à commande numérique au sein de PME, Eyraud et Alii (1986, 1989⁴⁹³) ont étudié ce qu'ils ont nommé le processus d'*appropriation*,

⁴⁹² Charue, F. & Midler, C. (1992) "Mutations industrielles et apprentissage collectif" in : Terssac, G., Dubois, P. (Dir.) *Les nouvelles rationalisations de la production*. Cépaduès Ed. pp. 187-225.

⁴⁹³ Eyraud, F., D'Iribarne, (d')A., Maurice, M., Rychener, F. (1986) Des entreprises en mutation dans la crise – apprentissage des technologies flexibles et émergence de nouveaux acteurs. LEST-CNRS

concept que nous leur empruntons ici, conçu comme un processus d'apprentissage collectif organisé autour de la mise en place d'un nouvel outil. Les auteurs décrivent en détail les stratégies et les négociations menées par les différentes catégories d'acteurs des entreprises pour mettre en place une nouvelle division du travail permettant de faire fonctionner le nouvel outil, tout en préservant, dans la plupart des cas, les hiérarchies institués entre groupes d'acteurs. Les auteurs soutiennent ainsi que l'objet technique est approprié de manière singulière en fonction du contexte socio- organisationnel dans lequel il est inséré. Eyraud et Alii analysent l'enjeu représenté par la formation de nouvelles compétences, impliquées par le fonctionnement de l'objet technique, et les jeux des groupes sociaux destinés à s'approprier les connaissances, et à être identifiés comme les dépositaires de certains savoir et savoir faire de production. Les auteurs montrent l'importance de cette appropriation sur les usages développés autour des objets techniques et leur efficacité productive.

La prise en main par les premiers utilisateurs constitue donc un effort d'alignement des objets techniques et de leurs contextes de fonctionnement. Elle constitue une étape fondamentale de confrontation des représentations et de l'action. En fonction de l'autonomie des utilisateurs, de leur capacité à intervenir sur l'objet pour l'adapter, de leur capacité à négocier directement avec les producteurs de l'objet technique, les mode de règlement des tensions peuvent se révéler totalement différents. L'appropriation mène à l'identification d'écarts, de problèmes, de 'bugs' pouvant justifier des accomodements, de bricolage (Maurice 1988⁴⁹⁴) plus ou moins importants et plus ou moins larges (Stiglitz 1987⁴⁹⁵). Dans un article récent, Von Hippel et Tyre se sont spécifiquement intéressés à ces phénomènes, nommés learning by doing (⁴⁹⁶), qu'ils ont étudié systématiquement et en détail. Ces auteurs désignent sous le terme de *précipitation* la révélation d'écarts entre conditions d'usage et fonctionnement de l'objet technique dont il soulignent le caractère imprévisible : *"Here, two very different and highly complex patterns, the new machine and the plant context, are brought in close juxtaposition during field use : 'doing'. As a result, previously unsuspected and often subtle interferences are discovered because they evoke an obvious symptom, poor machine performance"* (⁴⁹⁷).

Il est possible d'étendre les conclusions des travaux portant sur l'appropriation, au delà de la dimension compétence, à l'ensemble du contexte d'implantation de l'objet technique : contexte matériel, contexte technique, contexte économique, contexte social, contexte cognitif etc, impliqués

⁴⁹⁴ Maurice, M., Mannari, H., Takeoka, Y., Inoki, T. (1988) Des entreprises françaises et japonaises face à la mécanique. Acteurs et organisation de la dynamique industrielle. LEST-CNRS

⁴⁹⁵ Stiglitz, J. (1987) "Learning to learn, localized learning and technical progress". In : Dasgupta, P. et Stoneman, P. (eds) *Economic Theory and Technology Policy*, op cit.

⁴⁹⁶ Par rapport au concept créé par Arrow (1962) op cit. cette appellation est abusive, car elle couvre plutôt, chez Von Hippel et Tyre, les interactions entre concepteurs- producteurs et utilisateurs.

⁴⁹⁷ Von Hippel, E. & Tyre, M. (1995) "How learning by doing is done : problem identification in novel process equipment" in : *Research Policy*, Vol. 24, pp.1-12.

par le fonctionnement localisé et spécifique de l'objet technique, son inscription dans une fonction de production concrète.

1.4) Ca tient ! Ca marche !

Ainsi que le notent Von Hippel et Tyre (1995), le symptôme par excellence faisant l'objet d'une attention scrupuleuse de la part des utilisateurs est la performance de la machine par rapport aux anticipations. Si l'objet technique fonctionne bien dans son environnement, c'est à dire de façon stable, prédictible, reproductible, y compris lorsque les acteurs n'en identifient pas les raisons, l'économie des pratiques indique qu'ils s'en satisfont le plus souvent (Rosenberg & Vincenti 1978).

Dans le registre des pratiques, le fait qu'un objet 'tienne' ou 'marche' lui fait franchir un cap tout à fait essentiel : le cap de l'instrumentalisation. Comme nous le contait admirablement un ingénieur :

“le plus important c'est que ça ait fonctionné - je m'entends -peu importe la technologie du moment qu'elle marchait hein, le pas important c'était de faire avancer l'objectif injection de charbon, de voir un Hf en France, avec nos lits de fusion, avec nos ingénieurs, se convaincre que c'était faisable, que sur le plan de l'exploitation c'était gérable, que s'il y avait des pannes, on savait s'en sortir, et que ça perturbait pas la marche des hf et les résultats d'exploitation, toutes ces choses là étaient très importantes. ”. (498).

Law (Law 1987) propose une interprétation de ce phénomène en terme de réseau. L'auteur souligne que l'objet technique, sa forme, sa stabilité, dépendent des interactions engagées entre des éléments hétérogènes. Selon l'auteur, le processus d'innovation peut être assimilé à un effort pour faire tenir ensemble ces différents éléments – concept *d'heterogeneous engineering*. Il note : *“Elements in the network prove difficult to tame or difficult to hold in place. Vigilance and surveillance have to be maintained, or else the elements will fall out of line and the network will start to crumble. The network approach stresses this by noting that there is almost always some degree of divergence between what the elements of a network would do if left to their own devices and what they are obliged, encouraged, or forced to do when they are enrolled within the network () it is itself nothing other than a set of channeled forces and associated entities. Thus, there is always the danger that the associated entities that constitute a piece of technology will be dissociated in the face of stronger and hostile system” (499).*

⁴⁹⁸ Entretien Direction Technique, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

⁴⁹⁹ Law, J. (1987) “Technology and heterogeneous Engineering : The Case of Portuguese Expansion” in : Bijker, Hughes, Pinch (eds) *The Social Construction of Technological Systems*. Op. cit. pp. 111-134.

Mais le point le plus important pour nous est que l'instrumentation réussie, le fait que 'ça tienne', correspond à ce qui a parfois été désigné sous le terme de *closure* (Bijker et Alii 1987), c'est à dire le moment où de réversible, l'objet technique s'irréversibilise, validant l'investissement innovatif, et devient une boîte noire, c'est à dire, un élément mobilisable, hybridable, une cible possible pour les stratégies d'accumulation et d'investissement d'autres agents économiques.

A l'inverse, si le moteur prend feu au milieu du navire (Hard 1994) ou si les premières brames coulées dans les convertisseurs se fendent (Misa 1992) l'innovation n'a plus qu'à rentrer dans ses cartons : Bessemer a été amené à rembourser 32 500 £ à ses premiers utilisateurs mécontents, ce qui a bien failli lui coûter sa fortune, du fait que le minerai utilisé par ces derniers était phosphoreux. A l'époque, le lien entre le minerai et la défaillance des brames n'a pas été compris, et c'est l'objet technique dans son ensemble qui s'est trouvé disqualifié.

2) Disponibilité de la solution technique et généralisation

Comment une reconnaissance est-elle attribuée à cette solution technique localement constituée ? Comment les agents économiques en arrivent-ils à connaître les attributs économiques d'un bien et à forger une connaissance partagée de ce bien ?

Lorsqu'il marche, le processus d'appropriation transforme l'objet technique en solution technique correspondant au problème de départ. La boucle est bouclée, la prophétie accomplie, l'espace d'innovation et ses errements cèdent la place à la certitude des résultats obtenus. L'objet technique incarne son processus de création. Le monde virtuel de la création technologique s'est progressivement matérialisée, puis localement irréversibilisée. Les hypothèses formées ont été vérifiées et forment désormais une base à la production d'une théorie. Mais si les choses demeuraient en l'état, il n'y aurait pas à proprement parlé de généralisation.

Cette hypothèse ne peut pas être exclue. Le 'secret', dont Levin et Alii (1987) ont indiqué l'usage répandu dans l'industrie, n'est-il pas le signe de ce qu'aucune nécessité n'appelle à la divulgation, à la généralisation d'une innovation localisée ? Foray (1995) et Ordover (1991) montrent que les dispositifs de régulation de la propriété intellectuelle peuvent précisément être compris comme une incitation à divulguer, à rendre collective l'innovation, moyennant l'attribution d'une paternité, d'une priorité, d'une propriété, d'un droit de contrôle rémunérateur sur son usage. Cet aspect incitatif des droits de propriété intellectuelle, particulièrement marqué au Japon, amène à se poser la question de ce que nous avons nommé *la disponibilité* (cf Partie 1). Rappelons le rôle éminent joué par la *disponibilité* de la technologie dans la dynamique de l'espace technologique. Cette disponibilité

s'inscrit dans une double dimension, temporelle et spatiale. Elle conditionne les décisions d'adoption puisqu'elle correspond à l'univers des choix existants mobilisables par un adopteur à l'endroit où il se trouve, au moment où il prend sa décision.

Pour comprendre comment se construit la *disponibilité* technologique, nous proposons de distinguer l'objet technique concret localisé au sein d'une unité productive et les représentations, plus particulièrement les représentations écrites et graphiques de cet objet technique. Nous affirmons que la *disponibilité* suppose l'articulation étroite d'un objet technique localisé qui *tient*, et l'inscription de représentations multiples de cet objet et de ses qualités au sein de différents univers d'adopteurs, clamant la disponibilité de la technologie. Pour aborder cette question, et en proposer une conceptualisation, deux mécanismes seront présentés : *la qualification*, et *l'inscription* (- 'entrenchment'-Collins 1985).

L'approche de la disponibilité soulève une seconde question importante, celle de la *motivation* : ce qui pousse l'entrepreneur-innovateur à investir pour mettre son innovation à disposition d'autres acteurs ? Il existe deux séries de réponses classiques.

La première consiste à mettre en avant, selon un procédé conventionnel en économie, la recherche individuelle du profit, la rationalité économique. L'hypothèse posée est alors que l'innovateur investira si et seulement si les profits qu'il peut dégager dans le futur plus que compensent le coût de son investissement. Dans une économie de marché pur et parfait, la thèse du sous-investissement structurel proposé par Arrow (1962) s'applique à la disponibilité (plutôt qu'aux dépenses de R&D – Cohendet et Alii 1992).

La seconde réponse consiste à mettre en évidence les dispositifs institutionnels modifiant la rationalité des agents économiques. La rationalité consiste toujours en une recherche individuelle de profit, mais elle est contrariée, encadrée par un dispositif institutionnel d'incitation et de rémunération modifiant les calculs. Les droits de la propriété intellectuelle (Foray 1995), mais aussi les règles de fonctionnement des institutions et des organisations dans lesquelles les agents sont inscrits (Dasgupta et David 1994) déterminent *la motivation*. De ce point de vue, Cohendet et Alii (1992) proposent une réflexion intéressante sur le développement des accords de partenariat. Selon eux "*la diffusion apparaît surtout comme un processus volontaire (plus ou moins contrôlé) lorsque la règle de la réciprocité joue de manière régulière – selon un jeu répété à long terme*" (Cohendet et Alii 1992, p.71). Cette perspective est intéressante, car elle inscrit la motivation dans une forme d'*engagement* entre organisations (⁵⁰⁰), porté par une temporalité différente de celle de l'innovation. Si l'on y ajoute, la

⁵⁰⁰ Richardson définit l'essence des arrangements coopératifs entre firmes - '*some degree of obligation, - and therefore give some degree of assurance*' – with respect to their future conduct – d'une manière très semblable à la définition de

possibilité d'arrangements institutionnels hybrides permettant de contrôler l'étendue des transferts – théorie des clubs de Buchanan (1965) et logique de l'action collective de Olson (1970) – et fondé sur un ticket d'entrée représenté par les dépenses en R&D (Cohen et Levinthal), on se trouve en mesure d'expliquer comment en certaines circonstances peut se créer une dynamique *d'invention collective* (Allen 1983). Les pertes consenties par l'innovateur sont alors plus que compensées par les gains qu'il retirera, lorsqu'il sera à son tour dans une situation d'imitateur. La motivation est alors liée au *sens du jeu* et *des règles du jeu*, aux anticipations et aux perceptions des décideurs, tout autant qu'aux données 'objectives' de ce jeu, c'est à dire à la structure organisée de l'industrie et de la division du travail qui s'y opère (Richardson 1972, Joly et De Looze 1996).

2.1) Jugement de la solution technique et motivation

Selon la jolie formule de Richardson (1972) l'organisation de l'industrie répond à un double besoin de coordination, entre le développement technologique et l'exploitation de ces technologies. Quelles sont les raisons pour lesquelles une firme '*might not be content to seek the full exploitation of its development work through its own manufacturing activity*' (Richardson 1972, p. 893) ? D'où vient la motivation des innovateurs à faire connaître leur découverte ? Comment en arrivent-ils à cibler, à définir une population potentielle d'adopteurs ?

Dans la suite, nous proposons de considérer que la motivation se noue au confluent de deux influences: la singularité de l'innovation et son ancrage dans l'organisation et dans l'espace industriel. Le moment de l'évaluation finale constitue un temps privilégié de confrontation de ces deux influences. Deux points méritent d'être souligner. Premièrement, l'évaluation offre l'occasion d'un regard rétrospectif sur l'action innovatrice à partir de son résultat. Deuxièmement, elle permet aux acteurs de jeter un regard prospectif sur la motivation collective à généraliser l'innovation en interne et en externe. La représentation technologique permet aux acteurs de former des *anticipations*, d'inscrire l'objet technique dans une cohérence évolutive linéarisée, de repérer l'ouverture de territoires nouveaux, de calculer et d'effectuer des projections dans l'avenir.

Construction d'une rationalité ex-post

L'un des temps forts de la mise en projet est la programmation d'une évaluation finale. Sa forme est généralement organisée par la programmation, et correspond aux modalités définies par l'*engagement*. En d'autres termes, elle représente le terme du contrat tissé entre acteurs de l'innovation et acteurs du contexte. Le jugement rétrospectif exercé à cette occasion a donc pour vocation d'évaluer

l'engagement (présentée en partie 2). Voir Richardson, G. (1972) "The Organisation of Industry" in : The Economic Journal, septembre 1972, pp.883-896.

la rationalité de l'investissement consenti, la conformité des réalisations aux plans, le niveau de performance maîtrisée en rapport aux objectifs fixés. Il s'agit de clore l'activité innovatrice, de dissoudre l'espace d'innovation, de mettre un point final au contrat d'engagement. Pour ce faire, il s'agit de mettre en correspondance terme à terme anticipations et réalisations, la visée prospective de l'engagement et de la mise en projet à la visée rétrospective de la qualification.

Selon l'expression de Favereau (1989), l'incomplétude qui présidait inévitablement au choix innovatif trouve une forme de complétude ex-post par l'intermédiaire d'un rapprochement entre "*une procédure de contrôle ex-post, de la conformité des comportements successifs au cadre convenu de coopération, ex-ante*" (Favereau op cit.p. 296). Le principal se situe alors, théoriquement, de part cette double instrumentation ex-ante et ex-post, en position de contrôler le respect du contrat, de calculer l'efficacité de l'activité, la rémunération optimale des agents. La décomposition temporelle de la décision lui permet, en principe, d'exercer un jugement informé et rationnel. La mise en correspondance des deux termes, ex ante et ex post de l'instrumentation, permet aux acteurs de renouer avec une unité virtuelle de la décision, abstraite du processus et de l'espace d'innovation.

Le point d'ancrage essentiel de cette rationalisation ex-post est l'objet technique lui-même. Ainsi que l'a souligné Schelling (1960), l'objet technique est la preuve matérialisée, l'objet 'montrable' de la validité des formulations et anticipations, le point d'ancrage d'un accord entre acteurs – concepteurs, producteurs, utilisateurs, financeurs – ayant combinés leurs forces dans l'action. Du même coup, l'objet technique scelle une articulation entre ces différents acteurs.

Forme d'engagement, procédures d'évaluation et motivation à partager

Dans le cas de l'organisation, la forme de l'engagement fixe à l'avance une motivation 'organisée' à partager une représentation collective de l'objet technique. La dimension coopérative de l'organisation a été soulignée par Doeringer (⁵⁰¹) qui en déduit que les apprentissages collectifs y sont favorisés. Reste qu'en fonction des organisations considérées, les procédures peuvent varier considérablement, modifiant le caractère collectif de la représentation. Cela dépend en particulier des structures organisationnelles de décision stratégiques à long terme. Les catégories de co-ordination proposées par Richardson à propos de l'organisation de l'industrie nous semblent transposables aux relations usines- direction centrale: direction ordonnée autour d'un plan global, coordination coopérative de plans locaux, coordination spontanée de plans locaux.

⁵⁰¹ Doeringer, P. (1986) "Internal Labor Markets and Non-competing Groups" in : *American Economic Review*, Vol.76, n°2, pp. 48-52.

Nous avons noté que les formes d'engagement définissent des modalités de retour différenciées, en fonction des rapports de prescription, de l'autonomie obtenue par les acteurs de l'innovation. La forme de l'évaluation et son contenu en dépendent. L'un des points importants à conserver à l'esprit, est que les acteurs de contextes et les acteurs de l'innovation ne sont pas neutres dans le processus. L'un des effets de l'engagement est précisément que les acteurs sont engagés dans le processus, que leur légitimité est associée au succès ou à l'échec du projet, que leur carrière est en partie liée à la capacité dont ils ont su faire preuve de mettre en œuvre une décision rationnelle. Cette position *partie prenante* des acteurs tend à conférer à l'évaluation le statut de *justification* (Boltanski et Thévenot 1991). Elle entre en tension avec l'appartenance multiple des acteurs, à des temporalités dépassant le temps de l'innovation. Ainsi, la réputation des acteurs repose en partie sur ce que l'on pourrait appeler l'«évaluation de l'évaluation», c'est à dire la conformité de leur comportement et jugement aux règles en vigueur, à la rationalité collective de l'organisation ou des institutions dans lesquelles ils évoluent et font carrière, c'est à dire sont eux même sujet d'une évaluation et d'une rémunération. Sur ce point, remarquons de nouveau l'emboîtement des rationalités et des logiques organisationnelles, professionnelle et technique.

De même que pour le dilemme posé par l'engagement, une organisation peut disposer d'une procédure routinière de régulation de ces tensions. L'organisation extrait l'objet technique de sa singularité à travers l'emploi d'une panoplie de procédures définissant les modalités de l'évaluation finale : qui rédige, quelle forme de rapport, quelles questions y sont traitées, qui évalue le rapport etc. Comme l'engagement, cette régulation met en jeu la rationalité collective de l'organisation, son identité, son histoire : il peut par exemple être fait appel à la garantie d'experts extérieurs à l'action, l'évaluation peut être l'œuvre d'une commission de représentants, la forme du rapport peut mettre en page des critères universels objectifs, le règlement peut se dérouler de façon informelle par accord des acteurs...

L'évaluation est aussi l'occasion de formuler des anticipations collectives, de repérer une opportunité stratégique pour l'organisation. La mise en circulation d'un rapport évaluant les performances, les coûts et les qualités de l'objet technique permet aux utilisateurs potentiels, comme les directeurs d'usine, de procéder à des projections calculées. Les procédures varient d'une organisation à l'autre, mais la remontée en généralité est le plus souvent l'occasion d'une remontée en organisation, vers les instances décisionnelles de l'entreprise. Celles-ci incarnent la capacité stratégique de l'entreprise, qu'elle soit représentée par une direction, un collège de pair, ou une forme de marché fondé sur le calcul rationnel à court terme de profit anticipé. L'évaluation offre donc une possibilité d'élaboration de plans nouveaux orientés vers l'avenir, et de coordination de ces plans.

Fondamentalement, parce qu'il est le résultat d'un processus d'investissement coûteux, débouchant, en cas de réussite sur la domestication de forces à valeur économique (i.e. profit), l'objet technique incarne la création d'irréversibilités locales. Cette irréversibilisation localisée constitue en soit une motivation importante à la diffusion, permettant son approfondissement, et la mise en place d'effets d'apprentissages et d'accumulation.

Evaluation et coordination externe

Comme le souligne Richardson, il existe deux modalités d'extension d'une innovation technologique, lorsque celle-ci fait l'objet d'une évaluation positive. L'entreprise peut développer l'exploitation d'une innovation en interne. Elle peut chercher à promouvoir son innovation au sein de l'industrie.

Dans le cas d'une promotion externe, la question de la motivation se pose différemment. Sur ce point, les propositions formulées par Richardson paraissent moins satisfaisantes. Levin et Alii (1987) ont montré que les entreprises déploient un arsenal de méthodes pour éviter l'appropriation externe de leurs innovations, alors comment comprendre qu'elles pourraient être motivées à livrer leurs secrets à leurs concurrents? Cette vision des choses, largement partagée, repose sur deux hypothèses fortes : premièrement, elle postule que l'innovation est une ressource rare à laquelle elle attribue une valeur potentielle indépendamment de sa diffusion, et deuxièmement, elle pose le processus d'imitation comme le processus central d'expression de la concurrence.

Si l'on renverse cette vision des choses, et que l'on considère que les entreprises concurrentes ont-elles aussi la capacité de créer des innovations technologiques, et que, de plus, la valeur d'une innovation dépend en bonne part de sa diffusion (Arthur 1988, 1989) et de son exploitation, la question de la motivation à diffuser s'en trouve éclairée sous un angle différent. Dans cette situation, il y a lieu de penser que certaines entreprises sont prêtes à se battre pour diffuser leurs innovations et les faire adopter par d'autres.

Nous proposons de distinguer quatre sources essentielles de motivation dans de telles situations :

- L'obtention d'un *leadership technologique* (Gold et Alii 1984, Joly et De Looze 1996). Si comme le suggèrent Cohendet et Alii (1992) on peut considérer la diffusion 'comme un jeu répété à long terme' entre les mêmes acteurs, le leadership assure une légitimité et une réputation technologique qui pèse souvent lourd dans les décisions d'adoption futures (Gold et Alii 1984). A plus court terme, l'obtention d'un leadership technologique permet

de devenir incontournable, et donc de faciliter le respect de la propriété intellectuelle (licence, citations) (Joly et De looze 1996). Dans une économie comme celle des Etats Unis, le leadership technologique peut se traduire par une valeur financière accrue liée à une bonne réputation.

- La diffusion de l'innovation permet à l'entreprise d'obtenir une avance technologique pouvant se traduire par une avance dans l'exploitation de l'innovation, 'first mover advantage' (économies d'échelles, descente le long de la courbe d'apprentissage, learning by using) (Rosenberg 1990).
- La diffusion de l'innovation limite les risques de standardisation sur des objets techniques provenant d'autres entreprises, qui se traduiraient par des effets d'obsolescence et de réversibilisation ('angry orphans' David 1987, Gold et Alii 1984)
- La diffusion constitue une opportunité de développer de nouveaux marchés, de nouvelles relations amont et aval, favorables au développement de complementary assets (Joly et De Looze 1996) dont la durabilité peut être supérieure à celle de l'innovation elle-même.

2.2) Qualification

Notre entrepreneur-innovateur (ou notre entreprise) se trouve désormais doté d'une motivation, d'un plan destiné à exploiter un gisement potentiel prometteur, éventuellement même de listes définissant une population d'adopteurs potentiels de sa technologie. Comment rendre *disponible* l'objet technique localisé dont il a la propriété ? Comment le rendre *appropriable*, et même attractif et convaincant pour les adopteurs potentiels ?

Le premier volet de notre réponse à ces questions réside dans la distinction entre objet technique concret localisé et les représentations collectives et 'abstraites' de cet objet technique.

Représentation écrite et graphique et qualification

S'il arrive que l'innovateur donne à voir son innovation aux utilisateurs qu'il cherche à convaincre (cas du post-it décrit par Akrich et Alii 1988), dans certain cas, l'objet technique est difficilement transportable, son transport nécessitant en outre d'interrompre la production. De plus, sa représentation écrite possède l'avantage d'être malléable.

Nous avançons donc l'hypothèse que la *disponibilité* de l'objet technique passe par la production de représentations écrites, inscrites au sein de différents lieux d'échange (revues, instituts nationaux de protection de la propriété intellectuelle, conférences, associations professionnelles et techniques). Le message de la disponibilité affirme l'existence et la maîtrise par l'entreprise émettrice d'une technologie, une solution technique stable prenant en charge un problème commun.

La qualification de cette solution technique définit les conditions d'utilisation de la technologie, l'échelle des performances que l'on peut en attendre et ouvre donc ainsi un territoire potentiel d'utilisateurs potentiels, un gisement de progrès anticipé sur la base de projections abstraites.

L'exercice de qualification de l'objet technique suppose, au-delà de son caractère évaluatif, un apprentissage, un travail de représentation, de théorisation de l'objet technique, inscrivant celui-ci dans des formes manipulables et transportables, en partie indépendante de ses conditions de production et d'usage, et produisant des connaissances 'codifiées' sur l'objet technique. Ces représentations, théoriques, abstraites, ordonnées de l'objet technique sont produites par l'intermédiaire de ce que Gooding nomme les 'moyens intellectuels de manipulation du savoir' (⁵⁰²).

Des auteurs comme Metcalfe (1988) ont souligné l'importance de cette dimension cognitive de la technologie. David et Foray (1996) ont affirmé l'importance des processus de 'codification' de la connaissance, dans leur distribution et leur circulation. Nous affirmons ici, sur la base d'une série de travaux menés en anthropologie (Bourdieu 1980, Goody 1979, Latour 1989) que cette codification passe par l'écriture et l'inscription graphique de représentations de l'objet technique, permettant l'élaboration d'un modèle objectivé, dé-contextualisé des contingences pratiques de sa création, et dont l'objet technique n'apparaît alors que comme une application pratique. L'inscription graphique et plus particulièrement écrite de l'objet technique ouvre la possibilité de nouvelles formes de connaissance de celui-ci, et, point qui nous intéresse ici au premier chef, la possibilité d'une connaissance de nature cumulative, objectivée, reproductible, à distance et aisément transportable d'un contexte à un autre (Goody 1979, Thévenot 1985, Latour 1989). Les propositions formulées par Romer sur les idées - "*The notions that ideas are different from objects is both familiar and obvious*" (⁵⁰³). touche, en ce sens, à des mécanismes essentiels : la connaissance couchée sur le papier est plus aisément manipulable, reproductible, transformable, capitalisable, associable, que la compétence incorporée dans le chercheur.

⁵⁰² Goody, J. (1979) *La raison graphique. La domestication de la pensée sauvage*. Ed de Minuit, p.58.

⁵⁰³ Romer, P. (1993) "Two Strategies for Economic Development: Using Ideas and producing Ideas" in: Proceedings of the World Bank Annual Conference on Development Economics 1992, World Bank Ed. Pp.63-91.

La représentation permet donc d'attribuer des qualités à l'objet technique, de le qualifier, tout en inscrivant ses qualités dans des catégories plus larges, plus générales, plus universelles : le temps, la mise au mille, les prix etc. Cette qualification passe donc par un effort de pliage des spécificités, du contexte spécifique de création de l'objet, contribuant à l'autonomiser, à lui conférer une existence propre. Elle établit des liens entre différents facteurs, différents éléments –input, caractéristiques, output- dans une perspective a-temporelle et a-spatiale ('amnésie de la genèse' Bourdieu 1980). On pourrait évoquer l'idée d'amnésie de la création technologique, tant l'inscription dans des catégories générales ancre généralement l'objet technique dans une continuité technologique construite, ainsi qu'en attestent de multiples études (Van Den Belt 1987, Fujimura 1988, Misa 1992).

Les acteurs de l'innovation forgent leur représentation de l'objet technique et du sens de leurs actions dans un registre général. Le jugement sur l'objet technique constitue un compte rendu de l'action obligeant ses auteurs à prendre position, à classer, à rendre cohérent, à donner les signes 'objectifs' et calculables des résultats rendus visibles de leur travail sur l'objet. Il amène les acteurs à se positionner, et à positionner l'objet technique dans le cadre plus large des règles communes et des références reconnues.

Les représentations comme objet frontières

L'idée et sa circulation sont indissociable de la matérialité qui la porte. C'est le support même de son inscription qui lui confère ses propriétés et sa nature particulière (Goody 1979, Callon 1994). Le contexte d'inscription de la représentation est tout à fait essentiel à la qualité d'objet frontière (Star et Griesemer 1989) de la représentation écrite (Myers 1985, 1995).

La qualité d'objet frontière tient à deux caractéristiques lui assurant la capacité d'articuler deux mondes distincts : la *correspondance* et la *généralité*.

La *correspondance* signifie que la représentation écrite présente une forte fidélité à l'objet technique, qu'elle fait système avec lui. La qualité d'un modèle tient à sa capacité à représenter fidèlement la réalité. Cela est en partie assuré par l'incorporation d'éléments accumulés dans le processus de création de l'objet technique. L'inscription écrite et graphique de l'objet technique à l'occasion de l'évaluation capitalise, enregistre, met en ordre certains éléments créés dans le fil du processus. Elle présente d'un seul regard, en un seul tableau, et en quelques pages de commentaires des éléments associés produits à différents moments, dans différents contextes, par différentes personnes, à différents endroits et les mets en cohérence stable et durable : "Une des caractéristiques de la forme graphique, c'est de tendre à disposer les

termes en rangées et en colonnes, c'est à dire linéairement et hiérarchiquement, de manière à assigner à chaque élément une position unique qui définit sans ambiguïté et en permanence sa relation aux autres" (Goody, 1979, p. 133).

Pour atteindre cet effet, une codification au sens stricte n'est pas suffisante, il ne s'agit pas d'un pur effet de *mise en forme* d'une connaissance existante. Il s'agit de la création d'une connaissance d'un autre ordre, répondant aux principes de la raison logique, écrite. Comme le note Bourdieu (1980) la création d'une théorie de l'objet technique – une techno-logie-, fondée sur des relations de cause à effet, offre un modèle dont la généralité est très large, et visant à définir l'essence même de l'objet technique, son identité paradigmatique au-delà des formes qu'il a pu revêtir dans le processus de sa création : la représentation écrite et graphique procède à une mise en ordre. Une équivalence est créée entre ce paradigme, et sa manifestation exemplaire dans l'objet technique : une correspondance est mise en place entre un *paradigme* et un *exemplar* (Dosi 1982). Parce qu'elle vise l'identité, l'idée stable et durable, la représentation graphique de l'objet technique lui confère une unité, une simplicité et une stabilité, elle inscrit durablement sur le papier, en deux dimensions, les qualités et les attributs de l'objet techniques, elle permet une projection et une anticipation de ses performances possibles. Insistons sur le fait que toute théorisation n'a de valeur, précisément, que par son efficacité d'explication du monde et d'action sur le monde : l'exemplar démontre l'efficacité pratique de la théorie, de la technologie. C'est parce qu'elle lui correspond que la technologie prend une valeur.

La *généralité* signifie que la représentation utilise des catégories et des classifications communes aux lecteurs potentiels auxquels elle s'adresse (Myers 1985). Comme le soulignent David et Foray (1996), cette opération d'inscription ne s'effectue pas dans un vide organisationnel et institutionnel. Le rapport d'évaluation, forme la plus courante de l'inscription graphique dans l'organisation, dépend ainsi à la fois des éléments créés et des enregistrements réalisés au fil du processus, d'éventuelles représentations déjà élaborées au moment de la décision d'investissement, des règles de mise en ordre habituelles dans l'organisation considérée –i.e. des conditions d'inscription-, et des catégories générales (plus ou moins en continuité avec l'ordre existant) dans lesquelles l'objet technique est pensé. La représentation peut ainsi adopter une forme plus ou moins générale, fonction des catégories et des unités de mesures dans lequel il inscrit l'objet technique.

L'exemple fourni par Van den Belt et Rip (1987) dans le cas de la teinture synthétique illustre le fonctionnement de ces mécanismes. Les auteurs identifient le développement de la teinture synthétique à l'invention par Emmanuel Verguin, un chimiste travaillant pour une entreprise de teinture de la soie, de l'aniline rouge, dérivée du goudron, pour lequel il obtint un brevet. Les

auteurs sont cependant amenés à reconnaître que l'aniline rouge, si elle a connu un large succès commercial, n'a pas été placée dans les catégories de la teinture de synthèse, mais dans les catégories traditionnelles des coloristes, groupe professionnel dominant le secteur textile de l'époque, et l'ensemble de la branche dont les fournisseurs de teinture ne représentaient que l'un des maillons. La commercialisation, l'utilisation, la représentation de l'aniline rouge se sont inscrites dans les mêmes catégories et circuits que ceux des couleurs naturelles. Le procédé de production de l'aniline rouge lui-même ne constituait pas encore une synthèse chimique complète. Cela amène les auteurs à conclure que *"the break with the past was not immediately perceived in its full significance"* (Van Den Belt et Rip 1987, p. 143). Une démonstration tout à fait similaire est administrée par Misa (1992) dans son travail sur l'émergence de l'acier⁵⁰⁴ et de la longue controverse ayant abouti à une classification permettant de distinguer le fer de l'acier⁽⁵⁰⁴⁾.

La représentation juxtapose, intègre une double perspective, celle de l'objet technique concret et celle du milieu dans lequel elle circule. A travers l'objet frontière, l'inscription devient une proposition d'alliance, un effort d'enrôlement.

2.3) Inscription, alliances, enrôlement

La mise en circulation de représentations au sein d'espaces d'échanges (revues, associations professionnelles et techniques, Institut de protection de la propriété intellectuelle.

Substitution

Comme l'a bien saisi Mansfield, l'apparition d'une innovation ne se produit pas dans un vide économique. L'émergence de l'innovation en un point de l'économie ne se traduit généralement pas immédiatement par la création de nouveaux marchés. Le plus souvent, la diffusion de l'innovation est d'abord une substitution. L'automobile naissante prend des parts de marché à la bicyclette et aux transports en commun, les aciéries à l'oxygène remplacent en partie les convertisseurs Thomas et les Open Hearth (Lynn 1982), les teintures synthétiques entrent en concurrence avec les couleurs naturelles (Van Den Belt & Rip 1987) l'électricité défie le gaz dans la course à l'éclairage des villes (Hughes 1983). L'existence d'une innovation passe souvent par sa capacité à entrer en concurrence avec des biens existants, sur le terrain de ces biens existants, selon les critères et les catégories de ces biens existants. Comme l'indique Rosegger à partir du cas de la coulée continue, dans ces conditions,

⁵⁰⁴ Misa, T. (1992) "Controversy and closure in technological change : constructing 'steel'" in : Bijker, W & law, J. (eds) *Shaping Technology/ Building Society*. Op cit. pp. 109-139.

l'innovation est souvent à son désavantage (Gold et Alii 1984). Van Den Belt et Rip donnent deux exemples, dans leur travail sur la naissance de l'industrie chimique, dans lesquels *“the break with the past was not immediately perceived in its full significance”* (Van Den Belt et Rip 1987, p. 143) : l'aniline rouge a d'abord été classée, considérée et valorisée dans les circuits des couleurs naturelles traditionnelles. De même, l'aniline jaune et le marron bismark, ont d'abord été classés dans la catégorie des anilines, avant que la théorie des teintures 'azo' et l'industrie des teintures synthétiques ne prenne son envol et qu'elles soient reconnues comme des innovations ayant anticipé ce mouvement. Nous pouvons avancer que la continuité dans laquelle les acteurs 'perçoivent' l'innovation dépend du processus d'innovation (partie 2).

Un tel décalage tient à l'existence d'irréversibilités – *path dependency* (David 1987)- avec lesquelles l'innovation, ainsi que nous l'avons montré, se trouve en partielle discontinuité (cf partie 2). L'ordre local mis en place dans l'espace d'innovation représente une forme de désordre au plan global. A l'inverse, l'innovation est confrontée, dans sa généralisation, à un ordre global pour lequel elle est nécessairement partiellement inadaptée. Dans le domaine de la science, Fujimura a bien mis en valeur ces phénomènes d'irréversibilité et leur ancrage dans des réseaux de capitaux installés :

“Even if scientists want to incorporate new technologies into their work, they may not be able to do so for lack of funding, available skills, time, or other needed resources. Scientists working in existing laboratories and institutions have made major commitments of resources to particular problems and approaches to those problems. Altering current problem paths requires making changes in ongoing organizations of work : acquiring new skills and knowledge, hiring new staff, and buying new instruments and supplies. Yet scientists in both university and commercial laboratories tend to work within relatively stable resource allotments that can rise or fall in small increments. They can gain additional resources only through the expenditure of other resources (time and efforts taken away from experimental work to write grants or put on ‘roadshows’). Thus preferred changes are relatively inexpensive.” (Fujimura 1988 ⁵⁰⁵)

Dans une situation de changement, les risques d'obsolescence, c'est à dire de réversibilisation d'une série de capitaux patiemment accumulés sont élevés (Frankel 1955). Les coûts de tels changements, sur le plan économique mais aussi sur le plan social – déqualification, chômage, conflit social – sont importants, et sont fonction de la nature et de l'ampleur de la discontinuité introduite. Comme l'a montré Rosegger (Gold et Alii 1984), dans bien des cas, un calcul incluant ces coûts condamneraient l'adoption de la coulée continue aux Etats Unis. Des mécanismes tout à fait similaires

⁵⁰⁵ Fujimura, J. (1988) “The Molecular Biological Banwagon in Cancer Research : Where Social Worlds Meet” in : Social Problems, Vol 35, n°3, June 1988.

ont joué dans l'échec de la politique industrielle de la France en matière sidérurgique dans la période d'après guerre (Jolivet 1999⁵⁰⁶).

Il résulte de ce qui précède, dans les comportements d'adoption des agents économiques, en dépit d'une attirance pour la promesse de profit (la quasi-rente de l'innovateur), une propension à l'aversion pour le risque et pour le changement requérant de larges investissements et supposant une vaste obsolescence.

Deux issues logiques viennent à l'esprit. Premièrement, selon l'analyse de Foray et Grübler (1990), l'innovation peut s'installer sur des niches, des marchés spécialisés mal servis par les biens existants, et pour lesquels l'innovation dispose d'atouts comparatifs, motivant une volonté d'investir. On peut penser au système Betacam dans la vidéo, à une multitude d'outils et d'instruments scientifiques, aux biens dédiés à des conditions extrêmes (sport, marché militaire, espace, etc). Le concept de lead user proposé par Von Hippel (1986), correspond à cette idée. Deuxièmement, comme dans le cas de la Ford T (Abernathy 1978), de l'appareil photographique d'Eastman (Latour 1989), du moteur diesel de Cummins d'abord mis au point pour les bateaux puis adapté sur les camions (Hard 1994), des claviers QWERTY permettant aux représentants de la société Remington de frapper rapidement Type Writer (David 1985) l'objet technique peut être adapté pour s'inscrire dans un réseau existant: le design et son adaptation constituent un argument commercial, un argument de mise en relation, particulièrement dans ses interfaces producteur et utilisateur.

Multiplicité des inscriptions et des formes d'inscription

L'un des éléments d'analyse de l'articulation de monde commun que nous proposons réside dans la multiplicité des inscriptions projetées au sein de ces différents univers et la multiplicité des associations créées autour de l'objet technique. Ainsi, l'établissement de relations entre l'entreprise exploratoire et commerciale de la flotte portugaise et le monde académique de l'époque prend la forme de l'embarquement, à bord des caravelles, de quadrants et d'astrolabes, et de cahiers dans lesquels sont méticuleusement répertoriés les enregistrements réalisés à chaque voyage supplémentaire. L'entreprise commerciale devient une extension du 'laboratoire', et le laboratoire produit des instruments, des outils, des cartes inscrivant les théories dans des outils permettant aux navigateurs portugais de s'orienter au large des côtes, avec l'aide du ciel (Law 1987). L'établissement de relations entre la première installation d'injection de charbon à O. et la profession des hauts fourneaux interne et externe prend la forme de l'installation d'un capteur mesurant le débit exact de charbon injecté, et d'un

⁵⁰⁶ Jolivet, E. (1999) "La politique industrielle de la France en échec : le cas de la sidérurgie dans la période d'après-guerre" in : WP, LEST – CNRS forthcoming.

enregistrement systématique et continu de la mise au mille de charbon injecté, de la mise au mille totale, dont se déduit l'économie de coke (cf. partie 2).

L'extension de l'univers d'inscription de l'objet technique, à travers la mise en place de multiples associations – *externalités de réseau* - et d'un univers doté de mesures communes favorise sa généralisation, sa circulation, et rend difficile sa disqualification.

Les instruments et les inscriptions circulant entre les mondes différents constituent autant d'éléments de mise en relation, autant d'outils de coordination. Richardson note ainsi que le transfert de technologie passe par l'échange d'information, de dessins, d'outils et même de personnel. Ils constituent des signes de l'articulation d'un réseau. Comme le souligne Thévenot en se limitant à l'entreprise : *“Les dispositifs constitutifs des organisations reposent largement sur ces objets qui entretiennent des modes de coordination généraux relevant de ce régime. Ceux-ci se prêtent à des agencements d'action à distance, à des rapprochements de large portée. Ils présentent en outre l'avantage d'être ouverts à une dynamique de révision des repères communs et ils guident un certain type d'apprentissage collectif”* (Thévenot 1996)

Pour créer un monde commun ou en faire partie, une commune mesure doit être appliquée aux énoncés et aux prétentions qualifiant l'objet technique. Pour exister dans un univers ou une sphère donnée, l'objet doit y être identifié selon les mesures et les règles en vigueur dans ceux-ci. Pour garantir l'indépendance du jugement, la forme de l'énoncé doit faciliter la comparaison et la mise en relation, l'évaluation par d'autres acteurs. Cela suppose un travail d'échange, de tissage patient de liens qui peuvent soit, préexister, soit être créés. Cette volonté de projection, de promotion, de mise en mouvement de l'objet technique destiné à lui assurer une dimension collective entre en tension avec un souci d'établir un contrôle, une maîtrise, de se trouver en position de capter la quasi-rente liée à l'innovation.

Les inscriptions écrites et graphiques, peuvent être considéré comme un outil de coordination essentiel des plans et des représentations. Par conséquent, ils assument un rôle crucial dans l'émission d'un signal (Spence 1973 ⁵⁰⁷) sur le marché, tout autant que comme instrument de mise en relation d'acteurs à distance, dans l'espace et dans le temps. La forme particulière des inscriptions écrites possède une double propriété qui la rend particulièrement attractive: elle fixe les qualités de l'objet technique et l'extrait de ses conditions singulières de production, tout en se prêtant particulièrement à la manipulation de la part du lecteur. Le lecteur peut, quasiment sans frais, faire circuler, reproduire, distribuer, découper, critiquer, comparer des écrits.

Les acteurs cherchent donc à développer et à faire adopter une théorisation de l'objet technique, une technologie articulée à celui-ci. Ces représentations sont porteuses de controverses. Elles promeuvent certaines catégorisations, établissent des distances entre solutions techniques, proposent des critères d'analyse des performances, bref, elles réorganisent l'espace technologique. Elles instrumentent la qualification des objets techniques et proposent une direction pour le progrès technique.

Misa (1992) fournit un exemple de controverse né autour de l'émergence du convertisseur Bessemer. L'une des caractéristiques de ce procédé tenait à la pureté et à l'homogénéité de la fusion du produit, débarrassé d'impuretés, de cendres. La communauté industrielle ayant adopté ce procédé, allié à quelques chercheurs industriels, et à certains membres éminents de la puissante AIME (American Institute of Mining Engineers) s'est donc efforcé de tailler une classification départageant le fer de l'acier épousant parfaitement les caractéristiques du procédé bessemer – classification dite de fusion, fondé sur la pureté du produit, pour l'obtention du label qualité 'acier'. D'autres, constitué d'une communauté industrielle utilisant d'autres procédés, de quelques autorités scientifiques se sont fait les avocats d'une classification fondée sur des critères tout à fait différents basé sur le contenu en carbone du produit. Cette proposition possédait l'avantage, entre autre chose d'autoriser les usines n'ayant pas adopté le nouveau procédé Bessemer de ne pas se voir refuser la possibilité de produire de l'acier par des moyens plus traditionnels (Misa 1992). Fujimura (1988) montre, de façon très convaincante, que le développement des technologies génétique dans le domaine de la santé aux Etats unis, est étroitement lié au développement d'une théorie oncogénétique, proposant une théorisation non virologique du cancer.

En conclusion, nous nous trouvons en mesure de mieux saisir, les phénomènes (appropriation, qualification et inscription) sous-jacents au concept de *disponibilité*, dont nous avons montré la centralité dans la dynamique des espaces technologiques.

3) Extension de l'innovation et espace technologique

Deux mondes se côtoient, et s'articulent autour de l'objet technique : le monde localisé de la première installation, appropriée par les utilisateurs, entrée en fonctionnement, en production avec ses ressources spécifiques, sa forme singulière et ses performances distinctives, et le monde généralisé de la représentation technologique - offrant une version stable, reproductible, prédictible, calculable de

⁵⁰⁷ Spence, M. (1973) "Job Market Signaling" in : *Quarterly Journal of Economics*, n°87, pp. 355-374.

l'objet technique- dont les acteurs vont, dans la période de diffusion, s'efforcer de consolider les fondements, de multiplier les inscriptions, d'organiser la cumulativité.

Comme l'indique Thomas Hughes (Hughes 1987⁵⁰⁸), il est possible d'employer une métaphore systémique pour décrire la complexification consécutive à l'extension de l'univers d'une innovation au fil de sa généralisation. D'abord une simple idée dans la tête de son inventeur, l'innovation est ensuite développée dans l'univers *in vitro* de l'espace d'innovation, lui offrant un environnement favorable, puis elle circule et s'enrichit dans un univers de plus en plus large, animé de forces toujours plus hostiles, en pénétrant plus avant dans le monde. Comme le notent Foray et Grübler (1990), sa généralisation passe le plus souvent par la conquête de niches, représentant des marchés spécialisés favorables, avant de s'étendre à l'ensemble de l'économie. Il nous semble difficile, cependant, de dégager un cheminement type. Cela tient en particulier à la mise en échec des stratégies, lié au rapport de force inévitable que suppose la généralisation.

3.1) Généralisation et adaptation

Lorsqu'une entreprise possède une innovation qui fonctionne, et qu'une théorisation correspondant à l'objet technique se développe, elle généralise celles-ci en les renforçant mutuellement. Comme l'a bien saisi Arthur, l'approfondissement de la spécialisation, le renforcement de la robustesse de l'objet technique et de ses liens avec une technologie sont en étroite relation avec le développement de l'adoption. Cela suppose en particulier de maîtriser les conditions de re-production de l'objet technique. Le re-production est en principe maîtrisée sur le papier, mais sa mise en œuvre suppose la mise en place d'une capacité, d'outils de reproduction pouvant circuler et être adaptés à différents contextes (plans, normes, règles de calcul), et d'un cadre prescriptif fixant le cadre des apprentissages autour d'invariants (Hatchuel 1994). Même dans les situations les plus prescriptives et les plus standardisées, la reproduction stricte requiert toujours un travail de régulation (Collins 1985, Hatchuel 1994, Jordan & Lynch 1992, Cambrosio & Keating 1988⁵⁰⁹).

La stratégie de généralisation prend dès lors deux cibles principales: les producteurs et la multiplication des lieux de production, les utilisateurs et la multiplication des lieux et des formes de l'usage. Cette amplification de la base installée est à l'origine d'une multiplication des effets d'apprentissage et des effets de représentation.

⁵⁰⁸ Hughes, T. (1987) "The Evolution of large Technological Systems" in : Bijker, Hughes et Pinch (eds) op cit. pp. 51-82.

⁵⁰⁹ Cambrosio, A. Keating, P. (1988) "Going Monoclonal : Art, Science and Magic in the Day to Day Use of Hybridoma Technology" in : Social Problems, Vol 35, n°3, pp. 244-259. Jordan, K. & Lynch, M. (1992) "The Sociology of a Genetic Engineering Technique : Ritual and Rationality in the Performance of the 'Plasmid Prep'", in : Clarke, A., Fujimura, J. (eds) *The Right Tool for the Right Job*. Princeton UP. pp. 77-114.

Pour ce faire, un travail d'adaptation des contextes de généralisation à l'objet technique et de l'objet technique aux contextes multiples de ses usages sont rendus nécessaires.

Ces nouveaux enrôlements, l'extension de l'univers localisé de départ constituent une série d'épreuves de la robustesse de la théorie de l'objet technique et des différents objets techniques représentants cette théorie au sein des différents contextes. Trop rigide, le design de l'objet technique risque de n'être pas adopté: le cas paradigmatique des kits photovoltaïques dont les branchements et les interfaces ne correspondent pas aux normes des utilisateurs et des réparateurs est très illustratif de ce phénomène d'incompatibilité avec les contextes dans lesquels ses concepteurs pensaient l'inscrire (Akrich 1987). Trop flexible, le design éclate en une multitude de designs sans identité commune. Les navires des explorateurs s'aventurent toujours un peu plus loin de leur base de référence, ils affrontent des éléments, des tempêtes, des conditions d'orientation toujours plus complexes. Des routes, des passages moins défavorables aux vaisseaux sont tracés. Au passage, ceux-ci se dotent d'instruments de mesure et de cartes toujours plus précises, les matériaux s'allègent, leur assemblage résiste à des tempêtes toujours plus impressionnantes, leur voilure est toujours mieux adaptée à transformer les vents en mouvement (Law 1987)

L'idée d'un DC-3 ou d'une Ford T évoluant est donc en partie trompeuse : il existe de multiples objets techniques unis sous le terme générique de DC-3 et de Ford T. Le lien entre eux est un lien paradigmatique, comme le souligne le concept de paradigme technologique (Dosi 1982), au sens où leur identification tient à leur correspondance commune à une théorie de l'objet technique qu'ils représentent. Ces rapprochements de diverses situations fondent une théorisation des conditions de production et d'usage de l'objet technique.

L'immutabilité et l'unité de la théorie elle-même est trompeuse : il existe une multitude de représentations d'objets techniques articulés par les acteurs les uns aux autres comme formant une théorie, une technologie. Cette théorie n'existe pas en dehors du réseau d'objets techniques, d'instruments de mesure, de représentations écrites et graphiques (plans, articles, brevets, descriptifs, ouvrages), de compétences mises en œuvre (Callon 1994). Elle se confond avec celui-ci, elle s'affirme et se complexifie avec lui. Cette théorie s'affine au fil des épreuves, dans l'explication de certaines spécificités localisées, dans l'intégration d'un point de vue à la fois commun et de sources hétérogènes.

Le point crucial est ici la correspondance fondatrice – et construite dans la dialectique objets techniques- théorie technologique - entre les représentations abstraites fondues dans un paradigme, et les 'applications concrètes localisées' constituées par les multiples contextes dans lesquels une famille d'objet technique est construite et utilisée. Ces correspondances fondent progressivement la possibilité

d'une re-production, c'est à dire d'une stabilisation de l'objet technique 'incorporant' une théorie, une boîte noire dont les conditions de conception, de production et d'utilisation incorporées deviennent stables.

Cette théorisation paradigmatique joue donc, dans notre modèle, un rôle éminent, et se trouve par conséquent soumise à des rapports de force prenant l'allure de controverses 'technologiques' ou 'scientifiques', dont le règlement est assuré par des épreuves de différentes natures. Lorsque des courses automobiles sont organisées, réunissant des véhicules à vapeur, et à pétrole, elles n'engagent pas uniquement une poignée de chauffeur et leurs engins, mais l'ensemble des théories et hypothèses posant que le véhicule à pétrole ne peut pas atteindre la même vitesse que ses concurrents, et tout le réseau des concepteurs, des producteurs et des utilisateurs divisés par cette distinction. Comme l'a noté Steinmuller (1996), tout objet technique plie une multitude de réseaux hétérogènes. Il peut partager certains de ses éléments avec d'autres objets techniques. Cela nous amène à évoquer rapidement la question de la compétition technologique.

3.2) Singularité de l'innovation et conditions d'une compétition

Conditions d'une imitation technologique

Imaginons une économie dans laquelle se produisent, en divers points, des dynamiques locales d'innovation. Quels sont les facteurs expliquant la généralisation de certaines, la non-généralisation d'autres?

Premièrement, nous avançons que l'approche diffusionniste, et les approches paradigmatiques qui l'accompagnent – Arthur parle de compétition entre 'technologies' (Arthur 1988)- , masquent en réalité différents phénomènes, abusivement assimilés. Arthur, employant le terme technologie, fait-il référence aux représentations collectives et paradigmatiques soutenant les anticipations et les décisions des agents économiques, ou aux objets concrets pris dans les conditions locales de production?

Nous soutenons que derrière la même catégorie de 'technologie' s'abritent en réalité une diversité d'objets techniques concrets. Certains de ces objets peuvent ainsi représenter différentes versions, mises en place en des lieux et à des moments différents et identifiés – effet d'appropriation et d'évolution. D'autres objets peuvent fort bien représenter des objets techniques ayant résultés de processus d'innovation indépendants, mais dont la qualification et les représentations ont été classées dans la même catégorie – effet de classement. La mise en compétition, ou l'identification, résultent d'un même mécanisme d'attribution de *distances technologiques* aux objets techniques lors de leur

évaluation et de leur représentation. En ce sens, l'attribution de distances technologiques (partie 1), correspondent nécessairement à un méta point de vue, un point de vue d'expert lissant l'espace et le temps des objets concrets, et formant une trajectoire, une histoire technologique organisée autour de catégories et d'une logique 'évolutionniste' (Foray et Grübler 1990).

Faut-t-il pour autant, avec Metcalfe aller jusqu'à dire que les technologies n'entrent pas en compétition et que seules les entreprises le font? Aussi fondée qu'elle soit, cette vue nous paraît radicalement incomplète. La compétition peut être organisée à différents niveaux et prendre différentes formes: concurrence entre théories et classifications générales (Misa 1992), controverses au sein d'une même théorie entre différentes versions, concurrence entre objets techniques (Bijker et Pinch 1987).

Il n'en demeure pas moins que se pose la question des hybridations, de ce qui circule d'un contexte à l'autre, phénomène que l'on peut rapporter au terme classique d'*imitation*. L'espace technologique ne peut pas être ramené à une série d'innovations localisées totalement indépendantes – question de la continuité. Nous avons observé, y compris dans les processus de création de technologie, certains éléments, certains savoirs, certaines ressources reprises telles quelles à partir d'autres contextes (Partie 2). Précisons d'emblée que l'*imitation* au sens strict éclaire faiblement ces réalités. Nous avons identifié deux mécanismes à l'origine de cette circulation: l'utilisation, et la création contrainte. Certains éléments de l'objet technique peuvent circuler et être utilisés comme des boîtes noires, produites ailleurs. Il n'est pas question ici d'imitation, mais d'approfondissement de la division horizontale du travail. L'économie est faite de ces fonctions de production articulées les unes aux autres et produisant en chaîne les unes pour les autres. D'autres éléments peuvent être élaborés localement à partir de principes, d'heuristiques, de représentations ou de théorie de l'objet technique venant d'ailleurs. Plutôt que d'imitation, il s'agit alors de création contrainte ou prescrite.

Il en résulte, en réalité, l'existence d'une variété de d'innovations *différenciées* appliquant des principes semblables, et incorporant des ressources partiellement communes. Quel avantage, si toutefois il lui était possible de le faire, pourrait bien tirer une entreprise de l'imitation strictement identique d'un produit ou d'un procédé?

Cohen et Levinthal (1989) dans leur article de référence, ont mis en évidence les difficultés inhérentes à l'imitation. Il est très difficile de reproduire une innovation localisée. Cela suppose en particulier, d'après Cohen et Levinthal, d'avoir payé un ticket d'entrée, d'avoir consenti un *investissement*, en développant des recherches en R/D. L'intérêt de cette théorisation est qu'elle permet de délimiter la population d'imitateurs potentiels d'une innovation à partir de leur effort d'appropriation. L'idée sous-jacente est que l'innovation n'émerge pas dans un vide industriel. L'existence de positions occupées dans cet espace industriel, et d'enjeux économiques permet de

comprendre l'inscription de la technologie dans un tissu d'*engagements* stratégiques et de relations parties prenantes *d'un jeu à long terme* (Cohendet et Alii 1992) en partie désynchronisés de l'innovation singulière. Les propositions de Cohen et Levinthal incitent en particulier à prêter attention au rôle de la structure des marchés du travail. L'imitation suppose l'existence de compétences ne s'accumulant qu'à travers des investissements de moyen et long terme, et donc une forme de proximité, de 'profil' commun de l'innovateur et de l'imitateur, de position semblable dans l'espace de la division industrielle du travail.

Le concept de *disponibilité* marque une seconde condition définissant les contours de l'imitation. En matière d'injection de charbon, il semble que certaines entreprises sidérurgiques chinoises avaient mis au point des innovations localisées stables. La difficulté d'accès, le secret entourant ces innovations ont, d'après certains interlocuteurs, nui à leur adoption. Une seconde justification avancée tenait à l'incommensurabilité des catégories utilisées dans les représentations chinoises: les pratiques de mise au mille très élevées en Chine par rapport aux normes européenne et japonaise ont rendu difficile la comparaison et l'évaluation des qualités de l'innovation et de ses performances.

Ces réflexions nous incitent à enrichir le concept d'*appropriation*. Celle-ci ne se limite pas exclusivement à l'adaptation d'un objet technique constitué à son contexte d'utilisation. L'adopteur exerce un jugement, une évaluation, il produit sa propre représentation de la technologie facilitant la comparaison, il construit son univers de choix. L'adoption dans le cas de l'imitation est donc d'abord une adhésion, la reprise d'une représentation proposée par l'entreprise innovatrice.

Dans tous les cas, l'*appropriation* suppose la reprise au moins partielle de la théorisation, des catégories, des critères d'évaluation patiemment élaborés par l'entreprise innovatrice. Elle suppose l'acceptation de la division du travail, de l'organisation de l'industrie proposée par l'entreprise innovatrice. L'*adhésion* fonde le partage de représentations communes, elle réalise et donne plus de poids aux anticipations produites par l'entreprise innovatrice, elle entérine une hiérarchisation, une spécialisation. Dans ces circonstances favorables, un cadre d'action commun émerge, ouvrant la possibilité d'une cumulativité organisée. Les connaissances n'y sont pas produites exclusivement par le concepteur, ainsi qu'il est trop souvent supposé dans la littérature, mais par l'ensemble des adhérents à ce club ad hoc. Y compris lorsque l'entreprise innovatrice conserve le monopole de la conception technologique et l'initiative de la théorisation – on pourrait citer le cas d'IBM -, celles-ci ne valent qu'en rapport avec des mises en œuvre pratiques inscrites au sein de contextes multiples.

Ce sont *in fine*, au cœur de ses mises en œuvre productives et d'utilisation que se joue la validité de l'innovation et de la théorie qui la supporte. En ce sens théorisation technologique et objet

techniques concrets forment une entité en correspondance. Un écart, une difficulté menacent les relations tissées, les adhésions, de *dissociation* (Law 1987) et de *dissidence* (Callon 1986). En ce sens, la forme du contrat est d'un genre très particulier, puisqu'elle consiste en une adhésion- adoption à une représentation de l'objet technique affublée de l'attribution d'un rôle dans une dynamique d'apprentissage orchestrée, en contrepartie d'une vérification des promesses et anticipations formulées. L'exemple de Bessemer, amené à rembourser ses premiers utilisateurs est frappant (Misa 1992). Ces propositions théoriques permettent de comprendre les phénomènes décrits par Allen comme une *invention collective* (Allen 1983). Les pertes de l'innovateur mises en exergue par la littérature peuvent être replacées dans une dynamique d'apprentissage collectif, expliquant la rationalité sous-tendant la volonté de généraliser l'innovation: les savoirs de conception y sont complétés par des savoirs de production et des savoirs d'utilisation.

Comme le soulignent Joly et De Looze (1996), la question cruciale est alors celle de la *différentiation*, de la convergence ou de la divergence (Callon 1992). Le paradoxe tient à ce que, ainsi que le soutiennent Joly et De Looze, dans l'hypothèse où les entreprises possèdent des profils technologiques (i.e des stratégies d'investissement) similaires, l'imitation n'est à la limite plus nécessaire, dans la mesure où apparaissent simultanément les mêmes innovations localisées en différents points de l'économie ('multiples' Cowan 1991).

Logique de club et conditions de la compétition technologique

L'extension du réseau, du territoire économique structuré autour de l'objet technique réalise les projections et les anticipations en provoquant la mise en place de fortes irréversibilités, tout en transformant celui-ci. Callon (1994) a défini le principe de cette transformation "*the reconfiguration of networks - that is, the production of new statements, the development of new instruments, or the elaboration of new skills and techniques - operates within groups with restricted membership. These group's frontiers are fairly well-defined; they are either smaller or larger than a laboratory and are only rarely coextensive with one*" (Callon, 1994, p. 412). L'identité particulière des groupes ad-hoc dépend principalement des éléments hétérogènes qui les constituent: articles, techniciens, chercheurs, managers, spécialistes, ingénieurs, machines, instruments, échantillons, chiffres, matières congelées.... "*Change the composition of the collective and you change the content of its productions*" (Callon 1994, p. 413).

L'existence de ces ententes, peut être tracée jusqu'aux premiers développements de l'ère industrielle, ayant progressivement débouché sur l'émergence de la grande entreprise moderne (Chandler 1977). Piore et Sabel (1985) estiment que l'apparition d'une forte instabilité du marché à souvent conduit les entrepreneurs à rechercher des formes de relations permettant de contrôler

collectivement les prix et les produits: “Dans la majeure partie des cas, on trouve, à l’origine des compagnies, des ententes, c’est à dire des accords entre producteurs visant à fixer les prix ou à limiter la production. Ces ententes étaient des constructions relativement simples qui, à la suite d’échecs répétés, devinrent de plus en plus élaborées. Certaines incluait des batteries de dispositions obligeant à échanger des informations sur la production et les ventes, et prévoyaient des sanctions en cas de violation des accords.”⁽⁵¹⁰⁾.

Buchanan a fourni les éléments essentiels d’une théorie économique des clubs (1965). Partant de Samuelson et de sa théorie des biens privés et des biens publics purs, Buchanan constate que toute une série de biens ne tombent ni dans une catégorie, ni dans l’autre. Il critique en particulier la notion de bien public pur. Il note, dans une approche qui anticipe les travaux d’Arthur: “*the utility that an individual receives from its consumption depends upon the number of other persons with whom he must share its benefice*” (Buchanan, 1965, p. 3). On serait tenté d’ajouter que le bénéfice dépend de l’appropriation que l’individu en fait.

Dans son travail sur la logique de l’action collective, Olson (1978) a montré qu’il n’est pas rationnel pour un individu de prendre en charge les coûts d’un bien collectif dont d’autres vont profiter, sans en supporter les charges –externalités positives. Le marché seul ne permet que difficilement la mise en place de certains biens dont l’intérêt collectif est pourtant avéré. L’Etat prend bien entendu en charge une partie de ces biens, l’organisation également. Mais Buchanan montre que “le club” constitue une autre forme institutionnelle possible, particulièrement adaptée à la production de biens publics non purs (ou privés non purs). L’efficacité institutionnelle du club repose sur deux principes essentiels de régulation:

- la notion de taille optimale du club est la clé du calcul économique. Les coûts de production du bien ne sont affectés par son utilisation par un membre supplémentaire qu’à partir d’un certain seuil qui définit la taille optimale du club. Les membres du club ont donc tout intérêt à recruter de nouveaux membres pour répartir les frais de production, tant que la taille du club est inférieure à la taille optimale et à l’inverse, à exclure tout nouveau membre potentiel lorsque cette taille optimale est atteinte. Si l’on prend l’exemple d’une piscine, ou d’un golf, qui se caractérisent par des frais fixes élevés, l’arbitrage se fait entre le fait de supporter seul les coûts de production de la piscine et la faible utilité que la piscine représente lorsqu’elle est bondée.

- le principe institutionnel repose sur la capacité du club à maîtriser non seulement la taille - et par conséquent les règles de recrutement - et les règles de répartition (principe d’équité) des charges

⁵¹⁰ Piore, M. et Sabel, C. (1985) “Le paradigme de la production de masse et ses alternatives, le cas des Etats Unis et de l’Italie”. in : Thévenot, L. (ed) *Convention économiques*. Cahiers du Centre d’Etude de l’Emploi – PUF, pp. 1-20.

entre les membres, mais aussi à internaliser les externalités: le club n'a de sens que s'il représente un moyen de limiter les bénéfices de l'usage du bien privé non pur à ses membres, à l'exclusion des non-membres. Cette affirmation repose sur le principe du "free riding". Si les non-membres peuvent sans frais bénéficier des mêmes avantages que les membres, aucun agent rationnel n'adhérera au club. Un club est donc comme le note Buchanan, un système institutionnel reposant sur des appareils d'exclusion/inclusion à l'usage.

Nous proposons une reformulation de cette théorisation dans le cas de la généralisation.

L'investissement – en recherche et développement, abonnements aux revues, cotisation aux associations professionnelles, base installée, compétences constituées – conditionne l'univers de choix de l'entreprise et les modalités éventuelles de participation à un club. La participation au club transforme les rationalités, faisant entrer en ligne de compte des phénomènes de réputation et de légitimité liés à un engagement dépassant le terme de la transaction pure, et soumettant les joueurs à des règles collectives (publication, échange d'information, attitude coopérative) motivées par l'inclusion, la réputation, et la répudiation (Dasgupta et David 1994).

Il est toujours possible à une entreprise n'ayant pas ou ayant peu investi d'adhérer au club. Mais sa capacité de remontée vers les conditions de production et de conception est alors très limitée. Elle doit donc accepter l'objet technique et sa théorie comme des boîtes noires, entérinant fidèlement les anticipations, et assumant le rôle d'utilisateur. L'objet technique doit de son côté être simplifié pour être facilement utilisable par des non – spécialistes.

Transformation, compétition et compatibilité

Comme l'a noté Landes (Cohendet et Alii, 1992, p. 68) le transfert de l'objet technique localisé d'un contexte à un autre est rarement opératoire. L'auteur cite le cas du transfert de plans d'armes à feu françaises pendant la seconde guerre mondiale. Il a été impossible aux usines américaines de re-produire ces armes sans la venue d'ouvriers qualifiés français. L'étude du processus d'innovation nous a permis de souligner l'importance du contexte construit autour de l'objet technique pour qu'il fonctionne – ce que nous avons appelé la construction de la fonction de production (partie 2). En ce sens, une innovation est toujours contextualisée, au sens où elle trouve son efficacité dans un contexte spécifique. Il en découle logiquement que le passage d'un contexte à l'autre nécessite une adaptation, une appropriation, une transformation du contexte d'implantation de l'objet technique (partie 3).

La question de la *compatibilité* se pose dès lors que l'hypothèse Mansfieldienne d'homogénéité des contextes d'utilisation et d'identité de l'objet technique sont relâchées, dès lors que la correspondance entre ces deux termes n'est plus supposée. Une tension s'ouvre alors entre la diversité des contextes d'utilisation et de production de l'objet technique et le caractère unifié de celui-ci. Comme le souligne Callon (1992), le design de l'objet technique – les caractéristiques étant liées au travail de représentation mis en œuvre dans la conception – lui-même est un élément essentiel de délimitation de la population d'adopteurs. On peut parler d'un *effet design* cristallisant un scénario relatif à l'utilisation de l'objet, et délimitant par conséquent les contours d'une population d'adopteurs potentiels. Si l'on considère la généralisation comme un processus, néanmoins, ce modèle doit intégrer la capacité d'adapter l'objet technique aux contextes, et les contextes à l'objet technique.

Ici encore, il nous semble important de distinguer les différentes modalités possibles du transfert. L'utilisation d'une arme à feu ne requiert sans doute pas de la part de l'utilisateur des compétences aussi spécifiques que sa production. Le transfert des plans d'arme à feu n'est pas le transfert d'armes à feu : elle suppose une création prescriptive, c'est à dire la mise en place d'une activité et d'une capacité de conception, et de compétences de production pour pouvoir reconstituer une fonction de production dont l'arme à feu est le produit, à partir d'une représentation graphique, dont on peut penser qu'elle a été accompagnée de commentaires écrits. Collins décrit le même type de phénomène, dans le cas de transfert de représentations sur la production de laser dans la science.

La transformation d'un contexte d'implantation peut revêtir plusieurs formes, qui se combinent fréquemment dans la réalité : des objets et des acteurs du contexte de l'objet technique transféré peuvent voyager d'un lieu à l'autre en accompagnant l'objet technique – transfert d'éléments de contexte -(plans, ingénieurs, ouvriers qualifiés, instruments de mesure, normes, modèle de calcul, articles de référence, manuel etc), les ressources locales disponibles dans le contexte d'implantation peuvent être aménagées et spécifiées pour être adaptées au nouvel objet, de nouvelles ressources et de nouveaux acteurs peuvent être créés.

L'une des règles du transfert est alors que plus l'objet technique est accompagné d'objets et d'acteurs de son contexte d'origine, plus son adaptation est facilitée, mais moins sa validité est large. La mise au point d'objets techniques simplifiés, compacts, d'utilisation aisée (ne requérant pas de compétences spécifiques), ne nécessitant pas de transformation importante du contexte facilite leur généralisation.

A un niveau plus global, la généralisation suppose également la transformation des territoires économiques.

Rosenberg le souligne parfaitement (Rosenberg 1982), pour devenir une technologie supérieure, l'innovation doit transformer les territoires dans lesquels elle s'inscrit. Le coke n'était pas, d'abord, unilatéralement supérieur au charbon de bois. Il l'est devenu par l'accroissement de la taille des hauts fourneaux et les économies d'échelles qu'il a généré. Ce n'est donc pas la bataille du coke contre le charbon de bois, mais la bataille du réseau formé par les fournisseurs de coke, les producteurs de fonte utilisant les grands hauts fourneaux, les utilisateurs de fonte à bas prix et faible qualité contre les producteurs de charbon de bois, les petits hauts fourneaux traditionnels, les utilisateurs de fonte de haute qualité.

Lors de la mise en place de la politique sidérurgique de la France, à la sortie de la seconde guerre mondiale ne se joue pas la bataille des petits laminoirs contre les grands laminoirs à large bande, mais à travers eux, la bataille de la production de masse contre la production flexible (Piore et Sabel 1984), de petites usines de proximité, produisant à la demande des qualités d'aciers variés, avec des ouvriers de tradition hautement qualifiés inscrits dans des filiations et dans des bassins d'emploi locaux, et des ressources locales contre les grandes usines intégrées au fil de l'eau, produisant pour un marché industriel de masse stable et peu exigeant en matière de qualité, avec une main d'œuvre peu qualifiée sans tradition ouvrière et des techniciens et ingénieurs concepteurs, avec des ressources en provenance du monde entier (Jolivet 1999).

Lors de la controverse ayant opposé EDF à Renault à propos de l'avenir de la voiture électrique vs la voiture à essence (Callon 1979, 1987), les deux entreprises mettent en scène deux sociétés radicalement différentes, l'une composée de consommateurs 'urbains post-industriels', de batteries aux performances améliorées, d'entreprises automobiles réduites à l'état de producteurs de châssis, d'un ministère de l'environnement capable d'imposer des règles draconiennes en matière de pollution et de bruit contre le consommateur attaché à l'automobile comme véhicule distinctif, les automobiles traditionnelles améliorées sur le plan de la pollution et du bruit, les entreprises automobiles comme industrie au cœur de la société et de la structure de consommation, un ministère de l'environnement à pouvoir d'action limité.

3.3) Le difficile enrôlement d'acteurs externes

Le monde de la généralisation présenté jusqu'ici est propre et lisse. Nous avons en effet considéré essentiellement le point de vue de l'innovateur, en nous plaçant dans l'hypothèse où ses efforts pour transformer l'économie seraient payés de retour. Ce point de vue singulier s'inscrit pourtant dans un univers nettement plus complexe, composé non pas d'un innovateur, mais de

plusieurs, cherchant à diffuser leur innovation. Les théorisations de l'objet technique, les efforts de classification sont en bien des occasions l'objet de violentes controverses (Bijker et Pinch 1987, Callon 1987, David 1985, Bowker 1992). Les adopteurs potentiels sont l'objet de sollicitations multiples. Les articles sont contestés, et les brevets contournés.

Qui maîtrise le réseau ?

Comment articuler des univers aussi différents que ceux des fournisseurs de matières, des laboratoires de R&D, des utilisateurs, des producteurs, des instrumentistes, des chercheurs académiques, des financeurs intervenant dans la construction des espaces technologiques ?

Comment articuler des niveaux aussi différents que ceux des usines de production, des entreprises, des associations professionnelles, des ministères, des associations internationales ?

L'une des difficultés tient à ce que les acteurs de l'entreprise n'ont pas les moyens, à eux seuls, d'exercer un contrôle étroit sur cette articulation. Ils peuvent certes, et cela constituera l'un de nos arguments, chercher à enrôler d'autres acteurs, à créer des alliances, à mettre en place des relations, des coopérations (Cohendet et Alii 1992⁵¹¹), à structurer des groupes d'intérêt sous la forme de clubs. Ils peuvent chercher à passer des contrats, s'attirer la bienveillance d'autorités supérieures administrative, politique ou scientifique, en appeler, en cas de conflit, à la règle et à la législation. Mais fondamentalement, la circulation de l'objet technique leur échappe, car elle fait entrer en scène d'autres acteurs –producteurs, concepteurs et utilisateurs 'potentiels', souvent distants, parfois inconnus et inattendus : le terme générique d'*imitation* englobe l'ensemble de ces comportements de recherche de profit. Car les qualités qui facilitent la circulation de l'objet technique, malléabilité, transportabilité, appropriabilité, font également sa faiblesse, et soumettent les échanges à un risque d'opportunisme, et d'appropriation incontrôlée (Teece 1986).

La capacité à maîtriser l'extension du réseau, et la construction des relations producteurs-utilisateurs, doit être complétée par une capacité d'adaptation, de réaction à l'imprévu, d'apprentissage et de stratégie permettant de maintenir une forme de cohérence globale autour de l'objet technique : il s'agit pour les acteurs, aussi bien de développer des anticipations, que de développer une capacité d'action pour conformer l'économie à leurs anticipations ('prescription créatrice' Foray 1989). Dans certains cas – le cas de Bessemer et de son convertisseur (Misa 1992), le cas de Schlumberger et de son appareil de mesure géophysique destiné au sondage des puits de pétrole (Bowker 1992) le cas de Remington et de son clavier QWERTY (David 1985)-

⁵¹¹ Cohendet, P., Heraud, JA, Zuscovitch, E. (1992) "Apprentissage technologique, réseaux économiques et appropriabilité des innovations" in : Foray, D. Freeman, C. (eds) op cit. pp. 63-78.

une entreprise réussit à obtenir le contrôle de l'espace technologique et à devenir incontournable. Dans d'autres cas – le cas d'EDF et de la voiture électrique (Callon 1987), le cas de Ford et de la Général Motors (Abernathy 1978) le cas de Diesel et de son moteur (Latour 1987)- l'espace technologique leur échappe.

Latitude de l'adopteur et effets d'entraînements collectifs

L'inefficacité relative des droits de la propriété intellectuelle (Cohendet et Alii 1992, Foray 1995), l'échec des auteurs des articles à convaincre ses lecteurs forment symptômes d'une liberté inaliénable de l'adopteur. L'adhésion, l'imitation, la compétition, la coopération sont alors autant de modalités de comportements possibles, conditionnés en partie par les investissements consentis. Il nous semble essentiel de ne pas limiter la capacité stratégique des entreprises à l'imitation de l'entreprise innovante. Les prétendus imitateurs possèdent toujours la possibilité de la création technologique. La compétition prend alors la forme d'un rapport de force entre différents clubs, différents réseaux d'alliance (Misa 1992, Bowker 1992), différentes théories technologiques (Fujimura 1988), différentes classifications (Misa 1992).

Cette liberté fondamentale de choix, ainsi que le souligne Arthur, ne doit pas faire oublier la force d'entraînement des dynamiques collectives et de la création d'irréversibilités fortes. L'adhésion conditionne l'inclusion ou l'exclusion du club ad hoc formé autour d'une nouvelle technologie. Pour bénéficier des apprentissages collectifs et de la dynamique d'extension du réseau, des connaissances produites, des instruments mis au point, des complémentarités, il faut adhérer. Une fois l'adhésion prise, les décisions d'investissement intègrent le poids des capitaux accumulés. Cela tend à créer un effet de cohérence: les agents sont d'autant plus aisément convaincus que l'adoption sert leurs intérêts. Fujimura (1988) cite ainsi l'exemple du National Cancer Institute, satisfait de trouver dans le développement de l'oncogénétique une justification de leurs investissements passés en partie contestés.

De ce fait se crée avec les irréversibilisations mises en place un effet d'entraînement ('*bandwagon effect*' Fujimura 1988). Cet effet d'entraînement est lié à la force des irréversibilités et des associations se mettant en place, et au caractère inclusif/exclusif de l'adhésion. Plus le club est large et les effets d'apprentissages forts, plus le risque d'isolement technologique augmentent ('*angry orphans*' David 1987). Dans le cas de l'oncogénétique, Fujimura (1988) montre que les effets d'entraînement liés à la mise en place de programmes de recherche dotés de fonds importants, à l'ouverture d'une série de postes et de carrières dans le secteur public et privé, à la dynamique d'apprentissage collectif ouvrant à la fois une série de questions prêtes à l'emploi et d'outils préexistants permettant d'y apporter rapidement des solutions viables et rentables, des collègues avec

qui échanger et coopérer, des formations spécifiques, des supports de valorisation liés à une attente collective ont considérablement influencé la dynamique d'adoption. “*This infrastructure then constrained and influenced the decisions of new investigators*” (Fujimura 1988, p.277). Lorsque l'objet technique incarnant l'innovation n'est plus problématique, et qu'il peut être utilisé dans une logique routinière, les attentions peuvent se focaliser sur d'autres problèmes.

IIB Modalités d'investissement et type de généralité

“*Perhaps there is nothing special or particularly dramatic in the way technological paradigm come into being. The interesting question may rather be how certain technological achievements (such as the DC-3) come to be recognized as exemplary or paradigmatic*” (Van Den Belt & Rip 1987, 139⁵¹²)

Le processus de généralisation des innovations singulières, et leur intégration dans une dynamique technologique peut prendre des formes extrêmement variables, inséparables de la singularité du processus et des espaces dans lesquels s'effectuent cette expansion. Ce sentiment de variabilité et de complexité des processus, liés en partie à la multiplicité des acteurs et des rationalités impliquées, est encore renforcée par la dimension compétitive de la dynamique technologique, qui fait qu'à tout moment, un ordre émergent peut être dénoncé (Boltanski 1984), des ordres alternatifs peuvent émerger autour d'objets techniques et de théories technologiques entrant dans une épreuve de force. Dans la patiente extension du réseau mis en place peuvent à tout moment surgir des imprévus, des dissidences mettant en question l'ensemble de l'édifice constitué : le cas de l'injection de fuel (partie 1) illustre cette fragilité, cette réversibilité menaçant les territoires économiques.

De la même manière que l'investissement innovatif peut être conçu comme un effort visant à stabiliser une fonction de production localisée, mettant en relation des ressources spécifiques, un objet technique et une production – pour que l'innovation tienne – l'investissement collectif, dont nous allons nous efforcer de préciser le caractère coordonné, présidant à la généralisation, peut être dans une large mesure, compris comme un effort pour lutter contre la *dissociation* de l'objet technique, la *dénonciation* de la théorie qui le supporte, la déstabilisation de l'édifice patiemment construit.

⁵¹² Van Den Belt, H. & Rip, A. (1987) “The Nelson-Winter-Dosi Model and Synthetic Dye Chemistry” in : Bijker, W., Hughes, T., Pinch, T. (eds) *The Social Construction of Technological Systems*. MIT Press. Pp. 135-158.

Les questions auxquelles nous allons nous intéresser dans la suite concerne donc les modalités de cet investissement collectif, les dispositifs d'accumulation mis en place, et la nature des capitaux accumulés et irréversibilisés : qu'est ce qui s'accumule, où, et comment, dans le cadre des processus de généralisation ? Nous allons voir que les échanges entre agents économiques vont bien au-delà de la 'contagion par bouche à oreille' proposée par Mansfield (Mansfield 1961).

1) L'axe technologie- objets techniques

Le modèle de Mansfield représente une vision extrême de la technologie, dans laquelle seule un objet technique figé circule entre les acteurs. Alors qu'il cherchait à expliciter les mécanismes micro-économiques au fondement de la croissance et du progrès technique, cela contraignait Mansfield à les rejeter aux confins de son modèle, sous la forme, tautologique de la supériorité intrinsèque de l'objet technique, et, sous forme implicite, par le retour sur investissement obtenu de la part des imitateurs, liés à des progrès de productivité. Dans ce modèle, l'information est donc transparente, au sens où elle ne coûte rien et où elle n'affecte pas des calculs ancrés sur l'économie réelle', physique.

Nous proposons de considérer la technologie comme une représentation collective étroitement articulée avec une diversité d'objets techniques pris dans des situations de production et d'utilisation. C'est de cette *correspondance* que nous semble émerger le caractère cumulatif de la technologie.

L'axe technologie – objets techniques se situe au cœur de la validité paradigmatique, et ouvre la possibilité d'une cumulativité. La large généralité de cet axe dépend de la distance parcourue entre l'objet technique et les mondes de l'abstraction. La large validité d'une technologie repose en partie sur sa généralité –son caractère abstrait-, mais aussi, indissociablement, sur la diversité des situations concrètes auxquelles elle correspond. Avec l'élargissement de sa base installée, son caractère incontournable, son pouvoir d'attraction s'accroissent, créant de puissantes irréversibilités.

Représentations, technologie, base installée

Les représentations écrites et graphiques – les énoncés (Latour 1989) - forment des supports aisément manipulables facilitant les mises en relation, la circulation, les rapprochements et les distanciations, les conflits et les coopérations. Elles permettent d'étendre la validité et la généralité d'un objet technique concret, par son inscription dans des mondes à large portée, constituées de catégories, de concepts, de lois.

Ce caractère opératoire essentiel au processus de généralisation, est complété par une dimension classificatoire au fondement de l'instauration d'une cumulativité : dans la confrontation

s'élabore une théorisation. Les représentations s'échangent, se confrontent, s'amendent, permettant aux acteurs de former un 'monde commun', une représentation collective de la technologie, de ses performances, de sa valeur. Par comparaison et analyse, les acteurs se trouvent ainsi en mesure de construire des catégories, d'ordonner différents objets techniques en mesurant leur distance technologique, d'établir des équivalences entre objets techniques classés sous le même type, dans la même alternative, d'effectuer des anticipations et des évaluations sur le papier sur les avantages respectifs de telle ou telle alternative, sur le sens de l'évolution de l'espace technologique. En organisant les représentations les unes par rapport aux autres, les acteurs ordonnent le monde technologique. Fujimura (1988) indique bien le rôle de ce caractère unificateur – à large validité et large généralité – dans le succès de la théorie oncogénétique : *“The unifying theory appealed to scientists because of its elegance, a term they use to describe a theory that can precisely and simply explain many disparate observations. Oncogene theory proponents claimed to have developed a ‘one-size-fits-all’ molecular explanation for many different types (classifications) and causes (causal explanations) of cancer. The ultimate claim was that their research might lead to a common cure, a ‘magic bullet’ for cancer”* (Fujimura 1988, p. 270).

On peut s'interroger avec Collins, sur le caractère miraculeux de l'émergence d'un ordre à partir de la multiplicité et de la singularité des objets techniques concrets. Le suivi du processus de la progressive constitution d'un classement, de catégories, de représentations communes, et la mise en place d'accords sur une échelle de performance offre une réponse concrète à cette question : la présentation écrite et graphique, liée à l'élaboration d'une techno-logie, procède à une mise en ordre fondée sur la remontée vers l'essence, l'identité paradigmatique organisant virtuellement l'ensemble des formes prises par les objets techniques.

Cette coordination des représentations prend effet par la réalisation des investissements des différents adopteurs. L'enrôlement se traduit par la mise en concordance de tout un ensemble d'investissements d'agents individuels. Par le biais de cette coordination des plans d'investissement se constitue progressivement une base installée, qui si elle n'est pas totalement unifiée, permet d'entretenir une correspondance avec la techno-logie, tout en réalisant ses prédictions ('prescription créatrice' Foray 1996).

Nous ne posons en aucun cas l'hypothèse d'une théorie unifiée, immuable, indépendante. La technologie est vivante, nous y avons largement insisté. Rappelons que pour nous, la technologie épouse strictement les contours des objets techniques, des compétences mises en œuvre, des diverses représentations qui en sont données par les acteurs, des instruments de mesure qui sont mis au point pour en évaluer les effets. Elle se raffine avec l'apparition de nouveaux objets techniques localisés, elle est destabilisée par une dénonciation, elle se renforce, elle s'ajuste avec le développement d'une

base installée qui lui correspond et qui donne à voir la réalité de son efficacité. La représentation collective forme le fondement d'une capitalisation. La capitalisation forme le fondement d'une théorisation.

La technologie, par son caractère prescriptif et classificatoire, possède une force d'organisation de la cumulativité. Elle oriente les investissements de ceux qui y adhèrent dans une même direction. Cette cumulativité n'est pourtant pas linéaire : elle s'alimente de controverses et d'arguments, elle s'élabore sur certains points de tension par la mise en place de protocoles et d'ancrage dans la légitimité de théories scientifiques, plus abstraites, porteurs d'une rationalité universelle indépendante de l'espace et du temps, elle se diversifie et s'affine à partir de problèmes pratiques rencontrés dans son application. La production d'objets intermédiaire permettant de guider l'application, d'alimenter cette correspondance, de la réguler en pratique est un élément crucial.

Instrumentation, gisement de progrès et renforcement des correspondances

Nous proposons de considérer que l'un des aspects essentiels de cette dynamique tient à la constitution robuste d'un axe théorie technologique - objets techniques, caractérisé par son efficacité pratique et la mise en évidence de gisement de progrès facilement exploitables sur le papier et dans les usines. Une telle efficacité autorise la mise en place d'anticipations (stabilité, prédictibilité, calculabilité), et le passage d'une économie de l'innovation à une économie de la production.

L'exemple de la teinture synthétique présenté par Van Den Belt et Rip offre une remarquable illustration de ces phénomènes (Van Den Belt et Rip 1987). Le succès de la chimie dans le secteur textile peut en bonne part, être attribué à la mise en place de relations entre des chercheurs industriels et des chercheurs académiques. Associant leurs efforts, ceux-ci ont co-produit un axe 'technologie - objets techniques' affublés de méthodes et d'instruments intermédiaires, et ont créé un pont entre théorie et pratique, ancrant la théorisation chimique dans une efficacité pratique. A partir d'une théorisation chimique des azo dies, il était ainsi possible, à moindre frais, par l'application des techniques mises au point, d'exploiter un gisement de progrès important, à la fois en qualité (diversification des couleurs) et en quantité (caractère automatisable et incorporable des méthodes), sonnait ainsi l'acte de naissance de l'industrie prospère de la teinture synthétique. Voici comment les auteurs évoquent ce phénomène : *“The attempts at elucidation of the chemical constitution can be seen as the first steps towards a new, more general heuristic : ‘look for the muttersubstanz’ (that is the skeleton of the dyestuff’s molecule) and if it is found, each derivative of the muttersubstanz may be an innovation () The paradigm of purposeful synthesis was at first directed toward dyestuffs, but the*

general heuristic turned out to be powerful and adaptable to new areas of application, especially pharmaceuticals” (Van Den Belt et Rip, 1987, p. 144)

Sauf à consacrer le caractère magique de cette correspondance, l'économiste se trouve mis en demeure de qualifier le processus par lequel celle-ci voit le jour et se renforce. Cette mise en correspondance est le fruit d'un travail, porté par des acteurs. Comme l'a noté Thévenot (1996), les ingénieurs sont traditionnellement porteurs, et chargés de la production de représentation appliquant une généralité scientifique. Une part non négligeable des relations 'recherche – industrie' peuvent également être analysées dans cette perspective. Plus les acteurs impliqués œuvrent dans un univers abstrait des conditions de production, plus la chaîne de représentations est longue, et plus la théorisation est générale et possède donc la capacité de s'appliquer à un nombre varié de situations.

La mise en relation de l'univers de la technologie abstraite et des situations concrètes de leur application requiert la mise en place d'outils et d'instruments de traduction, d'objets intermédiaires (Callon 1986), ou d'acteurs assurant cette fonction (Hatchuel 1997 et les habilleurs d'horaires). Ces intermédiaires peuvent être rapprochés de ce que Thévenot (1985) nomme les *investissements de forme* : normes, procédures, manuel, instruments, capteurs, formules, instructions... circulant entre les acteurs et formant un cadre à l'action productive. Ces formes facilitent la mise en conformité des situations concrètes avec leur théorisation par l'application de mesures universelles permettant des mises en équivalences générales entre elles : le temps, la monnaie, les poids et les mesures. L'instrumentation occupe, comme l'indique l'exemple de l'exploration maritime développée par Law, une place prépondérante dans les échanges d'intermédiaires : les instruments constituent autant de boîtes noires incorporant et représentant des théories, embarquées dans les situations concrètes, et structurant le cadre de l'action, tout en agissant comme autant de capteurs mis en mesure par les théoriciens ou les décideurs à partir desquels des enregistrements remontent et se capitalisent – sous formes de données - dans les catégories et les critères de la théorie. Star et Griesemer (1989) montrent comment la constitution d'une théorie, d'une systématique, d'un muséum d'histoire naturelle répertoriant le monde en catégories, en espèces, en genre, en familles est indissociable de la mise au point d'un formulaire et d'instructions de collectes balisant le cadre de l'action des différents amateurs livrés à l'infinie complexité de la nature californienne et chargés d'en extraire la matière.

Contrairement aux investissements d'adoption, répondant à une logique individuelle de décision de chaque agent, les investissements de forme posent la question de leur source : qui investit dans ces outils à caractère collectif ?

La littérature sur les standards établit une distinction entre les standards *de jure*, édicté par l'autorité supérieure d'une institution volontaire, et les standards *de facto*, produit du jeu de

négociation des acteurs. Cette simplification est sans doute un peu hâtive, ou, tout le moins insuffisante. Posons qu'aucun standard, aucune règle, aucune norme, aucune procédure n'a de poids et de valeur, considérée en dehors d'une structure collective organisée capable de la faire respecter. Un standard individuel n'a pas plus de valeur qu'une règle qui ne vaudrait que pour un individu : ces investissements de formes ne prennent leur sens que comme outils collectifs, comme outils de coordination d'agents distincts. Or il est aisé de faire le lien avec le paragraphe précédent, explicitant le rôle de la théorisation dans l'articulation des investissements individuels. Une série d'investissements individuels coordonnés n'est pas assimilable à une série d'investissements individuels : elle suppose, elle crée, elle fonde la possibilité d'un intérêt collectif. Rappelons que nous proposons de considérer que l'adhésion à la technologie, prend la forme d'un investissement, non seulement en R/D, mais plus radicalement en objet technique. Cette structure de club, fédérant les intérêts individuels, peut alors prendre en charge la mise en commun de standards de facto et l'édiction de normes et de règles de jure.

Cela n'empêche en aucun cas que des jeux s'organisent entre les différents membres pour imposer tel ou tel objet intermédiaire plutôt que tel autre. La firme innovatrice, en particulier, de la même manière qu'elle est porteuse d'une motivation à partager des représentations de l'innovation, facilitant l'enrôlement d'autres agents, se trouve pour les mêmes raisons incitée à produire des objets intermédiaires facilitant la validation et l'adhésion. dans le cas présenté par Michel Callon (1986) à propos des coquilles St Jacques, l'innovateur est un collectif de chercheur édictant des objets intermédiaires au nom de l'intérêt collectif des pêcheurs, mais surtout avec l'autorité des collectivités locales.

David et Foray (1996) utilisent la métaphore de l'exploration géologique pour rendre compte des effets cumulatifs de la circulation des connaissances. Callon (1986) montre également que l'activité des chercheurs du CNEXO se traduit progressivement par la constitution d'une carte inédite de la baie de St Brieuc. Law (1987) explique l'étroite correspondance entre l'expansion portugaise et la constitution de cartes d'un genre nouveau.

Cette cartographie représente la projection d'une certaine théorisation, d'une certaine vision du monde, qui nous en apprend autant sur ses auteurs et les procédés de sa production que sur le territoire mis en carte. Il y a autant de carte que de théorie de l'objet. Mais la carte donne à voir, sous un certain angle, en un coup d'œil, l'ampleur de l'accumulation réalisée dans le cadre de ce paradigme, et le gisement potentiel encore à exploiter : elle *totalise* (Bourdieu 1980). Elle trace les contours d'un monde économique et facilite tout en y incitant, l'exploration cumulative de ce monde. Van Den Belt et Rip notent la mise en évidence d'un gisement de progrès dans le secteur de la teinture synthétique à partir de la constitution de l'axe 'technologie- objets techniques' : "*Hofmann remarked that 'Griess's*

method' (as he called the coupling reaction !) had opened up a vast domain for the synthetic dye industry, of which the limits were not yet within sight ; indeed, it pointed the way to an endless series of new dyes. Hofmann's disclosures opened the eyes of other chemists to the immense possibilities of the field of azo dyes." (Van Den Belt et Rip, 1987, p. 148).

L'importance de ce phénomène est également visible dans le cas du génie génétique – recombinant DNA ou rDNA en particulier - et ses applications à la santé humaine (Fujimura, 1988). Nous avons évoqué l'importance du lien établi entre la théorie oncogénétique et les techniques de rDNA leur permettant d'accéder à une validation pratique: ce que Fujimura appelle le 'package'. Nous avons également noté la dimension unificatrice de la théorie oncogénétique dans sa recherche pour la balle magique 'the magic bullet'. Fujimura précise les mécanismes d'enrôlement attachés à ces qualités: "*Oncogene theory proponents enrolled allies behind their package not only by claiming to have accounted for findings in many other lines of cancer research, but also by framing and posing doable problems on oncogenes for other researchers to investigate. That is they posed questions which: (1) scientists could experimentally investigate using recombinant DNA and other molecular biological technologies; (2) laboratories were already organized and equipped with resources to handle, or could easily import the requisite resources and (3) satisfied significant audiences. The proposed problems were both specific and general*" (Fujimura 1988, p. 270)

Deuxièmement toute cartographie est le produit d'un point de vue instrumenté, et de ce fait, met en relation une vision du monde avec des procédés d'exploration et d'enregistrement de ce monde. La carte ne se contente pas de donner un point de vue synthétique sur un monde, elle justifie et fait état de l'existence d'une technologie ayant déjà permis l'exploitation calculée stable et prédictible d'un territoire, et ouvrant par extension, la possibilité d'exploiter de façon stable, prévisible et calculable, d'autres espaces du territoire pour ceux qui l'adopteront. Dans le cas des coquilles de St Brieuc (1986), ce sont les relevés de notes de pêcheurs, formatés par les chercheurs, qui constituent les enregistrements mis en carte et en catégories statistiques par les chercheurs pour contrôler la gestion du stock de coquille dans la baie. Dans cet exemple, l'on observe parfaitement le rôle de la carte dans la coordination d'actions prescrites. Dans le cas du package rDNA et théorie oncogénétique, on observe le caractère incitatif de l'exposition cumulée des résultats obtenus et des gisements à exploiter – comme le note non sans humour Fujimura, la carte est en ce sens une véritable opération de marketing ('marketing the package' Fujimura 1988, p. 270).

La carte objective le territoire économique à explorer, tout en liant indissociablement cette exploration à la théorie qui la sous-tend, au laboratoire ou à l'institution qui la construit et possède le pouvoir de totalisation. Chaque exploration, instrumentée selon ses préceptes, renforce –réalise- la

validité et la valeur du lien institué entre théorie et réel. Les pêcheurs, en acceptant leur rôle, facilitent l'accumulation d'enregistrements, de données, qui donnent leur force à l'ensemble de la théorisation promue par les chercheurs du CNEXO (Callon 1986).

Tout enrôlement paradigmatique de ce type est prescriptif, au sens où il suppose l'adhésion à un cadre de penser conditionnant la nature des apprentissages. La théorisation oriente les efforts d'apprentissage et leur fournit un cadre. Le développement d'un monde commun s'accompagne ou bénéficie de dispositifs institués ou en voie d'institution organisant ces apprentissages et articulant des lieux d'échange et de mise en ordre, et des lieux de production.

2) Dispositifs d'accumulation collectifs, apprentissage généralisé

La thèse d'Arthur (1988), selon laquelle la dynamique d'adoption se trouve placée au cœur d'un processus d'apprentissage – rendements croissants d'adoption - trouve donc ici un écho et un approfondissement, à partir du moment où sont posés les fondements collectifs et partagés de cet apprentissage, autour de la constitution d'une mise en correspondance entre technologie et objets techniques localisés. Le pouvoir d'attraction des 'packages' sont d'autant plus élevés qu'ils sont adoptés, du fait que la théorie qui les porte s'en trouve plus incontestable, que la base installée validant son efficacité est large, que les objets intermédiaires permettant d'appliquer la théorie en pratique et de théoriser les pratiques, et en particulier les outils d'instrumentation sont nombreux et largement utilisés. La cumulativité est fonction de la réutilisation du package comme référence.

Lorsque le réseau constitué prend de l'ampleur, la dynamique d'apprentissage déborde très largement le cadre de l'innovation localisé, et devient indissociable de la mise en place de dispositifs collectifs d'accumulation permettant à la fois la spécialisation et l'intégration des connaissances et des objets produits. En se centrant sur le processus de décision, comme le fait Arthur (1988), on s'interdit de comprendre les mécanismes par lesquels une accumulation se produit, la nature des capitaux accumulés, aussi bien que la division du travail qui en résulte, ces différents aspects ne pouvant être que postulés sous le terme générique de rendements croissants d'adoption. Nous allons donc nous efforcer d'entrer dans le vif des rendements croissants.

Enrôlement et création d'asymétrie

Il se crée, dans le rapport à l'objet, une asymétrie fondamentale entre concepteurs, producteurs et utilisateurs d'un objet technique. Chacun de ces acteurs, dont on peut par hypothèse, et dans le but de simplifier notre propos, poser que leur identité n'est pas prédéfinie au temps $t=0$ de l'innovation, est

amené, pour que l'objet technique fonctionne efficacement de façon répétée – c'est à dire dans une logique de production-, à approfondir les conditions de conception, de production et d'utilisation de l'objet technique.

En ce sens, la dynamique d'adoption est tout à fait essentielle, car les adopteurs ne sont pas uniquement confrontés à un choix binaire – adoption ou non adoption – mais à un choix lié, comme le note judicieusement Callon (1986) à l'enrôlement – c'est à dire le choix d'être concepteur (création technologique), d'être producteur (imitateur), ou d'être utilisateur (adopteur). Il existe une situation de symétrie virtuelle entre utilisateurs, producteurs et concepteurs (⁵¹³). Pourtant, ainsi que nous l'avons noté, s'il fallait être capable de concevoir un briquet, se procurer au meilleur prix les matières qui le constituent, et le réaliser, notre vie quotidienne serait très compliquée, et l'on en serait probablement resté à la technique des silex. L'adoption de l'innovation par des utilisateurs –création d'un marché – crée une situation d'interdépendances fondée sur une asymétrie. Le point essentiel de notre argument consiste à affirmer qu'en fonction de cette identité, le rapport de prescription est plus ou moins fort : le producteur se soumet à une création prescrite ou contrainte lui permettant de négocier certains aspects de son cadre d'action, l'utilisateur se soumet à un cadre d'action fortement prescriptif, tout à fait assimilable à ce qu'Hatchuel décrit à propos de l'atelier taylorien (Hatchuel 1994). Pour l'utilisateur au sens plein, l'objet technique constitue une boîte noire dont il doit s'accommoder, une fois achetée : il adhère, en étant utilisateur, à 'l'ordre des choses' mis en place par les concepteurs. Il contribue donc, ce faisant à la généralisation de l'ordre d'abord localisé constitué dans l'espace d'innovation, puis consolidé dans la correspondance entre objet technique et techno-logie. D'un autre côté, son autonomie décisionnelle et organisationnelle favorise la rationalisation de l'utilisation et des décisions d'utilisation, et stimule donc, en retour, une série d'améliorations chez le concepteur.

Cela nous amène donc à développer la thèse selon laquelle la division du travail fait jouer ses effets, dans le cas de l'innovation, aussi bien transversalement, au niveau industriel –effet Smith -, que verticalement, au niveau organisationnel –effet Chandler-. Il en découle que le cadre conceptuel développé à propos de l'espace d'innovation (partie 2) demeure tout à fait opératoire avec la généralisation de l'innovation, cette fois à un niveau 'inter-organisationnel' (⁵¹⁴). Si l'on considère l'utilisateur comme un producteur auto-consommant sa production technologique, alors on aperçoit que la fonction d'utilité n'est pas fondamentalement différente d'une fonction de production. La différence tient, non pas aux catégories, mais aux types d'apprentissages autorisés, et donc à

⁵¹³ Précisons à la marge que même en cas d'adoption, la nature des connaissances produites chez les 'utilisateurs' – et par conséquent leur statut d'utilisateur - dépend fondamentalement du mécanisme d'appropriation (Eyraud et Alii 1986). Ils peuvent se cantonner à accumuler des savoir-faire pour maîtriser l'objet en pratique, et l'adapter à son environnement et ses besoins spécifiques. Ils peuvent intégrer des savoir portant sur les moyens de production et les situations de production, favorisant l'optimisation des situations d'utilisation. Ils peuvent remonter aux savoir des concepteurs, aux conditions de production de l'objet technique lui-même, lesquels autorisent l'intervention sur l'objet lui-même, et son adaptation optimisée à son contexte de production.

l'asymétrie de compétence crée par cette spécialisation des rôles. Une firme innovante dans le secteur des biotechnologies, par exemple, peut fort bien être un 'consommateur final' de téléphone, ou de coca-cola.

Les conséquences de cette asymétrie en terme de dynamique d'apprentissage et d'organisation de l'industrie sont extrêmement importantes. Nous avançons que c'est à cette condition que les rendements croissants d'adoption ('learning by using' Rosenberg 1982), les rendements croissants de production ('learning by doing' Arrow 1962), et les rendements croissants de conception ('learning by interacting' Lundvall 1988) peuvent prendre place, et que les capitaux produits peuvent s'accumuler de façon 'irréversible' au sein de dispositifs organisationnels et institutionnels. L'interdépendance asymétrique entre utilisateurs et concepteurs révèle la valeur de l'objet technique : elle ouvre la possibilité de l'échange. Par conséquent, la création de cette asymétrie allant s'approfondissant se situe au fondement même des mécanismes de développement industriel et économique.

Standardisation versus modularité : modalités de l'apprentissage collectif

Si l'on pose que l'objet technique est le fruit d'un certain état des connaissances, des compétences, et des outils formant ses conditions de conception, de production et d'usage, il apparaît que la mise en place d'une dynamique d'investissement lié à la spécialisation interdépendante suppose à la fois la possibilité d'un approfondissement (Foray 1996) – ou d'une rationalisation - et l'exigence d'une coordination. Il faut bien admettre que les modalités de règlement de cette tension sont aussi variées que les configurations des territoires économiques peuvent l'être.

Analytiquement, l'extension du territoire (marché plus organisations) prend théoriquement la forme d'une diversification spécialisée du nombre d'acteurs, avec la généralisation de l'innovation : développement d'un pool de concepteurs spécialisés dans le design 'architectural', développement d'un pool de producteurs, développement d'un pool d'utilisateurs (⁵¹⁵). Cette spécialisation des investissements entre en tension avec une exigence forte de coordination. La littérature relative à l'innovation a mis en exergue les limites d'un cloisonnement trop marqué des dynamiques d'apprentissages. Pour jouer son rôle intégrateur, la conception doit en particulier incorporer les connaissances développées par les utilisateurs -appropriabilité- et par les producteurs – manufacturabilité -. Cette tension justifie théoriquement la mise en place de dispositifs institués de

⁵¹⁴ Nous incluons ici dans ce terme la figure du 'consommateur final'.

⁵¹⁵ On peut encore raffiner le modèle comme le montre l'exemple de l'ordinateur (Steinmuller 1996). On peut ainsi trouver un pool de concepteurs et un pool de producteur pour chaque élément composant l'objet technique, un pool de concepteur et de producteur pour les différents éléments de la fonction de production.

régulation et de coordination, et ainsi que nous l'avons noté, d'objets intermédiaires facilitant la coordination.

La spécialisation forme une série de cadres à l'action. Un double phénomène d'apprentissage prend alors place au fil de la généralisation.

Premièrement, comme l'a montré Sahal (Sahal 1985), le simple fait d'accroître l'échelle de production, la dimension de l'objet, provoque des apprentissages. Cohendet et Alii (1992) indiquent, dans le cas des matériaux avancés : *“le cas des matériaux avancés est exemplaire de ce point de vue : il est impossible de faire aboutir complètement l'innovation sans accumuler une expérience de production significative (scaling up) et il en résulte des diminutions de prix qui favorisent de manière définitive le processus de diffusion”* (Cohendet et Alii 1992, p. 71). Le cas du développement de la production de masse dans l'industrie automobile constitue l'un des faits marquants de l'histoire industrielle (Abernathy 1978, Piore et Sabel 1985). Le développement de la Ford T a constitué un support d'apprentissage collectif et d'accumulation de capitaux dans la production, dans l'utilisation et dans la conception. La forte standardisation de l'objet technique, ne requérant pas de compétences d'entretien (standardisation des pièces de rechange, souci de robustesse), ni d'être un amateur de véhicule automobile a ouvert la voie à une utilisation de la voiture comme moyen de transport simple et pratique pour tout un chacun, c'est à dire un utilisateur incompetent à produire ou à concevoir une automobile.

Ce type d'apprentissage, correspondant à ce qu'Arrow a nommé l'apprentissage par la production ('learning by doing' 1962). Il repose sur l'approfondissement de savoir-faire toujours affinés permettant de maîtriser l'outil en pratique, de produire des outputs avec régularité, prévisibilité, stabilité. Il suppose la mise en place d'investissement en capital fixe, et en compétences humaines capables de tirer le meilleur parti des outils de production, ainsi qu'un investissement de forme permettant la mise en cohérence de l'ensemble productif. Il comprend aussi une meilleure connaissance des marchés externes, que ce soit des ressources entrant dans la composition de l'objet technique, de leurs sources d'approvisionnement, ou du marché des utilisateurs et de ses fluctuations. Ces apprentissages sont indissociables d'un apprentissage parallèle réalisé dans les centres de conception, concernant le cadre de l'action productif (Hatchuel 1994).

Deuxièmement l'utilisation répétée et diversifiée de l'objet technique par les utilisateurs ouvre également la possibilité d'un apprentissage collectif. Nous avons déjà largement évoqué cet apprentissage précédemment. La variété des situations singulières d'utilisation et la théorisation technologique sont mis en correspondance. La variété des situations de production et d'utilisation offre une opportunité d'adaptation des conditions de production et des conditions de conception de l'objet

technique, c'est à dire d'un apprentissage de second ordre, ou *deutero learning* ('*learning by interacting*' Lundvall 1988). Les producteurs accumulent certaines connaissances sur les situations d'utilisation de ses produits – organisationnellement à travers sa fonction commerciale, ou technico-commerciale – (Von Hippel et Tyre 1995). Les concepteurs peuvent s'intéresser aux conditions de production et aux conditions d'usage de son objet technique pour en améliorer le design, la manufacturabilité, l'appropriabilité (Von Hippel et Tyre 1995). En ce sens, la capacité à adapter et à s'adapter aux problèmes émergents au fil des épreuves et des mises en relation constitue un atout tout aussi déterminant que la capacité à bien concevoir, à anticiper d'emblée.

L'organisation de l'industrie repose sur la spécialisation des savoirs, des compétences et des activités et sur leur intégration. L'objet technique, ou plus exactement les objets techniques, sont au centre de ces arbitrages et de cette organisation. La nature des apprentissages réalisés dépend étroitement de la structure des relations tissées entre les différents acteurs clés, de la répartition des compétences dans le réseau qu'ils tissent. Le caractère paradigmatique de la technologie, la manufacturabilité, l'appropriabilité sont inscrits dans la constitution d'une division du travail et une dynamique d'apprentissage relayée par la mise en place de lieux de production spécialisés et de lieux d'échanges.

On peut envisager plusieurs modalités d'apprentissage collectif en fonction des relations tissées entre les acteurs et des dispositifs de coordination.

Lorsqu'un concepteur réussit à enrôler producteurs et utilisateurs autour d'une technologie, la spécialisation est forte, et la standardisation de la production et de l'utilisation est forte et prescriptive. Dans ce cas, la coordination est assurée par le concepteur à travers la mise au point d'un package comprenant l'objet technique standardisé, les moyens standardisés de production de l'objet technique, des procédures, des manuels, des normes permettant de réduire la diversité des contextes d'implantation et de favoriser l'intégration des enregistrements au sein d'une théorisation unificatrice.

Lorsque l'enrôlement échoue, la spécialisation et les apprentissages peuvent difficilement prendre place, favorisant l'émergence d'une multitude d'objets techniques et d'une multitude de théorisation.

Lorsqu'un concepteur réussit à enrôler les utilisateurs mais pas les producteurs, une compétition est livrée à la fois au niveau de la conception et de la production. Une spécialisation limitée peut prendre place par niche. La coordination ne pouvant être assurée par un concepteur, soit le marché, soit le club s'y substituent. Dans le cas d'un club, une forme d'hybridation formée d'emprunts croisés de boîtes noires peut voir le jour au niveau de la conception et de la production. De même, les

utilisateurs acquièrent la possibilité d'hybrider différents éléments modulaires pour composer un objet technique.

Vers des fonctions de conception, de production, et d'utilisation élargies : Inscription de la spécialisation dans les territoires économiques

Ce qui fait la force des caravelles, ce sont les cartes, les astrolabes, l'engagement du royaume : la caravelle est progressivement liée à un système élargi, un territoire économique constitué de capitaux hétérogènes –externalités de réseau- résultant d'une série d'investissements articulés autour de certaines finalités productives.

Si l'on revient à l'ordinateur comme exemple d'objet technique, on peut, pour le décrire, dérouler les réseaux de concepteurs, de producteurs, et d'utilisateurs composant ses différents éléments. Il faudrait y ajouter les contextes et interdépendances dans lesquels son utilisation est mise en œuvre. On constate alors que la logique de spécialisation, et d'intégration se sont traduit par l'inscription de l'objet technique dans une série de territoires économiques extrêmement variés, en partie autonomes et en partie interdépendants, noués ensemble par l'ordinateur.

Pour conclure sur ce point, notons que la réussite ou l'échec de la dynamique d'enrôlement a une influence essentielle sur la dynamique industrielle, et la constitution de territoires économiques. Lorsque l'atomisation fait rage, et que la création d'asymétrie échoue, l'accumulation, la spécialisation, et la coordination demeurent extrêmement limités. A l'inverse, la réussite des stratégies d'enrôlement crée une asymétrie de compétence formant le socle d'une accumulation spécialisée des capitaux, à la fois dans des lieux de production, de conception et d'utilisation, mais aussi, sur le plan institutionnel, pour réguler les échanges entre ces différents pôles. L'irréversibilisation augmente alors avec l'approfondissement de la division du travail, qu'elle soit transversale, ou verticale. Il en résulte une diversification, un élargissement des fonctions de production, de conception, et d'utilisation portant une dynamique collective d'apprentissage.

Chapitre 3:

Deux modalités de la généralisation des technologies d'injection de charbon

“The acquisition of information relevant to the technical environment of a given firm or plant is itself an inhouse activity, associated with R&D expenditures and their (uncertain) benefits. In an industry like iron and steel, this problem frequently tends to be magnified by the fact that ultimate knowledge about an innovation's performance in a specific production setting can be gained only through full-scale commercial operation” (Gold, 1980, p. 147).

Le chapitre 3 se propose d'étudier le phénomène de généralisation par lequel les innovations technologiques localisées d'injection de charbon, telles que nous les avons observées en cours de constitution chez J. et F Steel, (partie 2) ont débordé leur matrice locale et se sont étendues à l'économie. Les processus de généralisation suivis chez J et F steel représentent deux cas idéaltypiques tout à fait différents : l'un a suivi une logique de standardisation, et le second une logique

flexible et modulaire. Nous allons donc pouvoir suivre en détail la mise en place de ces logiques, la dynamique d'enrôlement et d'extension du réseau qui a prévalu dans chaque cas, les logiques d'investissements mises en œuvre.

Au-delà, nous allons nous efforcer de mettre en évidence le lien entre innovations singulières et espace technologique. De ce point de vue également, l'étude de cas se révèle riche d'enseignement, puisque les théorisations de l'une et l'autre entreprises se sont inscrites dans une controverse plus large, chacune occupant une position assez radicalement incompatible avec l'autre. Nous allons pouvoir suivre l'évolution de cette controverse, son influence sur la construction progressive d'une théorisation collective de l'injection de charbon, le poids de la recherche scientifique, d'une part, et de la validation pratique, d'autre part, dans l'apaisement du conflit, et la mise en place progressive d'objets intermédiaires par 'les entreprises les plus avancées' dans l'exploration des performances réalisables avec cette technologie.

III A Innovations singulières et généralisation

Les processus de généralisation suivis par les deux innovations singulières décrites précédemment (partie 2) correspondent à deux cas idéal-typiques, la standardisation, et la flexibilité modulaire. La comparaison permet d'espérer repérer les facteurs déterminants orientant la dynamique collective dans l'une ou l'autre direction. Il apparaît que la dynamique de généralisation n'est pas indépendante du processus d'innovation suivi dans la période de création technologique : le type d'investissement consenti durant cette première phase marque durablement la dynamique de généralisation. Le processus de généralisation n'est pourtant pas non plus une diffusion, un simple déroulement d'un programme inscrit dans l'objet technique, il varie en fonction des stratégies d'inscription qui le rende disponible, de la dynamique d'enrôlement que les acteurs s'efforcent

d'insuffler. Par dessus tout, la généralisation est entachée d'une incertitude profonde, liée à la complexification du jeu, à l'appropriation difficilement dictable que d'autres acteurs en font, et à la dimension pratique des investissements sans laquelle aucune technologie ne vit .

1) Prise en main par les utilisateurs

Dans la sidérurgie, la première installation commerciale joue fréquemment le rôle de prototype, conférant à ses utilisateurs le statut de ce que Von Hippel (1986, 1988⁵¹⁶) désigne sous l'expression 'lead user'. Notre approche de PCI a reposé sur l'hypothèse de l'importance des premiers utilisateurs et des premières installations sur l'ensemble du processus de diffusion. Ainsi que nous l'avons noté, les pionniers des études sur la diffusion ont été intrigués par les temps longs de 'diffusion' séparant la construction des premières installations et leur 'diffusion complète'. Ce temps de latence tient en partie au fait que les premiers utilisateurs forgent une expérience technologique au fondement de *la généralisation*.

Les acteurs de l'innovation se sont vus déléguer l'initiative de l'action innovatrice. Pour agir, il leur a été utile de procéder à une démarche de *simplification* de façon à traduire une tension collective en problème manipulable dans leur registre technique. En particulier, une série d'hypothèses et de choix ont été formulés concernant les utilisateurs, leurs intérêts et leurs comportements. Au moment de l'appropriation, ces hypothèses ont été radicalement mises en question.

1.1) La première installation: voie de passage entre espace d'innovation et espace de généralisation

Dans le cas du procédé d'injection de charbon, la mise en place d'"une première installation commerciale" a formé le support à la rencontre de deux mondes - le monde de la conception et celui de l'usage-. Elle a permis d'établir un lien entre dynamique d'innovation et logique de production. . Dans nombre d'autres cas - dont un exemple emblématique est l'automobile - la mise au point d'un prototype est souvent utilisée comme intermédiaire entre innovation et généralisation. Dans le cas de PCI, la première installation a constitué à la fois un prototype facilitant le test des hypothèses formulées, et une installation commerciale supportée par un investissement important.

⁵¹⁶ Von Hippel, E. (1986) "Lead Users: A Source of novel Product Concepts" in: *Management Science*, Vol. 32, n°7, July 1986, pp. 791-805. Von Hippel, E. (1988) *The Sources of Innovation*. Oxford UP. Les utilisateurs sont considérés comme les pionniers d'une nouvelle tendance à partir de deux critères: l'expérience, et l'intensité de leur besoin. De ce point de vue, le site de O. au Japon et de D. en France correspondent bien à cette définition. Ces deux usines ont formulé un problème particulier de besoin en coke motivant en principe leur intérêt pour les technologies d'injections. Toutes deux ont été parmi les toutes premières usines à injecter du charbon de façon industrielle (précédées uniquement par l'usine d'Ahlsland, de Donetsk, et de Pékin.).

Etant donné l'importance des investissements en jeu, et en considération des incertitudes importantes ayant présidées à la réalisation des premières installations commerciales, il peut paraître surprenant que les acteurs aient privilégié ce mode de passage à l'usage, au détriment d'étapes intermédiaires moins coûteuses. Du fait des exigences de régularité de fonctionnement des hauts fourneaux, auxquelles il faut ajouter la forte complexité des équilibres d'optimisation du procédé, l'utilisation de prototype présente pourtant une alternative attrayante.

L'explication tient à ce que le haut fourneau demeure en bonne part mystérieux. Aussi offre-t-il un bien piètre support à l'élaboration de connaissances systématiques tant il est difficile de circonscrire et de répéter des expériences sous conditions contrôlées sur cet appareil. Cela se traduit par un fort sentiment, partagé au Japon comme en France, et plus largement dans la communauté des hauts fourneaux, d'une singularité de chaque appareil.

Les acteurs que nous avons rencontrés tracent les contours d'une frontière entre expériences menées sur des 'model' et les conditions 'réelles' ou commerciales de production. Tant qu'une expérience industrielle longue de plusieurs mois n'est pas obtenue, les observations ne comptent pas pour des faits.

Un certain nombre de différences dans les manières de construire l'espace intermédiaire 'première installation commerciale' ont marqué les processus d'appropriation. L'un des faits remarquables tient à la prise en compte littérale du caractère prototypique de la première installation au Japon. En comparaison, le caractère expérimental de la prise en main de l'installation à D. a été contenu, les performances technico-économiques ayant constitué le moyen privilégié de rendre publique la maîtrise acquise sur le procédé.

1.1 a) *De l'utilisation à l'action sur l'objet: instrumentalisation de l'innovation à O.*

Dans ce qui suit, nous allons voir que dans une situation où la mise en fonctionnement de l'objet technique 'se passe bien', cette formulation ne signifie pas que 'rien ne se passe'. Il faut l'interpréter comme l'idée que le travail d'accommodation et d'appropriation réalisée par les utilisateurs parvient à stabiliser le fonctionnement de l'objet technique de manière suffisamment prévisible pour qu'il puisse être assimilé aux calculs des ingénieurs. Le caractère quelque peu chaotique de l'univers des pratiques présentées dans la suite ne doit, en conséquence, pas être interprétée comme une particularité de l'innovation étudiée, mais comme une situation tout à fait classique d'appropriation.

Espace d'innovation et représentation des utilisateurs

Les termes de l'engagement collectif pris relativement à la première installation d'injection à O. ont fixé un cadre bien défini à l'action innovante, cadre dans lequel le haut fourneau 1 de O. a été explicitement désigné comme le représentant privilégié de l'entreprise J. Steel. La division des tâches instaurée par le projet d'innovation a mis en rapport des binômes composés de membres du PET-PMD à l'interface entre les acteurs du site d'Ashland, d'un côté, et un groupe matriciel de correspondants hiérarchiques et professionnels de l'usine de O. décomposant l'innovation sur le plan organisationnel en spécialités et en fonctions caractéristiques de *l'espace de qualification* de l'entreprise J. Steel (Von Hippel et Al. 1990; Maurice et Alii 1988, Maurice 1998⁵¹⁷).

Maurice note justement que l'une des lacunes de l'économie de l'innovation consiste à faire abstraction des espaces de qualification au sein desquels ils se déroulent (Lanciano et Alii, 1993, Maurice 1998). Leur intégration permet pourtant, comme il le souligne, d'offrir un éclairage sur les différences nationales observables dans la mise en œuvre de l'innovation, lié à la reconnaissance de systèmes nationaux d'innovation (Maurice 1998). Cette argumentation entre en tension avec le travail de Piore (Piore 1968⁵¹⁸) soulignant précisément la discontinuité repérable entre la conception des objets techniques et leurs conditions de mises en œuvre : la question de l'usage est traitée de manière hypothétique et souvent elliptique dans la conception des objets. Ce débat éclaire le problème de la représentativité.

Nous proposons de considérer les modalités d'implication des utilisateurs comme l'un des lieux d'articulation essentiels de cette tension. Pour saisir la mise en relation dans sa spécificité, il est nécessaire de s'intéresser en détail à la forme prise par cette implication, c'est à dire au rapport entre *espace d'innovation* et *espace de qualification* (Lanciano et Alii, 1993). C'est en bonne part ici que se noue un aspect essentiel de la généralisation. Dans le cas de J steel, la *représentativité* des acteurs impliqués, le sens de la relation nouée, ne peut véritablement se saisir que rapportée à *l'espace de qualification* de cette entreprise.

Les modalités d'implication des utilisateurs dans le processus de création technologique chez J. steel ont été caractérisées par un effort de construction d'une forte continuité (Lanciano et Alii 1993,

⁵¹⁷ Maurice, M. (1998) "De l'espace de qualification à l'espace d'innovation (réflexion sur la dynamique de l'analyse sociétale)" in : Gazier, B., Marsden, D., Maurice, M., Sellier, F. (1998) *Repenser l'économie du travail. De l'effet d'entreprise à l'effet sociétal*. pp. 27-39.

⁵¹⁸ Piore, M. (1968) "The Impact of the labor Market Upon the design and selection of Productive Techniques within the Manufacturing Plant" in : *Quarterly Journal of Economics*, n°82, pp. 602-620.

Jolivet 1996, Maurice 1998 ⁵¹⁹). Elle tient au fait que les qualifications des acteurs retenus appartiennent explicitement à des catégories parcourant transversalement l'ensemble de l'organisation, et elles-mêmes inscrites dans des rapports réglés de relation entre acteurs organisés à la fois hiérarchiquement et par métier (division du travail). Parce qu'elle est organisée sur une base routinière dépassant la temporalité et le cadre localisé de l'espace d'innovation, cette *représentativité* a permis aux acteurs de jouer le double rôle d'acteurs de l'innovation, dotés d'une autonomie, et de représentants dotés d'une capacité à inscrire leurs actes dans l'univers plus large des réseaux existants.

La forme binomiale de la relation instaurée entre utilisateurs et producteurs indique la mise en place d'interactions par ajustement mutuel de proche en proche, de la conception à l'usage de l'objet technique. Les ingénieurs et opérateurs de production du haut fourneau 1 se sont vu confier, dans le cas PCI, la charge de représenter les utilisateurs de l'entreprise, et plus généralement de l'espace industriel japonais des haut fourneaux. Ils ont été impliqués tôt dans le processus de conception-réalisation de l'installation, participant activement, dans le cadre des binômes composés avec les ingénieurs du PET au transfert de la technologie Armco au sein de son nouveau contexte productif. Ils ont pu bénéficier d'une formation conséquente *in situ*, aux côtés des opérateurs d'Armco, destiné à faciliter la prise en main des opérations avec injection de charbon au moment du lancement opérationnelle.

En ce sens, *la mise en projet* a constitué un effort d'inscription de l'innovation dans les réseaux existants. L'organisation du travail retenue, reposant explicitement sur l'*espace de qualification* habituel, courant transversalement sur l'ensemble des sites de l'entreprise (hiérarchiques et professionnel), a permis d'asseoir la représentativité des apprentissages réalisés sur une base collective. Lorsque les acteurs de l'innovation et les représentants des utilisateurs agissaient, l'ensemble des utilisateurs et des hauts fourneaux de l'entreprise agissaient virtuellement avec eux.

L'irremplaçable alignement de l'objet technique avec son contexte de fonctionnement

Mise à feu en juin 1981, l'installation d'injection de charbon au haut fourneau 1 de l'usine d'O. est entrée en opération à son niveau de performance prévu au début de l'année 1982. Le calendrier prévisionnel de montée en cadence tenait explicitement compte de la prise en main de l'installation par les utilisateurs. La première étape prévoyait ainsi une injection à faible taux

⁵¹⁹ L'implication de représentants 'physiques' des utilisateurs dans les processus d'innovation japonais a été repérée comme un trait distinctif de l'organisation 'à la japonaise'. Imai, K., Nonaka, I., Takeuchi, H. (1985) "Managing the New Product Development Process : How Japanese Companies Learn and Unlearn" in : Clark, KB, Hayes, R., Lorenz, C. (eds) *The Uneasy Alliance. Managing the productivity – Technology Dilemma*. Harvard UP. pp.337-381.

permettant de ‘stabiliser les conditions d’opération’ (“ore/coke ratio, flame temperature, blast temperature, blast humidity, etc”⁵²⁰) proche de ce qui était connu avec l’injection de fuel.

Les moyens déployés ont été considérables. Les précautions prises ont été remarquables. Les efforts de représentation des utilisateurs ont été particulièrement importants. Le risque industriel a été optimisé par une conception fidèle aux recommandations d’Armco. La démonstration a été faite que l’injection de charbon se comparait sans difficulté à l’injection de fuel, ce qui permettait de positionner la technologie dans la continuité du patrimoine existant dans l’entreprise. On peut alors aisément saisir l’optimisme de l’un des ingénieurs de la section ingénierie, pour lequel le point clé du transfert a tenu à l’adaptation de l’appareil de distribution Armco : “*c’était le point technique le plus important dans le cas de l’introduction de PCI. En dehors de cela, la mise en route de cet équipement s’est passé relativement bien, sans gros ennuis...*”⁽⁵²¹⁾.

Pourtant, ce point de vue n’est pas partagé par les premiers utilisateurs de l’objet technique. D’après eux, en dépit d’un déploiement impressionnant de moyens et de savoir faire, l’alignement entre l’objet technique et son contexte de fonctionnement est demeuré irremplaçable. La prise en main de l’installation par les utilisateurs a révélé les limites d’une mise en projet étroitement planifiée. Le passage par l’usage a constitué une épreuve pratique, une étape indispensable à la mise au point effective de la technologie. L’un des acteurs directement impliqués dans le transfert, responsable de production, nous confiait ainsi que la prise en main de l’installation s’est accompagnée de deux problèmes majeurs du point de vue des usagers.

Premièrement, les utilisateurs ont rencontré un énorme problème de fiabilité dans l’utilisation des broyeurs. Les deux premières années “*quasiment, les deux broyeurs n’ont jamais fonctionné en même temps*”⁽⁵²²⁾. Pris de vibration, l’un des broyeurs a fini par se fêler, obligeant les utilisateurs à procéder à un colmatage : “*après l’installation, on a constaté que ça vibrait*” (ibid.). Nous verrons que globalement, ce défaut n’a guère affecté la performance affichée de l’installation d’injection. Mais les chiffres globaux masquent un travail régulier de rafistolage des appareils de broyage, qui du point de vue des opérateurs confrontés quotidiennement à l’installation a représenté un souci constant (dont le coût n’est pas économiquement négligeable !). L’un de nos interlocuteurs soulignait ainsi que les imperfections constatées dans la conception des broyeurs auraient pu aisément prendre une tournure catastrophique, répétant à plusieurs reprises : “*heureusement, il y avait deux broyeurs!*” (ibid.).

⁵²⁰ Wakuri et Alii (1983) op cit. p. 100.

⁵²¹ Entretien Département central d’Ingénierie, J. Steel, Futsu, Japon, octobre 1995.

⁵²² Entretien responsable de production, Département haut fourneau, site de O., J. Steel, septembre 1996.

Que nous apprend le défaut de fiabilité des broyeurs sur la confrontation des logiques de conception et d'utilisation? Rappelons que les broyeurs avaient été classés d'entrée comme *des boîtes noires* - univers technologique connu et non-problématique - par les acteurs de l'innovation. Du fait de leur utilisation par les cimenteries et les centrales thermiques, les broyeurs faisaient l'objet d'une offre considérée comme abondante, et stabilisée. D'autre part, les broyeurs ont été considérés comme le seul élément pour lequel les compétences internes étaient jugées insuffisantes pour que l'entreprise s'engage dans leur co-conception avec Armco-Babcock, révélant le sentiment d'une asymétrie de compétences mettant J. steel en position d'utilisateur sur ce point "*en ce qui concerne pci, en fait, il n'y a pas de grosse difficulté technique... c'est plutôt simple, à l'exception du broyeur à charbon. Pour cette machine, il existe des fabricants à qui on peut les acheter. (). Nous avons plusieurs fabricants de broyeur au Japon, qui ont passé des accords avec des entreprises étrangères comme Babcock ou Reymond etc... Donc cela revient au même, que l'on acquiert les broyeurs au Japon plutôt qu'à l'Etranger...*" (⁵²³) (⁵²⁴).

Le dysfonctionnement a mis en évidence la fragilité d'une triple équivalence, au fondement de la sélection du fournisseur de broyeur. Premièrement, la sidérurgie n'est pas la cimenterie. Ainsi, une technologie satisfaisante et connue en cimenterie peut fort bien requérir une conception différente en sidérurgie: les exigences de fiabilité dans la sidérurgie n'ont pas de commune mesure avec celles des centrales thermiques ou des cimenteries. Cela illustre les limites de la généricité des technologies, et de ce que Piore nomme le 'bunching' –incorporation de principes techniques identiques inter-industrie (Piore 1968)

Deuxièmement, la défaillance de l'atelier de broyage a révélé la divergence des contextes technico-économique d'Ashland et de O. Là où les concepteurs ont perçu de l'identité, de la similitude, les utilisateurs ont vécu des différences. Les différents sens attribués au terme fiabilité donne à voir les différences irréductibles de rationalité entre concepteurs et utilisateurs. Du point de vue du concepteur ou du fabricant, la fiabilité d'un équipement correspond à une spécification technique, une contrainte minimale en terme de matériaux utilisés, d'intégration de l'ensemble, de conformité minimale à des normes calculées. Du point de vue des utilisateurs de ces appareils, la 'maintenabilité' constitue une dimension essentielle de l'activité, des pratiques de production au quotidien, l'un des lieux d'exercice de leur vigilance et de leur compétence : chaque arrêt n'est pas un simple arrêt de l'injection de charbon, elle menace la production de fonte du haut fourneau. Ajoutons que ces pratiques varient d'un site à l'autre, et d'un pays à l'autre. A titre d'exemple, l'une des décisions stratégiques en matière de maintenance en sidérurgie concerne ainsi la durée et la périodicité

⁵²³ Entretien Département central d'Ingénierie, J. Steel, Futtu, Japon, février 1996.

⁵²⁴ La conjugaison de ces deux éléments nous semble essentielle à la mise en place de *boîtes noires*. L'utilisation d'une boîte noire suppose la reconnaissance et le renforcement d'une asymétrie: reconnaissance d'une zone de connaissance externe jugée connue et stabilisée, reconnaissance d'une icomptéence interne dans cette zone de connaissance.

des ‘arrêts programmés’ (⁵²⁵). Par rapport au site d’Ashland, les arrêts programmés japonais étaient moins fréquents et moins long. Cela s’est traduit par des marges de liberté moins importantes pour remettre en état les broyeurs, et par conséquent, par des exigences plus élevées en matière de fiabilité des appareils.

Troisièmement, la contractualisation avec une entreprise japonaise licenciée par Babcock a été jugée équivalente à une contractualisation avec l’entreprise Babcock. Considérant que l’acquisition d’un matériel américain ou japonais ‘revenait au même’, les acteurs du PET ont retenu B-H, entreprise japonaise possédant une licence Babcock pour réaliser les broyeurs. L’installation a été adaptée à un fourneau japonais de grande dimension. En conséquence, le dimensionnement des broyeurs - 25 T heure chacun - excédait largement la capacité des broyeurs utilisés à Armco (⁵²⁶). Mais contrairement à Babcock, entreprise américaine associée à Armco dans la mise au point de l’injection de charbon, cette entreprise semble n’avoir “*jamais construit de broyeur de cette capacité*”. On voit ici encore s’opposer une rationalité sur le papier, portée par des concepteurs confrontés aux réalités de l’offre existante, et pour lesquels le transfert de technologie est une transaction faisant circuler des représentations écrites et graphiques, et les questions posées par la mise en œuvre pratique de ces connaissances.

Un second problème, considéré comme tout aussi essentiel par les utilisateurs, était peut être encore plus inattendu, et plus insignifiant pour les concepteurs de l’installation. Il s’agit de ce que nos interlocuteurs ont qualifié de ‘problème de détrit’.
“*A part ça (la question du broyeur) le problème le plus aigu qu’on ait eu sont les détrit. Dans le charbon, il y avait de tout, des cailloux, des racines, des plastiques, des canettes de bière. Si on broie tout ça, ces matières deviennent des choses dangereuses et causent des bouchages de ligne. C’est ce qui nous a posé le plus de problème. Les accidents les plus fréquents étaient des bouchages au niveau du bag filter et des tuyauteries*” (⁵²⁷). Le charbon livré sur les parcs du site d’O. contenait donc une série de matériaux indésirables. Ces matériaux en eux-mêmes ne posaient pas de difficulté. Mais une fois broyés avec le charbon, certains d’entre eux, en particulier les tissus pouvaient obstruer les conduites et menacer de provoquer des incendies: “*Le plus problématique c’est le sac de lin. Une fois broyé, ça donnait des fils, qui arrivés dans le bag filter (provoquait l’accumulation de charbon et des explosions). Il y a eu des histoires à cause de ça*” (ibid.) . Ces intrus ont obligé les opérateurs à intervenir à de multiples reprises, provoquant chaque fois, l’arrêt temporaire de l’installation et nécessitant, le plus souvent, le débouchage ‘manuel’ des lignes, tâche particulièrement rebutante. Au niveau économique, l’impact de

⁵²⁵ Les ‘arrêts programmés’ correspondent à des arrêts périodiques des installations pour entretien et remise en état. Les entreprises sidérurgiques japonaises sont réputées pour avoir réduit la périodicité et la durée des arrêts programmés de manière importante.

⁵²⁶ Sur les effets importants de l’échelle de production, on peut renvoyer au travail de Sahal (1985)

⁵²⁷ Entretien, responsable de production, Département Haut fourneau, site de O., J. Steel, O., Japon, septembre 1996.

ces 'détails' pratiques a été non négligeable puisqu'un opérateur à plein temps a été chargé de la surveillance de l'installation pendant plusieurs années (⁵²⁸). Le problème des détritres est intéressant car il était *inconcevable*, imprévisible. Il n'a de valeur que dans le monde des pratiques de production.

Enfin, et malgré les précautions prises, et en dépit des prétentions d'Armco d'avoir réglé définitivement la question de la sécurité, des débuts d'explosions ont eu lieu, menaçant de mettre le feu à l'installation. *“Pour isoler le charbon pulvérisé du gaz chaud, on utilise des bag filters. Mais parfois, ces sacs se percent, le charbon sort, et s'accumule dans certains tuyaux. Si une grande concentration d'oxygène arrive dans l'équipement, il se produit des explosions”.* *“Donc, quand O. a introduit le système Armco, ils ont introduit 2 systèmes. Une technique importée de la Nasa. Lorsqu'une explosion se produit, la pression augmente d'un coup. Donc on met des capteurs de pression pour détecter. Lorsque la pression augmente à l'intérieur du circuit, on envoie du matériel d'inertage en forte quantité. Deuxième système, on envoie massivement du CO₂ dans le circuit, c'est un gaz d'inertage.”* (⁵²⁹).

L'une des sources d'incendie et d'explosion au moment de la prise en main de la première installation venait du broyage, avec le charbon, d'intrus indésirables. L'ingénieur de la section centrale d'ingénierie chargé de la conception et de l'amélioration du système développait une interprétation différente, soulignant la négligence des opérateurs vis à vis des instructions et des procédures de sécurité à suivre. *“Parfois, il y a du charbon pulvérisé qui reste dans les tuyaux.... Au delà de 80°, tout ça se consume. Même aujourd'hui, des explosions peuvent se produire. Si les conditions de sécurité sont un peu négligées, ça peut exploser. Il existe des (normes) de sécurité, lorsque l'on manipule le charbon. Les opérateurs doivent y être attentifs. Par exemple, il ne faut jamais laisser du charbon dans les tuyaux. Chaque fois, il faut bien évacuer le charbon et vider les tuyaux. Parfois lorsque l'on privilégie la productivité... on travaille en 4*8, si le relais n'est pas bien assuré, que le nettoyage systématique n'est pas assuré pendant plus de 10 heures... une explosion ne manque pas de se produire.”* (⁵³⁰)(⁵³¹). L'exemple des explosions expose la tension qui peut exister entre le rôle attendu des utilisateurs, tel qu'il a été imaginé par les concepteurs, et leur comportement 'réel'. La ligne de démarcation entre la *compétence* incorporée dans le système technique, et le comportement de l'utilisateur ne va pas de soi (Akrich 1993).

⁵²⁸ Si l'on prend un opérateur payé au salaire minimum, le coût occasionné dépasse les 100 000 FF annuel.

⁵²⁹ Entretien retraité, ancien chercheur, Futtsu, J. Steel, Japon, août 1995.

⁵³⁰ Entretien section centrale d'ingénierie, Futtsu, J. Steel, Japon, octobre 1995.

⁵³¹ Au passage, notons que cette petite controverse a particulièrement retenu notre attention. Elle contrarie le mythe du consensus à la japonaise, du particularisme japonais. Cette tension entre prescription et action semble bien être universelle (Hatchuel 1994). Notons que nous avons trouvé chez nos interlocuteurs japonais eux même, bien de la réserve à évoquer les débats, conflits, controverses. Cela ne signifie pas, selon nous, que ces éléments fondamentaux de la dynamique collective n'existent pas au Japon. Il est certain que les japonais en parlent moins volontiers. A l'opposé, nos interlocuteurs français avaient sans doute tendance à parler avec emphase de tout ce qui pouvait les séparer. Une lecture un peu trop superficielle des entretiens, ou une réflexion trop fondée sur le 'point de vue officiel' peut facilement aboutir à la mythification d'un Japon

L'ensemble de ces variations menaçait de perturber la régularité du fonctionnement du haut fourneau, cher aux haut fournistes. En d'autres termes, les solutions adoptées ne se sont révélées, de prime abord, que partiellement satisfaisantes tant du point de vue de la sécurité, de la régularité des débits, que du point de vue de la fiabilité de l'installation. Nous pensons que par leur caractère exemplaire, elles explicitent l'emboîtement de rationalité nécessaire à ce que l'innovation tienne, l'écart irréductible de point de vue entre concepteurs et utilisateurs. Cet écart ne tient pas exclusivement aux écarts de professionnalité ou de socialisation – en ce sens, nous mettons en question l'idée que les exploitants et opérateurs seraient de parfaits concepteurs-, mais aussi radicalement aux écarts de situations et de position entre concepteurs et utilisateurs, confrontés à des problèmes radicalement différents. Un producteur de O. notait “chez nous la fiabilité, c'est important!” (⁵³²).

Instrumentalisation de l'objet technique par ajustement avec un contexte représentatif: de l'utilisateur à l'acteur.

Maurice et Alii ont mis en avant l'importance et l'étendue du travail d'*appropriation* des objets techniques (Maurice et Alii 1986, 1988). L'*appropriation* concerne aussi bien une série d'accommodation et d'ajustement de l'objet technique et de son contexte de fonctionnement, que la mise en place d'une dynamique d'apprentissage et une organisation du travail nécessaire à l'exploitation régulière et continue de l'outil: il s'agit de former les bases ce que nous avons appelé au chapitre second, les conditions d'utilisation de l'innovation.

Dans le cas de la première installation d'injection à O., l'*appropriation* s'est appuyée sur la flexibilité de l'*espace de qualification* et de l'organisation du travail (⁵³³).

Nous avons noté, au chapitre précédent, l'effort de superposition des dynamiques de conception et d'usage dans la mise en projet retenue à J. Steel. La montée en cadence et la prise en main des installations a en quelque sorte débuté en même temps que les premières fondations de l'installation étaient jetées dans l'espace du site de O. L'implantation matérielle et technico-économique de la première installation ont donc été entreprises dans le même mouvement. L'espace d'innovation a été traduit, inscrit dans l'organisation au point de se confondre avec elle. L'innovation,

harmonieux, et d'une France déchirée. Les études japonaises sont emplies de ce genre d'approximation. Il nous semble important de bien distinguer le double niveau des faits et de leur représentation collective de ces faits.

⁵³² Entretien, responsable production, site de O., J. Steel, O., Japon, septembre 1996.

⁵³³ Cette flexibilité de l'espace de qualification au sein des entreprises japonaises a été fort bien souligné par M. Maurice dans son étude sur la mécatronique. Maurice, M. (1988) *Des entreprises françaises et japonaises face à la mécatronique*. LEST-CNRS.

telle qu'elle a été perçue, a été décomposée en métiers épousant étroitement les contours de *l'espace de qualification* de l'entreprise J. Steel.

La première installation a été inscrite d'emblée dans l'espace technico-économique laissé vacant par l'abandon de l'injection de fuel: les acteurs de l'innovation ont garanti aux utilisateurs que les connaissances acquises sur la régulation et la conduite du haut fourneau avec l'injection de fuel, de même que les indicateurs de performance progressivement mis en place demeureraient valides. L'une des toute première modification effectuée sur l'installation a consisté à mettre en place une mesure de débits de charbon précise permettant aux haut fournistes de connaître en permanence le taux d'injection de charbon pulvérisé, et d'alimenter un indicateur, le Pulverized Coal Ratio, intégré au tableau de bord de gestion de la production du haut fourneau de J. Steel.

Par ailleurs, l'organisation du travail s'est révélée flexible dans l'acceptation même d'une superposition des espaces: les opérateurs et contremaîtres ont pu être 'détachés' d'impératifs strictement productifs pour participer au processus d'innovation avec leur encadrement. Certains d'entre eux ont bénéficié d'un séjour aux Etats Unis de plusieurs semaines, aux côtés de leurs collègues américains. En ce sens, *l'espace de qualification* a pris en charge le 'nouvel espace de travail' par extension de l'existant, et par déclinaison d'une forte polyvalence et d'une mobilité géographique temporaire de la part des différentes catégories de personnel. La formation des utilisateurs plusieurs mois avant la mise en service est emblématique de cet effort collectif d'appropriation de l'innovation fondé sur un double mouvement de continuité des formes de hiérarchie et qualifications existantes et de plasticité des contenus de la qualification et de l'organisation du travail. La forme prise par la constitution de nouveaux savoirs d'utilisation, centrée sur la *mise en situation* progressive et maîtrisée de la part des personnels productifs, indique l'importance attribuée à l'existence de savoir et de savoir-faire pratiques propres à ces catégories de personnel, et leur identification régulière aux utilisateurs. Le déploiement d'un apprentissage par le geste et le regard, *in situ*, auprès d'opérateurs américains, souligne la reconnaissance du caractère inaliénable et complémentaire de ces savoirs pratiques de production, avec d'autres catégories de savoir. Elle suggère l'existence d'une autonomie collective reconnue des utilisateurs. La formation, résolument *on the job*, rappelle le partage réalisé entre dimension expérimentale et réelle, la spécificité reconnue des situations de travail sur les hauts fourneaux en fonctionnement commercial.

Pourtant, nous considérons que cet effort d'appropriation organisé ne garantit pas la réduction absolue de l'écart entre conception et utilisation. Pour stabiliser l'objet technique et en faire un système qui marche, encore faut-il que les utilisateurs aient, en pratique, la possibilité d'instrumentaliser l'innovation en fonctionnement dans son nouveau contexte productif. Une illustration intéressante est le bricolage d'une solution au problème des détrit. Elle symbolise

parfaitement le passage du monde de la conception à celui de l'usage. Du point de vue des concepteurs de l'installation, celle-ci se composait essentiellement de trois éléments, un atelier de broyage, une tour d'injection, et un distributeur chargé de répartir équitablement le charbon sur l'ensemble des tuyères. Du point de vue des utilisateurs, l'installation d'injection formait un dispositif auxiliaire du haut fourneau dont les dimensions essentielles étaient la fiabilité de fonctionnement, la régularité des débits et leur équipartition. Du point de vue des concepteurs, le charbon et sa qualité ne constituait par conséquent qu'un élément très secondaire. Du point de vue des utilisateurs à l'inverse, le charbon et ses qualités se sont vite révélés comme des éléments fondamentaux de l'injection et de son économie. Cela n'implique pas uniquement de maîtriser la qualité des injectants pour leur qualité énergétique. Selon la formule pragmatique de l'un de nos interlocuteurs *"Il faut déjà que le charbon arrive aux tuyères"* (⁵³⁴). En effet, veaux, vaches, cochons, couvées et autres merveilles promises aux utilisateurs de l'injection de charbon par les ingénieurs du PET s'évanouissaient brutalement lorsque les opérateurs devaient arrêter l'installation, démonter les tuyauteries, déboucher les lignes, et découvrir le grain de sable - le morceau d'étoffe- ayant enrayé l'ensemble de la mécanique sophistiquée.

La prise d'autonomie des utilisateurs face à ce problème a été totale. Ils ont par eux même élaboré une solution et sont intervenus directement pour régler localement le problème là où il se posait, sans passer par la voie hiérarchique (Magaud et Sugita 1991, 1992, Thévenot 1992 ⁵³⁵). La solution ainsi improvisée a consisté en un bricolage très simple, permettant de retenir les déchets avant qu'ils n'entrent dans le broyeur et ne provoquent des bouchages ou des explosions (⁵³⁶). *"Dans un premier temps, c'était des outils très simples. Il s'agissait de tamis posés, c'est tout. Au fur et à mesure, ces tamis se chargeaient de détritrus. Ils étaient nettoyés à la main par les opérateurs, off line."* (⁵³⁷).

La flexibilité de l'organisation du travail est lisible dans la prise en charge par les opérateurs de la nouvelle tâche générée par le bricolage. Cette souplesse organisationnelle se double d'une flexibilité de l'espace de qualification: ce sont les producteurs, catégorie ouvrière dont nous avons

⁵³⁴ Entretien responsable section technique, site de D., F. Steel, D. France, janvier 1996. Nous nous permettons de citer un acteur français pour la représentativité de sa formule.

⁵³⁵ Magaud et Sugita sont les auteurs d'une enquête approfondie et comparative sur les univers de la production dans une entreprise française et japonaise. Thévenot est l'auteur d'une relecture de ce travail à partir d'une théorie de l'action. Magaud, J., Sugita, K. (1991) France-Japon. Un produit, deux façons de faire. Dossier de recherche n°43, CEE, janvier 1991. Magaud, J., Sugita, K. (1992) "France-Japon sur le terrain" et Thévenot, L. (1992) "Nouvelles approches du travail" in: La Lettre d'Information du CEE, n°25, septembre 1992. Thévenot note ainsi à propos de la prise en charge d'un dysfonctionnement au Japon, "au lieu d'un procès en responsabilité conduisant à réévaluer des qualifications, l'incident donne lieu à un accommodement sur le champ, à une correction locale prenant appui sur des repères qui ne sont partagés que par des acteurs immédiatement impliqués". Par contraste, Magaud et Sugita soulignent que dans l'usine française, l'intervention sur l'équipement est strictement limitée "aucune modification n'est envisagée: une erreur a été commise, il faut vivre avec" (Magaud et Sugita 1991, p. 16).

⁵³⁶ Magaud et Sugita souligne dans leur rapport comparatif, la simplicité de ce qu'ils appellent le rapport à la technique au Japon et son inscription dans le contexte des situations de travail. Par opposition à ce schéma, les auteurs notent que l'entreprise française avait tendance à cloisonner le rapport à la technique dans un rapport hiérarchique abstrait des conditions réelles de production.

⁵³⁷ Entretien, responsable de production, site de O., J. Steel, O., Japon, septembre 1996.

souligné la légitimité de la qualification dans l'espace du haut fourneau, qui ont eux même ajouté cette tâche aux autres, malgré l'hétérogénéité patente des compétences requises. Cette solution locale s'est accompagnée d'une forte mobilisation temporaire en travail. *“Toutes les huit heures, les tamis doivent être changés. Pendant 3 ou 4 ans, 3 opérateurs travaillaient en 4*8 (12 postes), 12 personnes travaillaient sur le système d'injection et en particulier sur cette question de nettoyage”* ⁽⁵³⁸⁾. La mobilisation en personnel était donc loin d'être négligeable. Pendant trois ou quatre ans, les utilisateurs ont pris en charge cette nouvelle tâche dans l'attente d'une progressive automatisation. Si l'on peut s'enthousiasmer, avec certains japonologues, de la capacité d'initiative des opérateurs, celle-ci se peut se comprendre qu'en référence à une réactivité faible des ingénieurs de conception.

Mais le point essentiel est que grâce à ce bricolage local, le dispositif technique a pu jouer, pour les utilisateurs, le rôle qu'ils lui avaient réservé: injecter régulièrement (comportement de boîte noire) du charbon pulvérisé au haut fourneau 1 de O. en quantité contrôlables, conformément aux prévisions et anticipations calculées. L'accommodement local a permis à l'objet technique de l'usage de converger avec l'objet technique de la conception et de tenir (Akrich 1987).

Les ajustements caractéristiques de l'espace intermédiaire ont ainsi aboutit à la stabilisation de l'objet technique, comprise comme la mise en place d'un dispositif permettant l'exploitation reproductible d'une relation entre matières premières et résultats, entre charbon et économie de coke. En ce sens, l'*appropriation* a construit le passage de l'innovation à l'instrument. L'instrumentalisation de l'objet technique a constitué l'une des clés essentielles du passage de l'innovation à l'usage (Akrich 1993). Transformé, détaché de son contexte innovatif, l'installation est devenue 'un outil' mis au service de la finalité productive du haut fourneau 1, dont il constituait désormais l'un des maillons stratégiques.

1.1b) Entre prise en main de l'installation et exploit industriel: une logique de rupture à D.

“...A Dunkerque, jamais vu personne de P W. La tour a été achetée, moi je n'ai jamais rencontré personne de PW. Donc c'est vraiment Dunkerque, et même après sur les trucs, on a rarement vu les gens de chez FCB, donc c'est Dunkerque qui a pris en main entièrement les équipements” ⁽⁵³⁹⁾

⁵³⁸ Entretien, responsable de production, site de O., J. Steel, O., Japon, septembre 1996.

⁵³⁹ Entretien chef d'équipe recherche, Irsid, F. Steel, France, janvier 1996.

Espace d'innovation et représentation

Les termes de l'engagement réciproque ont ouvert en France, un espace d'innovation dont le cadre était relativement flexible, et dont les termes devaient être progressivement précisés sous la responsabilité du chef de projet, véritable pivot organisationnel de la conception et de la mise en place de la première installation commerciale à D (Midler 1993). Sur le plan technologique, à l'inverse, nous avons souligné le caractère profondément hybride de la démarche suivie dans ce qu'il semble judicieux de nommer la construction *ad hoc* d'une offre et d'une demande spécifique de technologie. La division des tâches a donc été établie de manière idiosyncrasique, essentiellement sur la base d'une autorité hiérarchique instituée et d'un bricolage de ressources externes et internes, à l'exception notable de la collaboration transversale produite par le service des travaux neufs du site, comme instrument de validation des calculs. En ce sens, si l'innovation a été d'emblée pensée en fonction de son inscription matérielle sur le site de D., elle a donné lieu à la création d'un espace d'innovation rendu en partie indépendant des réseaux organisationnels et de l'espace de qualification existant dans les activités de production. Le chef de projet a assumé la double casquette de l'utilisateur et du concepteur. Pour comprendre la cohérence de cette forme de représentation, rappelons les qualités personnelles de l'individu ayant assumé cette fonction et surtout sa légitimité: d'après le responsable qui l'a choisi, il était quelqu'un de "*reconnu dans la profession*", possédant une forte '*légitimité technique*', acquise en tant qu'"*exploitant sur les hauts fourneaux de Thionville*" (⁵⁴⁰). Il nous semble donc essentiel d'interpréter la représentation, non comme un effort d'implication des futurs exploitants de l'objet technique, mais comme le représentant d'un système de qualification et de classement des individus les dotant d'un capital universel, d'une légitimité et d'une professionnalité en partie indépendante de l'organisation dans laquelle elle s'applique. Le chef de projet ne représentait pas les utilisateurs, les exploitants (ingénieurs, techniciens, opérateurs) concrets des différents hauts fourneaux de France au sens où il aurait partagé une position commune ('équivalence structurale' callon 1992) avec eux, un point de vue et une expérience commune, mais plus largement la profession sidérurgique française et son système de qualification stratifié (Maurice et Alii 1982). Il représentait l'autorité technique de l'ingénieur (sidérurgiste) français.

Si la mise en place d'une première installation d'injection de charbon a fait progresser l'injection de charbon en France en *principe*, en démontrant la faisabilité technique et économique de cette technologie (⁵⁴¹),- montrer que les ingénieurs français savaient s' 'en sortir' selon l'expression

⁵⁴⁰ Entretien responsable de la direction technique de D., siège de F. steel, janvier 1999.

⁵⁴¹ Rappelons que du point de cette logique d'évaluation, le constat du fonctionnement de visu du fonctionnement du site d'Armco, l'expérimentation menée à U. qui "devait lever les incertitudes", puis la mise en place d'une première installation sur le hf 2 de D. représentait une forme de gradation progressive dans les difficultés, devant aboutir, in fine, à un investissement réussi sur un haut fourneau de grande taille, du type du hf 4 de D.

déjà citée de l'un de nos interlocuteurs (⁵⁴²)- en pratique, l'installation sur le hf 2 de D. a constitué un aboutissement en soi, un représentant de lui-même, un investissement devant permettre de glaner une économie en coke la plus large possible pour le site considéré.

Dans ce dispositif, les futurs utilisateurs n'ont pas été impliqués directement dans le processus d'innovation. L'écart entre conception et innovation a donc été consacré à son maximum. Les temps de la conception et de la prise en main ont été soigneusement séparés. L'objet technique a été livré clé en main, sous la forme d'une boîte noire à la construction de laquelle les usagers n'ont pas participé. Lorsque l'objet technique a été achevé, les utilisateurs ont été engagés à faire fonctionner l'installation. Lorsque l'installation s'est trouvée prête à démarrer, les exploitants ont été mis en demeure de la mettre en marche, en fonction d'objectifs négociés de longue date entre la direction technique du site et la direction financière de l'entreprise.

Les utilisateurs ont eu le sentiment que l'innovation leur était 'imposée d'en haut': "*quand on a démarré le charbon, il y avait, tout le monde n'était pas vraiment convaincu, hein () quand on a décidé de lancer définitivement le dossier, ben c'était un peu un engagement, et il (responsable direction technique) m'a dit 'G. est ce que vous suivez, est ce que vous ne suivez pas? Est ce que vous pouvez imposer le charbon à D?' Il se doutait bien que moi, j'étais section technique et que les exploitants étaient plus réservés*" (⁵⁴³).

C'est pourtant toujours en leur nom, ou au nom de leur intérêt objectif que le projet a été mis sur pied. Comme le soulignait le chercheur responsable du suivi de l'opération "*clairement, ça donnait l'impression d'un truc parachuté qui n'était pas accepté.*"(⁵⁴⁴). Les responsables de production eux, ont mis en avant l'inopportunité de l'innovation, le contexte productif étant déjà ressenti comme très instable: "*Il y avait encore pas mal de mise au point, du point de vue du process hf... ça commençait à marcher beaucoup mieux sur le hf 4 mais enfin, il y avait encore pas mal de problèmes, et puis ils avaient eu tellement d'innovations avec tellement d'emmerdements qu'ils disaient 'ben, maintenant que ça commence à marcher, restons un peu calme quoi!'*". (ibid.).

Une prise en main en trois temps: maîtrise de la variabilité des phénomènes et exigences de production

⁵⁴² " le pas important c'était de faire avancer l'objectif injection de charbon, de voir un Hf en France, avec nos lits de fusion , avec nos ingénieurs, se convaincre que c'était faisable, que sur le plan de l'exploitation c'était gérable, que s'il y avait des pannes, on savait s'en sortir, et que ça perturbait pas la marche des hf et les résultats d'exploitation "Entretien direction technique F. steel, siège de F. steel, Paris, janvier 1996.

⁵⁴³ Entretien ancien chef de projet pci , siège de F. Steel, janvier 1996.

⁵⁴⁴ Entretien Chef d'équipe Irsid, Maizière les Metz, janvier 1996.

Mise à feu en juillet 1983, l'installation d'injection de charbon au haut fourneau 2 de l'usine de D. est entrée en opération à son niveau de performance visé au début de l'année 1984, après un démarrage jugé difficile. La date de mise à feu, le 13 juillet 1983, n'était pas le fruit d'une prise en compte des temporalités des exploitants. Comme nous le confiait avec humour un responsable d'exploitation, la période de l'été n'est sans doute pas la meilleure période pour mettre en place ce genre d'expérience *“parce que le mois d'août et le mois de décembre ne sont pas des mois de forte activité...”* ⁽⁵⁴⁵⁾. Mais, le souvenir du chef de projet traduit bien la pression exercée par la direction de l'entreprise devant la dérive des délais: *“Donc le démarrage sur le fourneau 2 c'est le 13 juillet, on a dû faire le 11 juillet un essai sur une tuyère et puis on a dû lancer - parce qu'on avait promis le 14 juillet - et donc on a dû faire ça le 13 juillet, les premiers essais sur l'injection de charbon”* ⁽⁵⁴⁶⁾. Dans cette atmosphère de rapport de force, la prise en main de l'installation par les utilisateurs s'est rapidement traduite par une série d'échecs répétés.

Le moins que l'on puisse dire, dans le cas français, concernant la prise en main de la première installation commerciale d'injection de charbon, est qu'elle n'est pas allée de soi. Décrivant la courbe des performances atteintes avec la première installation, un chercheur nous faisait part du caractère subit des changements intervenus au cours des premiers mois:

“Alors là on s'est retrouvé comme ça (stable) {trace une courbe d'abord en dents de scie, stabilisée dans un second temps, puis ascendante dans un troisième temps}. Ca a été à l'été 84, et puis tout d'un coup, à l'automne 84, ça a commencé à faire ça {progression}, là ça a été une pente de 10 kg par mois - et d'octobre 1984, où on était à 60 kg, en juin 1985 on a atteint une moyenne de 145 kg par tonne de Fte, ce qui a été le record du monde, et ça a été très régulier.” ⁽⁵⁴⁷⁾⁽⁵⁴⁸⁾.

Plusieurs acteurs se souviennent des difficultés connues au démarrage de l'installation. Le chercheur chargé du suivi de l'opération se souvient d'un univers très chaotique durant les premiers mois: *“Mais il y a eu un an, ça a été un peu, très chaotique, c'était pas un peu, c'était beaucoup. Il y a des périodes où il y avait du charbon, le lendemain il n'y en avait pas, en plus, ben, ils brûlaient des tuyères les unes derrière les autres. En plus, c'est sûr, chaque fois qu'on arrête le hf, pffff! Redémarrer.. on mettait pas le charbon tout de suite etc... c'était encore une perte de temps pour eux”* ⁽⁵⁴⁹⁾. Selon lui, le chaos repérable dans les courbes de performance faisaient écho à un désordre nettement plus large, à l'échelle du Département Fonte, c'est à dire, de l'univers des utilisateurs: *“Ca*

⁵⁴⁵ Entretien responsable d'exploitation, site de D., F. Steel, janvier 1996.

⁵⁴⁶ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, janvier 1996. Le 14 juillet est probablement une date plus convenable pour un dirigeant qui veut partir en vacances l'esprit tranquille que pour des utilisateurs chargés d'exploiter un tout nouveau dispositif réputé dangereux...

⁵⁴⁷ Entretien chef d'équipe recherche haut fourneau, Irsid, Maizières les Metz, janvier 1996.

⁵⁴⁸ Les données objectives recueillies recourent globalement cette représentation, bien que la première période semble avoir été plus progressive qu'il n'apparaît dans l'entretien.

s'engueulait, personne n'était d'accord, donc il y avait autant d'idées que de personnes, chacun y allait de sa petite action, il n'y avait aucune ligne directrice, aucune homogénéité, le chef de Département passait, il disait 'changer moi ça!' -allez hop -chaque personne qui passait en salle de contrôle faisait changer les réglages - on pouvait rien faire! () enfin c'était un vrai bazar! Le hf, c'est sûr qu'il descendait mal, il était pas en bon état. Mais au lieu d'essayer de comprendre chacun y allait, je dirais au pif.” (ibid.).

La réalité éprouvée par les premiers utilisateurs au moment des faits semble avoir été nettement plus confuse et indéterminée que les reconstructions qui ont pu en être faites a- posteriori. Dans les premiers temps, l'injection de charbon s'est accompagnée, comme à Louvroil lors des toutes premières expériences, de phénomènes inquiétants de dégarnissage, et de blocage du haut fourneau tout à fait inexplicables: *“On mettait du charbon, au bout de 8 jours, 15 jours, 3 semaines, ben il se passait des problèmes tordus comme ça, des phénomènes de dégarnissage..”* (⁵⁵⁰).

Selon la direction, les haut fournistes ‘réels’ de D., ont fait montre d'un faible enthousiasme lorsqu'il s'est agi pour eux de commencer à utiliser l'installation d'injection de charbon. Or voilà que l'injection de charbon, ressenti par certains comme une innovation supplémentaire, parachutée par la direction, se mettait de plus à perturber sérieusement la marche du haut fourneau et à menacer la réalisation de la production: *“C'est des charges qui descendent mal, au lieu de descendre régulièrement, ça descend vraiment par à-coups -ça fait des chutes en marche, des accrochages, de temps en temps ça peut se voir sur le hf, la charge ne descend plus, or le problème, c'est qu'on est obligé de continuer à souffler..donc en fait, la charge ne descend plus, ce qui fait qu'on est en train de vider le hf par le bas, alors ça peut-être assez catastrophique, et des trucs comme ça, ça n'arrêtait pas”*. Le haut fourneau 2, censé fonctionner plus régulièrement à l'aide du charbon s'est donc dérégulé avec la mise à feu de l'installation d'injection de charbon, provoquant une défiance inquiète chez les ingénieurs responsables de la production et une certaine hostilité de la part des opérateurs vis à vis d'expériences' jugées secondaires par rapport à la réalisation des objectifs productifs.

Certains utilisateurs étaient pour le moins réservé quant à l'utilisation de l'innovation qui ne semblait pas devoir être compatible avec les exigences fortes de régularité caractéristiques des hauts fourneaux en fonctionnement industriel. *“Il y a eu un premier moment de doute et puis il y avait même des opérateurs, des contremaîtres et ... il y en a qui avaient connu l'injection de charbon à Louvroil hein.... ils avaient de mauvais souvenirs disons. Donc il y a eu 6 mois de ...”* (⁵⁵¹). Du dérèglement du haut fourneau à la mise en cause du charbon, il n'y avait qu'un pas, allègrement franchi par les

⁵⁴⁹ Entretien chef d'équipe de recherche haut fourneau, Irsid, Maizières-les-Metz, janvier 1996.

⁵⁵⁰ Entretien chef d'équipe de recherche haut fourneau, Irsid, Maizières-les-Metz, janvier 1996.

⁵⁵¹ Entretien responsable des haut fourneaux, site de D., J. Steel, janvier 1996.

premiers utilisateurs *“On a dit, ben c'est le charbon.!”*⁽⁵⁵²⁾. Face à cette situation, un processus d'accusation mutuelle s'est mis en place. Pour les uns, le charbon n'était pas compatible avec le haut fourneau, et pour les autres, l'injection de charbon ne pouvait fonctionner que si les utilisateurs y mettaient un peu d'enthousiasme. Les difficultés pratiques se sont traduites par une logique d'accusation réciproque de la direction et des exploitants, épousant les contours des rapports de force hiérarchiques.

Cette crise pratique, doublée d'une crise hiérarchique a bien failli coûter la vie au projet et mettre en question tout l'édifice technologique. La direction de l'entreprise s'est émue de ces controverses et des maigres résultats obtenus. Comme nous le confiait l'initiateur du projet : *“ça aurait pu tuer le procédé immédiatement !”* ⁽⁵⁵³⁾. C'est en fait le chef de projet lui-même qui a 'engagé son prestige' pour sauver le projet et obtenir un délai supplémentaire: *“G. s'est expliqué !”* (ibid.).

Les troubles intervenus à la suite de la mise en service de l'injection de charbon, et l'ambiance délétère les ayant accompagnés, n'ont guère été du goût des premiers utilisateurs. Lorsque le chef de projet charbon approchait ses collègues hauts fournistes, certains le recevaient donc plutôt sèchement. Il se souvient de cette période en ces termes *“C'était pas toujours très facile de progresser parce que - moi j'étais plutôt, comment dire - on travaillait ensemble avec les exploitants, mais ils me disaient ‘Oui mais toi, tu n'es pas responsable sur les hauts fourneaux, si le hf ne va pas et tout ça. Donc c'est bien beau, toi tu es l'homme charbon. Là on marche raisonnablement, fous nous la paix quoi!’”* ⁽⁵⁵⁴⁾.

Après quelques mois caractérisés par une forte incertitude, la mise en place d'un nouveau mode de 'chargement' s'est accompagné d'une rapide stabilisation des performances: *“on a trouvé à peu près à ce moment là, un cycle de chargement qui a permis de résoudre le problème.”*⁽⁵⁵⁵⁾. Même lorsqu'il se risqua à fournir une explication, le chercheur chargé du suivi des opérations ponctua ses affirmations d'invitations au hasard et à la chance *“Ici {indique la période de stabilisation}, je ne sais pas s'ils avaient réellement compris... si, ils ont peut-être compris, ou ils ont eu du pot, il y a peut-être un peu les deux, mais bon disons, il y a eu quand même quelques mois où il y a eu une période stable”*. *“Donc ils ont réglé ici, leur truc, ils ont réussi à régler ici à peu près leur truc”* *“Il y a peut-être un coup de chance, si vous voulez, mais clairement ici c'est l'identification et la résolution d'un problème qui était lié au chargement, à des problèmes qui étaient liés au chargement et à des trucs, le chargement, à des problèmes d'alcalins”* ⁽⁵⁵⁶⁾.

⁵⁵² Entretien chef d'équipe de recherche haut fourneau, Irsid, Maizière-les-Metz, janvier 1996.

⁵⁵³ Entretien directeur technique du site de D, siège de F. steel, Paris, janvier 1999.

⁵⁵⁴ Entretien chef de projet PCI, site de D., J. Streeel, janvier 1996.

⁵⁵⁵ Entretien chef d'équipe de recherche haut fourneau, Irsid, Maizière-les-Metz, janvier 1996.

⁵⁵⁶ Entretien chef d'équipe de recherche haut fourneau, Irsid, Maizière-les-Mets, janvier 1996.

A une période agitée de controverses sur le charbon a succédé une étape d'apaisement des tensions. Le charbon ne semblait plus dérégler le haut fourneau, et il était possible d'atteindre les objectifs de production tout en faisant fonctionner l'installation d'injection de charbon. D'une certaine manière, les utilisateurs français ont atteint, après environ 6 mois de forte perturbation, le stade de stabilisation du couple haut fourneau - installation d'injection de charbon (⁵⁵⁷). La prise en main semble donc être passée par une modification du 'chargement' (⁵⁵⁸).

Qu'est ce que le chargement? Pourquoi cet élément qui n'avait pas été évoqué jusqu'alors a-t-il soudain émergé? Il s'agit de l'ensemble des matières chargées au gueulard du haut fourneau. Les chargements sont schématiquement constitués de mélanges mesurés de couches de 'mine' et de 'coke', autrement dit, les matières premières à transformer, et le combustible permettant cette transformation. De plus, le coke joue également un rôle mécanique essentiel à la fois comme support de charge et comme élément de perméabilité favorisant la circulation gazeuse et la distribution des températures. La distribution des couches, leurs épaisseurs relatives, leur composition conditionnent fortement la descente des charges, la productivité du haut fourneau, son fonctionnement. Il s'agit donc de l'un des éléments fondamentaux des savoir-faire du haut fournaiseur, un des éléments essentiels de la stratégie de 'conduite' du haut fourneau. *“De toute façon, dans un hf, tout vient du chargement. Un hf c'est comme une bagnole, il y a un accélérateur - ça c'est le vent - et puis pour que ça marche bien, il y a un carburateur. Et le carburateur c'est ce qui va bien répartir les gaz, permettre de bien utiliser l'énergie, la chaleur etc -et ça c'est les charges-. c'est la répartition des charges, parce que c'est la répartition des charges qui va régler la répartition des gaz.”* (⁵⁵⁹). Pourquoi, alors, avoir négligé cet aspect de l'injection de charbon, pour n'en retenir que la livraison d'un objet technique dans un contexte en principe favorable?

Rappelons que contrairement au cas japonais, dans lequel un soin immense a été apporté à l'ajustement de l'innovation et de son contexte d'utilisation, la question du contexte a été réglée en principe et a-priori comme préalable à l'ouverture de l'espace d'innovation, de façon à permettre aux acteurs de l'innovation de se concentrer exclusivement sur la construction d'un objet technique permettant d'atteindre les objectifs économiques fixés. La question du fonctionnement interne du haut fourneau a été réglée par l'intervention d'un calcul basé sur le modèle de l'Irsid. La question du chargement, située à l'intersection des mondes de la production et de l'injection, de l'innovation et de l'usage marque la rigidité de la coordination et la séparation stricte des sphères de la conception et de l'usage (⁵⁶⁰). L'injection de charbon intervient sur la structure des charges, en modifiant à la fois les

⁵⁵⁷ Rappelons que la planification japonaise visait explicitement cet objectif dans les toutes premières semaines d'injection.

⁵⁵⁸ Notons, ici encore, qu'une modification du chargement avait été explicitement prévue dès les premières semaines dans le cadre du plan japonais. Le rapport minerai/ coke fait par ailleurs l'objet d'une mesure continue alimentant un indicateur intégré de façon routinière dans le tableau de bord.

⁵⁵⁹ Entretien chef d'équipe de recherche, Irsid, Maizières-les-Metz, janvier 1996.

⁵⁶⁰ Notons que comme l'entreprise J. steel, le site de D. possédaient une large expérience en matière d'injection de fuel.

sources et les formes d'énergies alimentant le haut fourneau. Par tâtonnement, les utilisateurs sont donc intervenus sur le chargement pour trouver un 'cycle de chargement' permettant au couple charbon- haut fourneau de fonctionner ensemble, dans le cadre de critères de productivité, de régularité, et avec des exigences de production données. L'expression 'cycle de chargement' utilisée par notre interlocuteur marque parfaitement le passage de l'innovation à l'usage industriel. Les utilisateurs n'ont certainement pas attendu 6 mois avant de modifier le chargement. Mais, c'est à échéance de six mois qu'ils semblent avoir mis au point un '*cycle de chargement*', c'est à dire un standard reproductible de production permettant de stabiliser l'ensemble injection-de-charbon-à-65kg et haut-fourneau-2-productif.

La question essentielle ayant animé les acteurs a consisté à maîtriser la forte instabilité de l'ensemble innovation- contexte d'usage. La tâche était d'autant plus ardue que se sont glissées, entre l'innovation et les utilisateurs, deux boîtes noires, celle de l'installation d'injection, et celle du fonctionnement interne du haut fourneau, boîtes noires qui semblaient réagir l'une avec l'autre de manière désordonnée et imprévisible. Les deux objets ont formé un cadre rigide aux actions des premiers utilisateurs. Devant l'impossibilité de remonter vers les conditions de production des phénomènes observés, de bricoler l'objet technique, restait aux utilisateurs à louvoyer de proche en proche au gré des événements, et à tenter d'accommoder le nouvel objet technique à un environnement fortement marqué par des exigences industrielles et les mesures les accompagnant (⁵⁶¹).

Alignement autoritaire: les utilisateurs mis au pas de l'injection de charbon

L'épisode suivant est particulièrement remarquable. D'un point de vue japonais, il s'agit à n'en pas douter d'un événement tout bonnement impensable (⁵⁶²). A la fin de l'année 1984, malgré la stabilisation de l'ensemble innovation- haut fourneau 2, la direction de l'usine a pris la décision de remplacer l'ensemble de l'encadrement du Département Fonte de l'usine. Les utilisateurs, sans doute jugés trop réservés, ont été purement et simplement alignés sur le système technique: l'encadrement de la production de fonte a été congédié, remplacé par une équipe considérée comme mieux disposée à l'égard de l'innovation! "*oui, on a viré le bonhomme qui était, enfin pas viré, on l'a rappelé à d'autres fonctions, mais on a changé en même temps le chef de Département, le chef de service, il y a eu un*

⁵⁶¹ Les indicateurs régulièrement suivis se classent au sein de 3 catégories organisées selon une logique input-output: économique (production, consommation, productivité) technique (lit de fusion ou charge, vent, gaz) produit (qualité fonte, qualité laitier).

⁵⁶² Nous avons retrouvé dans l'étude de Magaud et Sugita, des passages rendant bien compte de ce jugement typiquement japonais porté sur les manières de faire françaises et plus largement occidentales. L'exemple du robot automatique pris par les auteurs est tout à fait représentatif de ce que nous avons pu observer dans notre enquête. Le robot ultra-moderne, fierté de la direction de l'usine française "*peint d'un orange violent, (il) était immense, avec son bras allongé; il trônait au milieu de l'espace à lui dévolu, cerné par une grille de protection () il figurait sur les plaquettes de l'entreprise; sa mise au point avait été une grosse affaire, longue à mettre au point*" (Magaud et Sugita, 1991, p. 8). La confiance de l'un des délégués japonais visitant l'usine française révèle une profonde incompréhension débouchant sur un jugement radical: "*Pourquoi font-ils un*

remaniement complet de l'encadrement..” (⁵⁶³). Au lieu d'adapter l'innovation aux réseaux organisationnels existants, cette décision a plié l'organisation à la logique de l'innovation.

Cette stratégie s'est accompagnée d'une modification en profondeur du cadre d'action. Un nouvel acteur, la direction technique de l'usine, est venu structurer ce cadre, en se glissant autoritairement entre l'innovation et les utilisateurs. La pénétration interventionniste des acteurs hiérarchiques dans le processus de prise en main de l'installation met à jour à la fois la flexibilité et la fragilité des frontières des espaces intermédiaires français, des engagements liant les acteurs, construits dès le départ sur une forme de désaccord, de malentendu.

La direction, sortant de son rôle d'acteur de contexte est intervenu pour mettre en place une nouvelle forme d'engagement avec les utilisateurs. Ayant connu des difficultés dans le passage de relais entre les acteurs de l'innovation et les premiers utilisateurs, entre l'innovation et l'usage, la direction technique a convoqué l'acteur principal du projet d'innovation auprès de l'objet technique qu'il avait contribué à construire. Le chef de projet 'innovation' a été transformé en responsable des hauts fourneaux, en 'lead user'. Ce dernier se souvient du caractère prescriptif de son recrutement “ *C'est fin 1984, donc là D. (directeur technique) a joué - 'on va le mettre responsable des hauts fourneaux et puis on va voir ce qu'il fait hein!' Et donc c'est là où il faut mettre en accord ses actes et ses paroles, c'est pour ça qu'il ne faut pas parler pour ne rien dire. Et normalement, fin 84 et puis surtout 85, on a monté sérieusement le charbon sur le hf 2”* (⁵⁶⁴). Mettre en accord ses actes et ses paroles, réconcilier la technique et l'économique, la créativité et la performance, renouer les fils des deux sphères minutieusement séparées de l'innovation et de l'usage, telle était donc l'injonction telle qu'elle a été vécue par le chef de projet lorsque sa direction technique a décidé de lui confier la responsabilité de la prise en main de l'installation. La direction ne s'est pas contentée d'une injection stabilisée à 60 kg par tonne de fonte, bien que cela ait été l'objectif affiché dans les 'calculs économiques'. Elle a fortement incité les exploitants à explorer les limites de l'installation d'injection: “ *ça s'est mis à très bien marcher à partir de fin 1983, et en 1984, on a trouvé une marche tout à fait satisfaisante et là, la direction de l'époque a bien vu l'intérêt de la chose et nous a poussé à augmenter rapidement la quantité de charbon injectée..”* (⁵⁶⁵).

Alors que les premiers utilisateurs se sont efforcés de transformer l'innovation en objet technique intégré dans la fonction de production routinière du haut fourneau 2 de D., la Direction Technique de l'entreprise, elle, semble avoir opté pour une extension de la phase d'expérimentation

truc aussi ridicule? Chez nous, on ferait un appareil dix fois plus petit à coût dix fois moindre!” (Magaud et Sugita, 1991, p. 9)

⁵⁶³ Entretien chef d'équipe de recherche haut fourneau, Irsid, Maizières-les-metz, janvier 1996.

⁵⁶⁴ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

⁵⁶⁵ Entretien responsable des haut fourneaux, site de D., F. Steel, janvier 1996.

technologique de l'injection de charbon. Il s'agissait de faire une 'démonstration' convainquante des possibilités de l'injection de charbon, qui pourrait être généralisée au-delà de l'expérience localisée du haut fourneau 2 de D. Dans une certaine mesure, il s'agissait de retrouver une logique d'innovation préparant les investissements suivants, au cœur même de l'utilisation: une forme d'innovation par l'usage. Cette stratégie exploratoire comportait des risques importants tant en terme de variabilité de l'ensemble haut fourneau- installation d'injection, qu'en terme industriel, dans la mesure où aucune usine n'avait encore atteint de telles performances en matière d'injection de charbon. Les calculs réalisés par les chercheurs montraient qu'il était impossible d'injecter très au-delà d'une limite située aux environs de 100kg par tonne de fonte. De plus, le 'charbon maigre' utilisé par sécurité lors des premiers mois était réputé ne pas convenir à des injections à taux élevés. Les recherches menées à Uckange avaient montré que le 'charbon maigre' ne se consumait pas aisément, et que son usage limitait donc fortement les performances envisageables.

La rupture intervenue entre les premiers utilisateurs de l'installation d'injection et la direction tenait donc centralement à une représentation divergente de l'utilisation. Les utilisateurs ont manifesté le souhait d'une forte autonomie, nécessaire à l'instrumentalisation de l'objet technique, et à son inscription dans le contexte routinisé et stabilisé de la fonction de production du haut fourneau. Il s'agissait de stabiliser suffisamment les pratiques et de domestiquer suffisamment les forces naturelles du charbon et du haut fourneau pour pouvoir injecter régulièrement une quantité désirée de charbon pulvérisé en remplacement du coke. Cette logique 'industrielle' s'est heurtée à une volonté innovatrice. Satisfaite des résultats obtenus lorsque les objectifs -60kg - ont été remplis, la direction de l'usine exigeait d'aller plus loin (⁵⁶⁶), et de rouvrir un espace d'innovation par l'usage, destiné à préparer les investissements à venir, et en particulier, de convaincre la direction de l'entreprise du bien fondé d'un nouvel investissement, sur le haut fourneau 4, le 'poumon de l'usine' de D.

Nous avons montré que les acteurs de l'innovation, chargés d'explorer les limites de l'injection de charbon, se sont appuyés sur une démarche pragmatique (partie 2). Semaine par semaine, mois par mois, les utilisateurs se sont efforcés de repousser les limites de l'injection chaque fois un peu plus loin, en dépit 'des théories': "*et puis celui qui a pris la responsabilité du hf a dit 'le charbon ça marche, à partir d'aujourd'hui, on fait 60 kg à la tonne de fonte, on se donne une marge de manœuvre, c'est 60 plus ou moins 10, à la fin du mois si on l'a fait, on décale de 10 kg- on prend le maxi actuel, et on va jusqu'au bout'*" (⁵⁶⁷). Le haut fourneau, les utilisateurs, ont été transformés en gigantesque champ d'expérimentation à l'échelle, ils ont été alignés sur les contours changeant du nouvel objet technique. Le chef de projet charbon explique sa stratégie exploratoire, fondée sur l'augmentation très progressive des quantités de charbon, en fonction des résultats obtenus à chaque

⁵⁶⁶ D'après le chef de projet, 'on nous a dit de faire 100'.

⁵⁶⁷ Entretien chef d'équipe de recherche haut fourneau, Irsid, Maizières-les-Metz, janvier 1996.

étape. “En terme de quantité, pour moi, le fait d’y aller progressivement ne permettait pas.. enfin on ne prenait pas de risque. On peut pas monter à 200 du jour au lendemain. Donc la théorie du hf c’est simple, c’est toujours de mettre un pas devant l’autre, et pas essayer de sauter à pieds joints dans..mais par contre monter” (⁵⁶⁸). En d’autres termes, il s’agissait, de manière pragmatique, d’explorer les potentialités technico-économiques de l’installation d’injection, de créer des références françaises en matière d’injection commerciale (⁵⁶⁹), en ajoutant, de façon incrémentale, un peu plus de charbon chaque mois, tant que l’injection ne déstabilisait pas la marche du haut fourneau, ou , dans les termes de nos interlocuteurs, tant que ‘le fourneau ne se détraquait pas’.

La recherche de performance s’inscrit logiquement dans la suite de la représentation ‘utilisatrice’ développée dans les premières étapes du processus d’innovation. Quel output pouvait donc fournir le nouvel investissement? Quelle performance technico-économique pouvait-on espérer de la part d’une installation d’injection de charbon? Les acteurs de D. ont répondu à cette question en cherchant à repérer les limites de l’injection de charbon au haut fourneau, en pratique: “l’expérience au hf 2, on était allé au bout de l’installation, on nous a dit de faire 100 kg, et puis on avait poussé jusqu’à 150-140, donc on était allé au-delà de tout ce qui était régulation sur le hf 2..”(570). Après s’être inspiré des comptes rendus de marche d’Armco, les acteurs de D. devenaient à leur tour des producteurs de données d’opération, et les innovateurs ouvrant de nouvelles perspectives d’usage de la technologie d’injection de charbon: “Dans le deuxième trimestre 85, on mettait 140 kg de charbon sur le hf 2 de D., avec une marche exceptionnellement bonne. Autrement dit, je crois que c’est une étape importante pour moi, c’est qu’on est passé d’un niveau de 60 kg à un niveau de 143 kg en pointe sur un mois, mais disons que c’était 130 kg sur un semestre. C’est quand même une performance qui était le double, qui était à notre connaissance jamais réalisée régulièrement sur les fourneaux qu’on pouvait connaître, hein, et avec un fourneau qui marchait parfaitement bien. De ce jour là ma conviction a été définitivement faite..” (⁵⁷¹).

Pour les acteurs de D., la ‘démonstration’ était faite, la conviction acquise, la ‘technologie maîtrisée’, la boîte noire refermée. Il devenait raisonnable d’investir dans une installation d’injection de charbon en pariant sur la possibilité d’injecter régulièrement des quantités de charbon pulvérisé de l’ordre de la centaine de kg par tonne de fonte en vue d’économiser du coke. La logique d’innovation

⁵⁶⁸ Entretien ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, janvier 1996.

⁵⁶⁹ Comme le souligne le responsable de la recherche haut fourneau de l’Irsid de l’époque, “le plus important c’est que ça ait fonctionné - je m’entends -peu importe la technologie du moment qu’elle marchait hein, le pas important c’était de faire avancer l’objectif injection de charbon, de voir un Hf en France, avec nos lits de fusion , avec nos ingénieurs, se convaincre que c’était faisable, que sur le plan de l’exploitation c’était gérable, que s’il y avait des pannes, on savait s’en sortir, et que ça perturbait pas la marche des hf et les résultats d’exploitation, toutes ces choses là étaient très importantes pour des gens qui étaient extrêmement prudent dans le monde des hf. Le monde des hf est un monde qui avance lentement mais sûrement, de préférence sûrement.”. La Direction Technique de l’usine de D. semble avoir partagé ce point de vue “M. D. était un actif représentant disons de.; l’idée qu’il fallait essayer aussi de se faire quelques idées chez nous, parce qu’en France, il fallait aussi penser à développer le charbon...” (Chef de projet PCI)

⁵⁷⁰ Entretien, ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

semblait donc en passe de céder la place à l'instrumentalisation de l'innovation, à la prise en main de l'installation d'injection susceptible d'investissement reproductible. Sans pénétrer très avant dans le détail des conditions de (re)production de l'objet, les acteurs de l'innovation de D. ont réussi à marquer l'usage industriel des hauts fourneaux d'une nouvelle référence, associée à l'utilisation d'un outil d'injection, matérialisant la validité des leurs calculs économiques.

La rigidité de *l'espace de qualification* dans l'entreprise française n'a pas facilité la prise en main des installations (⁵⁷²). Le déroulement de cette étape fondamentale de renversement et les frictions importantes ne sont pas indépendantes de la construction organisationnelle et professionnelle de la relation concepteur- utilisateur. L'espace d'innovation a pris la forme d'un projet très décalé par rapport à l'organisation de l'entreprise, mis sous la responsabilité individuelle du chef de projet, doté de toute l'autorité technique de 'la profession'. La prise en charge de l'ensemble du projet, puis de la montée en cadence par le même ingénieur construit certes une continuité par la mobilité: comme lui rappelaient ses collègues, l'ingénieur s'est transformé en "*homme- charbon*". Mais cette mobilité n'a été rendue possible que par un coup de force autoritaire de la part de la hiérarchie, que par l'adaptation de l'organisation à l'innovation. Elle révèle également, en négatif, les difficultés de l'organisation à mettre en place des relations producteurs -utilisateurs permettant la prise en charge d'une innovation. Cette difficulté prend volontiers l'allure d'un rapport hiérarchique d'autorité. Elle souligne le cloisonnement des fonctions et de la répartition des tâches, peu favorables au changement. La formation quasi-inexistante indique l'impensé organisationnel que représente l'innovation et particulièrement les savoirs d'utilisation nécessaires à sa mise en fonctionnement: chacun à son poste étant censé être compétent, tout se passe comme si il était impensable de ne pas savoir, y compris lorsque ces savoirs n'existent pas encore. D'un autre côté, ce mode d'appropriation possède sa forme d'efficacité, fondé sur un rapport d'utilisation très prescrit de la technologie. Il évite l'illusion selon laquelle les futurs utilisateurs seraient nécessairement à même de concevoir les conditions d'usages futurs de l'objet technique. L'un des points passionnant du cas Pci est que par deux modalités d'appropriation totalement différentes, les entreprises J et F. ont réussi à faire fonctionner leur première installation de façon stable et prévisible : en fin de compte, nous nous retrouvons avec deux objets techniques qui tiennent !

2) Exercices de jugement et tissage d'un monde commun

⁵⁷¹ Entretien, ancien chef de projet PCI, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

⁵⁷² Le travail de Maurice et Alii (1982, 1986, 1988) a largement montré et illustré ces phénomènes. Une bonne synthèse des études comparatives menées dans différents secteurs entre la France et le Japon est Maurice, M. (1995) "The Social Foundations of Technical Innovation: Engineers and the Division of Labour in France and Japan" in: Littek, W., Charles, T. (eds) *The New Division of Labour. Emerging Forms of Work Organisation in International Perspective*. De Gruyter. Pp. 317-347.

Combien plus complexe qu'une activité de résolution de problème en continuité avec une trajectoire technologique (Dosi 1982) le processus d'innovation se révèle à nos yeux. Combien moins linéaire que l'application d'un plan programmé, le processus d'innovation apparaît dans sa dimension improbable. Le simple fait d'aboutir à une première installation qui tienne est donc une victoire en soi. Le fait de mettre au point un objet technique fonctionnant de manière stable et prévisible justifie l'obtention d'une propriété intellectuelle.

C'est ici que prend place le modèle de Mansfield. Ici qu'il commence, là où le processus d'innovation abouti. Il est théoriquement judicieux d'étudier la diffusion à partir du moment où l'objet technique tient. Ce point de vue est pourtant analytiquement biaisé (Foray et Le Bas 1985). Ainsi que nous allons le constater, la généralisation est fondamentalement hybride : elle se trouve à cheval sur le processus de création technologique et sur sa diffusion. Elle est inscrite dans l'innovation et lui échappe inévitablement. Elle se confond avec l'extension d'une innovation singulière et englobe à la fois une multitude de trajectoires singulières.

Il est difficile de rendre compte de la complexité des phénomènes de généralisation, du strict point de vue des deux entreprises singulières que nous avons étudié. L'innovation, en débordant son cadre, a débordé également nos capacités d'investigation ! L'analyse qualitative trouve ici ses limites face à la multiplication des événements et des acteurs en jeu. Une thèse ne suffirait pas à suivre finement l'ensemble de cette dynamique.

Comment donner à voir et analyser les éléments clés de la généralisation des innovations singulières?

Nous avons proposé de considérer les représentations écrites et graphiques comme un pivot essentiel de la dynamique d'enrôlement et de généralisation prenant place autour d'innovations singulières (chapitre 2). L'analyse de ces représentations nous servira donc de guide pour appréhender la complexité des phénomènes.

Nous proposons de distinguer trois inscriptions typiques du monde de l'entreprise: le rapport interne, l'article, et le brevet. Le rapport interne s'adresse aux instances de décision de l'organisation. Il facilite la prise de décision et l'établissement de plans d'investissement. Les articles et les brevets sont destinés à inscrire des représentations au sein de communautés plus larges que l'entreprise (Bowker 1992, Myers 1985, 1995). Le brevet enfin, possède une fonction complexe, à la charnière entre le monde des concepteurs, des producteurs et des utilisateurs de l'objet technique.

Comment une représentation collective est elle élaborée? Comment une série d'acteurs différents en arrivent à partager une vision commune d'un événement ou d'un objet? La piste privilégiée ici prend au sérieux le rôle d'objets tels que les rapports, articles et brevets à partir desquels les acteurs cherchent à établir et à faire circuler des énoncés. L'*inscription* de l'énoncé est un élément déterminant de l'établissement d'un énoncé. Elle permet à l'énoncé d'exister par lui-même, indépendamment de ses auteurs (Thévenot 1985, Latour 1989) et donc de circuler et de faire l'objet d'une qualification. Elle soumet l'expérience acquise dans le cadre de l'espace d'innovation à une mesure et à des règles communes d'évaluation et de mise en forme. Nous avons privilégié l'analyse des matériaux écrits. Cela ne signifie pas que nous identifions la dynamique collective à la production écrite. Les interactions entre acteurs sont plus larges et plus complexes que leurs inscriptions. Mais nous formons l'hypothèse que celles-ci fournissent un bon analyseur des compromis trouvés, des orientations prises, et des repères partagés.

Le travail de représentation collective dont l'innovation a fait l'objet a contribué à l'autonomiser de ses conditions singulières de production et d'utilisation. En ancrant l'objet technique dans des catégories communes, dans des références partagées, les acteurs de l'innovation se sont efforcés d'en dégager les avantages comparatifs.

2.1) Jugement et motivation interne

Les acteurs de l'innovation se sont chargés de proposer une série de formulations justifiant les décisions prises dans le passé et cherchant à motiver les décisions futures, sur la base de l'attribution de caractéristiques et de performances à l'objet technique. L'espace d'innovation s'est trouvé ramené à une série de calculs et de résultats répondant aux questions posées lors de la problématisation. L'expérience acquise, linéarisée, rendue non ambiguë, a autorisé la prise de parole sur l'objet technique.

2.1 a) *Mise en circulation d'un rapport interne et réarticulation des positions autour d'un exercice de jugement collectif*

Au chapitre précédent, nous avons insisté sur l'importance des mécanismes de contrôle et d'évaluation de l'action incorporée dans la mise en forme des projets d'innovation. L'une des épreuves essentielles généralement mise en œuvre par les organisations consiste en un exercice de rédaction d'un rapport d'évaluation par les acteurs de l'innovation à l'attention des acteurs du contexte. Comme dans l'exercice de prise de décision, la remontée en généralité imposée par cet exercice rouvre le jeu

des engagements et de la représentation collective de l'objet technique. Après avoir plongé dans le rapport quotidien de l'action avec l'objet, l'étape d'évaluation offre aux acteurs l'occasion de construire un sens collectif aux événements et à l'action. La périodicité et la forme du rapport, généralement fixée de façon routinière par l'organisation, ouvre la question des actions à mener et suspend le processus de recherche et d'approfondissement en partie autonome et entretenue (⁵⁷³).

En ce sens, le rapport d'évaluation ne se limite pas à un simple impératif imposé par la transaction avec les acteurs de contexte. La rédaction d'un rapport et sa discussion est également un élément essentiel du cadre de l'action de ses rédacteurs (Dodier 1990). Il constitue un compte rendu de l'action obligeant ses auteurs à prendre position, à classer, à rendre cohérent, à donner les signes 'objectifs' et calculables des résultats rendus visibles de leur travail sur l'objet. Il amène les acteurs à se positionner, et à positionner l'objet technique dans le cadre plus large des règles communes et des références reconnues. Le rapport d'évaluation boucle un cycle d'action dans la mesure où il cherche à apporter une réponse à la question ouverte avec l'espace d'innovation.

Il ne nous a malheureusement pas été possible d'obtenir le rapport d'évaluation produit chez J. steel. Pour maintenir une dimension comparative, nous nous contenterons donc de restituer certains éléments ayant entouré sa circulation, et l'évaluation qu'en ont fait les acteurs. Le rapport a vécu une remontée en généralité, accompagnée d'une remontée en hiérarchie. La forte collectivisation de l'évaluation qui semble avoir présidé à cette évaluation a ouvert le jeu des participations à de nouveaux utilisateurs et facilité l'organisation temporelle des séquences d'investissement futur à réaliser.

Dans le cas français, le rapport d'évaluation a été l'œuvre du chef de projet en relation individualisée à sa direction. L'exercice a été vécu en partie comme une formalité, dans la mesure où l'essentiel des éléments avaient déjà été l'objet de discussions informelles. Le rapport a été l'occasion de justifier l'investissement et son bien fondé, ainsi que de poser les bases de l'investissement suivant, d'ambition plus large.

2.1a) *Rapport d'évaluation et extension de l'espace d'action collective chez J. Steel*

Le fait singulier concernant l'organisation des transactions entre acteurs du contexte et acteurs de l'innovation dans le cas de l'entreprise J. a tenu à la forte structuration du réseau de circulation des *objets intermédiaires*. Outre la planification d'épreuves d'évaluation, les acteurs du siège ont organisé

⁵⁷³ Cette idée a été développée par A. Hatchuel, dans ses réflexions sur le cas Tefal. Le cas Tefal a fait l'objet d'une thèse de doctorat sous sa direction Chapel, V. (1997) *La croissance par l'innovation intensive: de la dynamique d'apprentissage à la révélation d'un modèle industriel. Le cas Tefal*. Thèse de doctorat de l'école des Mines de paris.

une véritable focalisation des attentions sur l'objet technique et de son fonctionnement. L'installation d'Oita, transformée en prototype, a été dotée de capteurs, d'instruments, d'indicateurs et de mesures à destination, non seulement des acteurs du site d'O, mais du bureau du *honshabutcho*, et de l'ensemble des sites de l'entreprise. Tout au long de la montée en cadence et des premiers mois de fonctionnement, l'ensemble de l'entreprise a été mise à l'écoute des battements de cœur du haut fourneau 1 à travers la circulation, par l'intermédiaire du siège, de données d'opération. La circulation des objets ainsi organisée a stimulé la mise en place de réunions thématiques.

Un acteur se souvient de la focalisation de l'attention collective sur pci: *“A l'époque, tout le monde était conscient de la nécessité de cette technique”* (⁵⁷⁴). Y compris dans les sites où, pour des raisons économiques, il n'était pas envisagé d'installer PCI, les responsables du Département haut fourneau se souviennent d'avoir été largement informés et impliqués dans les réunions et débats autour de PCI. *“Oui, j'étais au courant. Nous avons toujours eu les données écrites (mises en circulation par) le siège - parce que les informations étaient (collectées centralement). De plus, O. nous communiquait (de plus amples) détails lorsque nous les demandions. Nous avons des informations et participions aux discussions techniques (bien que) nous n'ayons pas envisagé d'examiner la réalisation de PCI à M. C'était une autre histoire.”* (⁵⁷⁵).

Par conséquent, le concept de représentation s'est teinté de nuances particulièrement variées dans le cas de la première installation japonaise. Des images du fonctionnement de la nouvelle machinerie ont été diffusées pratiquement en temps réel au sein d'un réseau informationnel connecté comprenant les producteurs et les 'utilisateurs potentiels', et cela avant même qu'une évaluation plus définitive soit portée sur l'innovation.

Il est d'usage, chez J. Steel, de procéder à une évaluation des nouvelles installations une année après leur mise en service. Le rapport circule, de la même manière que les rapports relatifs à des projets d'investissements, dans le cadre très structuré des quatre réunions annuelles dont nous avons évoqué en détail le fonctionnement: *“Bon nous avons chez J. Steel, 4 réunions par an de débat discussion {par filière} sur les équipements. Il y a le PET, chaque directeur de hf qui se réunissent 4 fois par an. Le rapport a été discuté dans ce cadre. C'est le siège qui organise”* (⁵⁷⁶).

Le rapport d'évaluation a donc dans un premier temps constitué un support de discussion entre hauts fournisseurs de l'entreprise. L'un de nos interlocuteurs se souvient de l'évaluation positive portée

⁵⁷⁴ Entretien Research Fellow, siège de J. Steel, octobre 1995.

⁵⁷⁵ Entretien Research Fellow, ancien responsable du Département haut fourneau de M., siège de J. Steel, octobre 1995. Les éléments mis entre parenthèse ont été reformulés par nos soins, du fait d'un français approximatif proposé par le traducteur sur ce point.

⁵⁷⁶ Entretien ancien responsable de la recherche Ironmaking Division, Futsu, Japon, novembre 1995.

sur l'expérience menée à O., “il n' y a pas eu de problème, pendant la première année.”⁽⁵⁷⁷⁾. Un acteur du PET confirme: “Ce rapport d'évaluation était très positif techniquement. On a pu stabiliser les opérations de production. On a pu réduire le coût de production de tonne de fonte, en substituant du charbon au coke. L'installation PCI s'est avérée robuste et facile à entretenir. On a même pensé que cet équipement serait tout à fait vendable... nous avions l'exclusivité de sa commercialisation au Japon...”⁽⁵⁷⁸⁾. Etant donné l'engagement à long terme de l'entreprise, les visées généralisatrices affichées d'emblée par l'entreprise, et la forme incubatrice de l'espace d'innovation, la voie semblait donc grande ouverte à une multiplication en nombre des installations d'injection dans l'entreprise J., et au-delà, sur le marché japonais. Pourtant, c'est précisément sur ce point que la discussion s'est animée. La question de la représentativité du site d'O. s'est trouvée rouverte.

En dépit de l'accord trouvé par l'Etat Major de J. Steel sur le choix de O. comme représentant un haut fournilles de l'entreprise, et de la construction instrumentée d'un fait industriel collectif - pci fonctionne économiquement - autour du nouvel objet technique, les différents sites semblent avoir fait valoir leur singularité au moment où la question de la généralisation de l'expérience acquise a commencé à se poser. Rappelons que dans la controverse qui a divisé l'assemblée collégiale des hauts fournilles, le succès de O. a reposé sur le caractère qualifié de plus “*objectif*” de son besoin, par rapport à K., O. étant le seul site de J. Steel dans une situation déficitaire en matière de production de coke interne⁽⁵⁷⁹⁾. Ce qui était apparu dans un premier temps comme un avantage en faveur du succès économique de l'opération de transfert, a progressivement constitué le fondement d'un certain désaccord entre les sites sur l'opportunité de la généralisation⁽⁵⁸⁰⁾. Ce qui était économique à O. pouvait fort bien ne pas l'être à M. ou à N!

Au moment donc où la question n'était plus de localiser la technologie mais à l'inverse de construire une généralité à l'objet technique, la même assemblée qui avait entériné la représentativité de O. en 1980, a défini une ligne de (re)problématisation autour de la question du coût des installations PCI: “le coût des équipements de PCI était (trop) élevé” “il n'était pas possible de faire du bénéfice en investissant dans ces installations. En conséquence, notre sujet (central) de discussion était quand et comment (rendre PCI profitable)?”⁽⁵⁸¹⁾.

⁵⁷⁷ Entretien ancien responsable de la recherche Ironmaking Division, Futtsu, Japon, novembre 1995.

⁵⁷⁸ Entretien ingénieur du PET, Futtsu, Japon, février 1996.

⁵⁷⁹ Du point de vue de la cohérence du processus d'innovation, cet épisode du choix de O. a constitué un coup politique - “un processus hautement politique”-, ainsi que l'ont souligné plusieurs de nos interlocuteurs. La logique à long terme prégnante dans la construction de l'espace d'innovation, entre en effet en tension avec l'argumentation retenue, mettant en avant l'urgence où le plus grand besoin d'un site par rapport à d'autres. Ce choix a optimiser les chances de succès et de gain à court terme au détriment de la représentativité.

⁵⁸⁰ D'après nos interlocuteurs, et à titre indicatif, le prix du coke externe se situe régulièrement autour de 700 FF. Cela représente, d'après ces mêmes interlocuteurs 140% du coût de production du coke interne.

⁵⁸¹ Entretien ancien responsable Département HF de M., siège de J. Steel, octobre 1995, Japon.

Malgré les attentions et les moyens dévolus, malgré les engagements et un consensus sur l'intérêt de pci comme voie technologique, la sanction des utilisateurs est tombée, sans appel: les calculs économiques de départ ont été trop optimistes en jugeant que la technologie était amenée à se développer, "*il n'(est) pas possible de faire du bénéfice en investissant dans ce type d'installation*"! La première installation commerciale avait beau être stabilisée, et économique, grace au travail des différents acteurs, cela ne changeait rien à l'affaire car elle n'était pas *représentative*. L'opération a donc menacé de tourner court "*si on n'abaissait pas le coût de l'équipement pci, il n'y aurait pas de deuxième installation*" (⁵⁸²).

Pourtant, pour les ingénieurs du PET et la direction technique ironmaking du siège, cette remise en cause semble n'avoir provoqué qu'une demi surprise "*Dès (l'annonce de) la prise de décision de transfert de la technologie Armco, la direction et nous (PET) étions conscient de l'importance du (facteur) coût*" (⁵⁸³). Au lieu de s'arrêter à l'impossibilité de diffuser plus avant la technologie, le processus de remontée en généralité a généré une nouvelle problématisation: "*quand et comment rendre pci profitable*"? Cette problématisation a été suivie d'une réponse organisationnelle, à travers la formation, sous la coupe du honshabutcho, d'un groupe d'amélioration ad hoc mené par le PET. Outre le PET et le PMD, producteurs des installations futures, le groupe était composé d'ingénieurs d'O. et des autres sites désireux d'introduire PCI, N., T., Y. et K. Il comprenait également quelques chercheurs.

2.1b) rapport d'évaluation et justification des prises de décision antérieures chez F. Steel.

Le 'bilan de clôture' est une formalité d'usage chez F. Steel lors de la mise en place d'un investissement. Les périodicités semblent devoir en être variables, mais, pour ce qui concerne la première injection de charbon à D., il a été réalisé une année après la mise en service de l'installation. Comme la 'demande de crédit', le 'bilan de clôture' a une vocation restreinte à la diffusion. Il s'agit de la version officielle et 'objectivée' de la transaction liant dans une relation de proximité, les acteurs responsables du projet d'investissement et de la direction de l'entreprise. Le rapport est discrétionnaire et propose une évaluation ex-post de l'action menée et de son bien fondé. Le 'bilan de clôture' de l'injection de charbon au hf 2 n'était pas destiné à être discuté entre confrères, mais plutôt archivé, classé, comme aide mémoire au fondement d'une l'évaluation 'extérieure' ou plus exactement 'supérieure' par une hiérarchie ne demandant qu'à être convaincue.

Le bilan de clôture a donc adopté un style mettant en correspondance les termes généraux de l'accord ayant débouché sur l'obtention d'un crédit – "*L'objectif du projet est d'injecter une quantité*

⁵⁸² Entretien ingénieur du PET, Futtsu, Japon, février 1996.

⁵⁸³ Entretien ingénieur du PET, Futtsu, Japon, février 1996.

de 65 kg / t de fonte de charbon pulvérisé sur le fourneau 2 et de tester les possibilités d'injection à un taux supérieur" – et les résultats ayant accompli ces objectifs. Le rapport a fourni une série de justifications de l'intérêt de l'investissement – 'ce qui se serait passé si on n'avait rien fait' - , et des écarts constatés entre budget, planning et objectifs de performance prévus et réalisés – 'comparaison des résultats aux objectifs'. L'ensemble a fonctionné sur l'illusion d'une correspondance entre un plan et une réalisation, gommant le travail incertain de définition et d'accommodement propre au processus d'innovation et à la plongée dans l'univers du comment. Comme dans le cas de la 'demande de crédit' dont il constitue le pendant administratif final, les rédacteurs se sont placés dans la perspective simulée d'une 'investissement rationnel' au canon duquel l'opération devait être jaugée.

La description des qualités de l'objet technique est cantonnée à une liste des caractéristiques techniques des différents éléments composant l'installation, de leur dimensionnement, de leur capacité, des normes de fonctionnement. Les performances ont été présentées sous deux formes : un tableau 'fonction de production' mettant en correspondance les principaux paramètres classiques de définition de l'état du haut fourneau à l'occasion de trois mesures longitudinales (1983, février et mars 1984), et un tableau 'pci' récapitulant pour chaque mois la progression des taux d'injection de charbon prévus et réalisés. Le tableau 'fonction de production' fait état des principaux indicateurs conventionnellement reconnus par la profession pour lire l'état du haut fourneau – mise au mille, lit de fusion, vent, gaz, qualité fonte, laitier -. Celui-ci permet aux lecteurs de constater que l'injection de charbon, toute chose égale par ailleurs, améliore la qualité de la fonte et remplace économiquement du coke.

Le processus d'innovation est présenté sous forme d'écarts entre objectifs et réalisations. Les écarts constatés de budget et de timing font l'objet d'une justification systématique. Dans chaque cas, les décalages ont été analysés, décomposés et imputés à des responsables nommés, humains ou techniques : 'retard de livraison des silos de l'injection par la société X', ou 'parmi les incidents d'ordre technologique, il faut citer essentiellement des problèmes avec la fixation et la construction de la cloison de séparation entre compartiment de séchage et de broyage qui ont occasionné plusieurs postes d'indisponibilité'. L'imprévu global par rapport au plan, mettant en question les termes de l'accord général trouvé au démarrage du processus, a été traqué systématiquement et a fait l'objet d'une explication ou d'une accusation, comme si le plan avait été effectivement respecté à la lettre. .

La conclusion du rapport mettait donc l'accent sur le gain économique obtenu grâce à l'investissement, et sur l'avantage qu'il pourrait y avoir à étendre ce type d'investissement au hf 4 de D. L'argumentation s'appuie également, et paradoxalement, sur la 'cote mal taillée' de l'investissement lié à la sous-utilisation de la capacité de broyage. Un nouvel investissement proposé sur le hf 4 permettrait de rétablir la cohérence industrielle de l'usine à fonte: "*l'injection sur le hf 4*

permettrait en outre d'utiliser la capacité de broyage actuelle à 100% même en cas d'arrêt du hf 2" (⁵⁸⁴). Il s'agissait donc au fond de donner raison à la direction générale de l'entreprise et au chef de projet d'avoir pris la bonne décision d'allocation de ressource, quitte à proposer différents scénari et modes de calculs pour que l'ensemble puisse être classé et l'engagement mutuel dissolu dans des termes acceptables par les deux parties. L'espace d'innovation s'était donc ouvert en France sur le constat d'un déséquilibre industriel sur le plan énergétique. Il se clôt sur le constat du déplacement de ce déséquilibre sur le plan de l'utilisation optimale des installations préparant l'arrivée prochaine d'une nouvelle demande d'investissement.

2.2) Représentations écrites et graphiques et dynamique d'enrôlement

Spence définit la signalisation comme l'émission d'une information vis à vis du marché à destination d'un récepteur "*faced with an investment decision under uncertainty*" (Spence 1973, p.355 ⁵⁸⁵). Nous proposons de considérer les représentations écrites et graphiques comme les *signaux* par excellence permettant l'attribution de qualités à un bien rendu, et déclaré *disponible*.

La représentation rend publique *la disponibilité* d'un bien technologique. L'une de ses fonctions premières consiste donc à signaler un investissement de la part de l'émetteur ('signaling costs' Spence 1973). Cet investissement doit présenter une valeur *distinctive* – signaler une direction originale de recherche suivie –, en d'autres termes, fonder l'établissement et la reconnaissance d'une *asymétrie* de compétence. La revue, ou l'Institut National de Protection de la Propriété Intellectuelle assurent aux lecteurs l'originalité ('valeur ajoutée') de la production de signaux, en appliquant la règle commune de la priorité (Dasgupta et David 1994) selon laquelle un signal n'a de valeur que lors de sa première émission. Dans le même temps, la représentation doit donner la garantie de la *maîtrise* technologique, destinée à faire basculer l'innovation dans le confortable *monde du connu*. L'asymétrie de compétences invoquées justifie le basculement virtuel de l'adopteur potentiel d'une situation d'investissement sous condition d'incertitude à un investissement donnant des signes calculables et prévisibles. A travers l'émission d'une représentation écrite, un (ou plusieurs) auteur(s) déclarent avoir stabilisé une relation reproductible, stable, prédictible, calculable et donc utilisable par d'autres entre un objet technique et la domestication de certaines forces.

⁵⁸⁴ Bilan de clôture, injection de charbon haut fourneau 2, Usine de D. 5/6/84

⁵⁸⁵ Spence, M. (1973) "Job Market Signaling" in : Quartely Journal Economics, n°87, pp. 355-374. L'auteur, non sans un certain humour réflexif, propose de considérer son article comme un acte de signalement.

Pour que la technologie soit reconnue tout à la fois comme distinctive et maîtrisée, il est essentiel que le signal soit conventionnellement *démontrable*, *évaluable* par le récepteur confronté à une décision d'investissement sous condition d'incertitude. Pour ce faire, la publication doit être mise en conformité avec certaines règles de démonstration (Schelling 1960). Il nous semble utile d'en souligner deux aspects.

Premièrement, le signal ne peut être émis ni décodé indépendamment d'un contexte institutionnel (David et Foray 1996). Comme l'indique Spence (1973), la crédibilité du signal émis n'est pas indépendante des formes d'engagement des acteurs dans le jeu, ni de l'identification des acteurs eux même. S'y jouent donc des effets de *réputation* (Holmstrom 1981, Dasgupta et David 1994, Reynaud 1999) et de *capital symbolique* (Bourdieu 1980⁵⁸⁶). Un article ou un brevet est toujours associé à un nom, à une marque ou un nom d'entreprise ou d'institution, dont l'engagement dans le jeu collectif influence l'évaluation qu'en fait le lecteur et ses croyances ('employers belief' Spence 1973). Le capital symbolique ne se construit pas sur un coup, et il joue donc un rôle fondamental dans le contrôle de comportements opportunistes, dans la mesure où, il faut plusieurs coups pour être légitime, et lorsque le signal se révèle trompeur, la réputation faite devient négative, et la confiance est perdue pour les autres coups. Cette structuration soumet les rationalités de court terme à des rationalités de long terme. Cette orientation à long terme justifie donc l'existence d'institutions dédiées à l'échange de signaux. Les supports de publication, revue, Instituts de la propriété intellectuelle, présentent leurs contraintes propres (Myers 1985, 1995⁵⁸⁷).

Deuxièmement, ces institutions (revues, institut) imposent l'application d'un format, de règles conventionnelles, de signes permettant l'évaluation 'objective', extérieure aux joueurs engagés. Myers (1985⁵⁸⁸) est l'auteur d'une démonstration éclatante de ce phénomène. L'auteur montre, à travers la comparaison des différentes versions de deux articles, le travail de mise en forme, de révision, de reformulation imposé par la revue : il montre ainsi comment un projet d'article peut être '*changed subtly from an attack on a paradigm by one scientist to an outline of the logical implications from the collective work of all the researchers in the field*' (myers 1985, p. 622). L'une des clauses du droit de propriété aux Etats Unis stipule par exemple que l'invention doit être facilement reproductible pour toute personne versée dans l'art de la technique représentée (Scotchmer 1991). De même, un article est censé présenter des faits universellement reproductibles (Collins 1985). Ils sont en fait rarement reproduits (Collins 1985), mais ces exigences peuvent être interprétées comme une garantie de mise en

⁵⁸⁶ Bourdieu évoque l'existence d'un capital non matériel attaché à la personne et à son crédit, et sur lequel repose des phénomènes aussi essentiels que la confiance.

⁵⁸⁷ Sur les contraintes spécifiques liées à la publication d'articles et de brevets, Myers est l'auteur d'analyses stimulantes Myers, G. (1985) "Texts as Knowledge Claims : The Social Construction of Two Biology Articles" in : Social Studies of Science, Vol 15, pp. 593-630 ; Myers, G. (1995) "From Discovery to Invention : The Writing and Rewriting of two Patents" in : Social Studies of Science, Vol 25, pp. 57-105.

forme conventionnellement évaluable, destinées à offrir une prise au jugement. La forme du signal n'est pas indépendante des conventions régnant dans les communautés visées. Articles et brevets constituent des représentations écrites de l'objet technique, qui, de part les lieux dans lesquels ils sont publiés, visent à s'intégrer dans les représentations collectives de certaines communautés, et à favoriser son appropriation et son adoption à travers la création de liens plus ou moins contrôlés. Sa fonction *d'objet frontière* lui impose d'être lisible à différents niveaux (Star et Griesemer 1989) : la publication doit faciliter l'exploration comparée survolant son contenu ('screening' Stiglitz 1975⁵⁸⁹), et l'approfondissement de certains points concernant les attributs du bien et ses performances.

Ils forment un cadre essentiel s'efforçant de circonscrire et délimiter le territoire découlant de la propriété intellectuelle détenue par un inventeur ou une entreprise. En ce sens, l'article comme le brevet, sont irrémédiablement associés à un nom d'auteur (ou plusieurs) représentant l'origine de l'innovation et à un territoire potentiel d'application de l'innovation. Même si l'efficacité des brevets est désormais discutée dans la littérature (Levin et Alii 1987), celui-ci, associé aux articles, n'en constitue pas moins l'un des dispositifs centraux de la propriété intellectuelle et un élément déterminant de la dynamique innovatrice (Foray 1995). Kelly, bricoleur isolé dans la campagne du Kentucky, a négligé de publier son invention ou de la breveter (Misa 1992). Il a ensuite clamé une priorité sur Bessemer, accusant même ce dernier de lui avoir dérobé sa propriété, mais sans pouvoir fournir aucune preuve définitive à l'appui de ses accusations. Bessemer, déjà bien rôdé aux arcanes de l'innovation a déposé un brevet dès que son convertisseur a été mis au point dans son laboratoire.

La complémentarité entre articles et brevets est souvent négligée dans la littérature économique. La publication d'article crée une antériorité facilitant l'acquisition de brevet et l'établissement de la paternité sur une invention. De ce point de vue, la mobilisation de ces cadres institutionnels, répond à diverses stratégies. Dans certains cas, il s'agit de rester dans la course, sur un domaine jugé prometteur. Parfois, il s'agit de dresser des barrières à l'entrée pour empêcher un concurrent de développer certaines innovations : la règle de la priorité dresse une barrière à l'entrée, un second signal identique étant classé comme plagiat sans valeur, y compris lorsque la première version est ignorée de l'auteur (Dasgupta et David 1994). A l'inverse, il peut s'agir d'éviter de se voir dénier l'accès à un domaine stratégique dans l'avenir. L'article et le brevet peuvent également être utilisés pour marquer la fin d'une recherche ou d'une exploration et faciliter la reprise cumulative des résultats obtenus. Il n'est pas rare – le cas des injections aux hauts fourneaux en est une illustration – que brevets et articles fassent l'objet d'une lecture et d'un prolongement après une période de sommeil. Comme le notent Joly et De looze (1996) tout dépend, des compétences et connaissances

⁵⁸⁸ Myers, G. (1985) "Texts as Knowledge Claims : The Social Construction of Two Biology Articles" in : Social Studies of Science, Vol 15, pp. 593-630.

⁵⁸⁹ Stiglitz, J. (1975) "The Theory of 'Screening', Education, and the Distribution of Income" in : American Economic Review, n°65, pp. 283-300.

partagées – profils technologiques – et des stratégies de différenciation (Joly et De looze 1996, Bowker 1992, Misa 1992).

Les articles comme outils d'analyse de la dynamique d'enrôlement

Pour notre part, nous avons choisi de nous concentrer sur l'étude détaillée de deux articles et de leur constitution, dont nous espérons que le rôle central à la frontière de l'évaluation, de la qualification et de l'inscription représenterait un avantage analytique. L'article est l'objet frontière d'enrôlement par excellence.

Contrairement aux brevets, désormais largement utilisés dans la caractérisation des espaces technologiques (Pavitt 1992, Foray et Callon 1997), les articles demeurent largement inexploités comme outil d'analyse économique. Ils représentent pourtant une réalité aussi incontestable que celle des brevets: les deux entreprises que nous avons étudiées ont publié plusieurs articles dans des revues professionnelles et de recherche appliquée. Ils jouent un rôle essentiel dans la disponibilité et l'enrôlement : F. Steel aussi bien que J. Steel ont commencé à investiguer la question des injections de charbon en regardant ce qui avait été publié de marquant sur la question. Si J. steel a procédé à une analyse systématique des brevets existants, F. steel semble ne s'être intéressé directement qu'aux articles. Sur la base du cas PCI, on peut donc avancer que, plus que le brevet, l'article est l'outil de base de la mise en relation à distance, de la dynamique d'enrôlement.

Nous avançons que l'article est l'outil de base de l'enrôlement à distance. Cela signifie que tout en émettant un signal, garantissant la maîtrise d'une technologie, les auteurs désignent une asymétrie de compétences et d'information.

Il ne s'agit pas de poser que toute innovation fait systématiquement l'objet d'une publication. Il ne s'agit pas plus de prétendre que l'article est l'unique mécanisme d'enrôlement. Bessemer a par exemple annoncé sa découverte et donné une conférence devant la British Association for the Advancement of Science. Le Times a reporté son invention, et quelques semaines seulement après sa mise au point, les personnes clés – "*some seventy to eighty of the most eminent persons connected with the manufacture of iron*" (Misa 1992, p. 118)– étaient informées de sa découverte, et Bessemer comptait déjà 27000£ de recettes relatives aux licences de son brevet. Néanmoins, nous posons que l'article est le mécanisme principal de l'enrôlement à distance. Dans le cas PCI, le rôle des articles a été considérable. Nous avons vu (partie 2) que l'une et l'autre entreprises se sont largement appuyés

sur les articles publiés pour porter un premier jugement concernant l'espace technologique de PCI⁽⁵⁹⁰⁾.

Une année après la mise en marche des installations, les deux entreprises, J. Steel et F. Steel ont publié chacune des articles relatant leurs expériences de l'injection de charbon. Le nombre d'articles publiés par l'entreprise japonaise, destiné de manière privilégiée à un public japonais, a été plus important⁽⁵⁹¹⁾.

Nous avons comparé le contenu de deux articles, un par entreprise. Les deux articles comparés sont présentés en annexe. Afin de limiter les effets liés au caractère local ou national des institutions d'inscription, nous avons retenu les deux articles internationaux publiés par chacune des deux entreprises au sein d'une revue réputée. Nous nous sommes ensuite intéressés aux reprises et aux citations de ses articles dans d'autres publications.

2.1 a) Inscription

Sur la base du travail remarquable entrepris par Myers (Myers 1985), on peut avancer que la revue dans laquelle une publication est présentée ne constitue pas un support neutre⁽⁵⁹²⁾. Elle positionne la représentation dans un jeu de crédit, en contrepartie de contraintes sélectives. Elle

⁵⁹⁰ Armco a multiplié les publications. Bell, S., Pugh, J., Snyder, B. (1968) "Coal Injection - Bellefonte Furnace" in: Journal of Metals, April 1968, pp. 85-88, Bell et Alii (1967) in: AIME Ironmaking Proc., Vol 26, pp. 180-185, Bell, S, Pugh J., Sexton, J. (1975) "Armco Coal Injection" in: AIME Ironmaking Proc., Vol 34, pp. 307-325. Fletcher, L., Garbee, A. (1975) "Coal for Blast Furnace injection, energy use and conservation in the metals industry" in: Chang, Y. et Alii (eds) Energy and Conservation in the Metals Industry. Pp. 203-217. Garbee, A., Pugh J. (1976) "The Future of the World's Steel Industry" in: Szekely, J. (ed) pp. 55-64. Keenan, G., Morrison, D. (1977) in: Iron Steel Eng., Octobre 1977, Vol 54, pp. 30-34; Garbee, A. (1978) "Use of Pulverized Coal in Ironmaking Blast Furnaces, State of the Art, and Current Armco Operation" in: ILFAA Blast Furnace Congress, Aug. 1978; Long, L. (1980) "Pulverized Coal Injection in Blast Furnaces at Armco" in: Symposium on Industrial Coal Utilisation, April 1980; Garbee, A. "Coal Injection into the Blast furnace Tuyeres" in: International Conference on Operation of Blast Furnace 'BF-80', Arles, June 1980, II-4-1 to 14.; Fletcher, L. (1980) "Technical and Economic Aspects of Coal Injection at Blast Furnace Tuyeres" in: International Iron and Steel Institute, June 1980; Fletcher, L. (1981) "Technical and Economic Aspects of Coal Injection at Blast Furnace Tuyeres" in: AIME Ironmaking Conference Proceeding, Vol 40, pp. 142-145.; Sexton, J., Wennestrom, J. (1983) " Blast furnace coal injection: Long proven, now economical" in: Iron and Steel Engineer, January 1983, pp. 38-41.

⁵⁹¹ Les articles en langue japonaise que nous avons pu recenser sont au nombre de trois. Ils sont tous parus dans la revue japonaise de référence Tetsu to Hagane (Iron & Steel). Cette revue possède la particularité de présenter différents niveaux d'articles. Une section - supplément - est réservée à la présentation nombreuse de brefs énoncés, généralement centrés sur des procédés et des points technologiques particuliers. Une autre section présente des articles à la forme plus classique. L'un est un article en bonne et dûe forme, et correspond étroitement à l'article publié dans Ironmaking and Steelmaking. Les deux autres sont de mini-communications sur des points technologiques précis. En l'occurrence, ils rapportent les résultats de deux études menées à titre expérimental sur le haut fourneau 2 de O. pendant la période de construction de l'installation sur le hf 1 (voir chapitre 2) . Pour chacun de ces articles, les auteurs sont différents. Pour les deux petits articles, plusieurs auteurs sont communs, et correspondent selon toute vraisemblance aux groupes de travail du site d'O. ayant réalisé les études. L'article plus formel présente à l'inverse une série d'auteurs ordonnés comprenant des responsables du siège de l'entreprise et du site de O. représentant l' 'autorité morale', à laquelle sont associés deux acteurs, dont nous savons qu'ils ont été directement impliqués dans le projet. Dans l'article international, ce sont ces deux acteurs qui apparaissent en première ligne.

⁵⁹² Myers montre à partir des différentes versions révisées d'un même article que la version finalement publiée n'a plus grand rapport avec le premier jet : 'the published versions are hardly recognizable as related to the first submission' (Myers 1985, p.594).

modifie la nature du message en lui imposant un format, un style, et une orientation, une évaluation. Ajoutons que le choix d'une revue possède un caractère stratégique, reflète une volonté d'échange et d'enrôlement vis à vis d'une certaine communauté plutôt qu'une autre.

Nous retrouvons ici un résultat déjà souligné dans l'approche suivie par les deux entreprises dans la construction d'espaces technologiques de référence. La technologie Armco s'est ainsi vue dotée d'un crédit exceptionnel du seul fait qu'elle était la seule technologie à avoir *fait ses preuves* sur le terrain, dans une exploitation commerciale, sur un haut fourneau 'légitime', c'est à dire exploité selon des normes de performances considérées comme compatibles avec les exigences japonaises et européennes (⁵⁹³): c'est ainsi qu'il faut comprendre la validité de l'affirmation "*le seul site où ça fonctionnait, c'était Armco!*" (⁵⁹⁴): cela ne signifie pas que l'interviewé ait ignoré l'existence d'autres sites: il a mis l'accent sur le caractère distinctif du crédit accordé à un haut fourneau en fonctionnement (ie dans des conditions propres à satisfaire les utilisateurs).

Qu'ils soient japonais ou français, les chercheurs et ingénieur interviewés ont régulièrement souligné le poids des 'haut fourneaux'- autrement qualifié de 'monde des hauts fourneaux'- régulièrement taxés de 'conservateurs', ou de 'prudents' dans la qualification des faits significatifs. "*Le pas important, c'était de faire avancer l'objectif injection de charbon, de voir un Hf en France, avec nos lits de fusion, avec nos ingénieurs, se convaincre que c'était faisable, que sur le plan de l'exploitation c'était gérable, que s'il y avait des pannes, on savait s'en sortir, et que ça perturbait pas la marche des hf et les résultats d'exploitation, toutes ces choses là étaient très importantes pour des gens qui étaient extrêmement prudent dans le monde des hf. Le monde des hf est un monde qui avance lentement mais sûrement, de préférence sûrement.*" (⁵⁹⁵). Ce phénomène nous paraît devoir être analysé à la lumière de la structure de la division des savoirs au haut fourneau.

Nous avons souligné les difficultés rencontrées par les détenteurs de savoirs formalisés de types scientifiques pour pénétrer la boîte noire du haut fourneau et de son fonctionnement. Notons que J. Steel a été l'une des premières entreprises à mettre au point un système expert de conduite du haut fourneau. Le cœur de ce système a été construit autour des connaissances produites par un contremaître très expérimenté. Les opérateurs et les hommes de production, maillon indispensable de la performance, conservent donc à la fois un prestige et une légitimité forte y compris par rapport aux ingénieurs et aux chercheurs dans cet îlot de 'résistance à la rationalisation'. En ce sens, ce que

⁵⁹³ Rappelons par exemple la négligence des expériences chinoises en matière d'injection de charbon. Outre les difficultés de communications liées à l'isolement géopolitique de la Chine dans les années 1980, les acteurs rencontrés ont particulièrement mis en avant le fait que les injections chinoises étaient effectuées selon des normes d'exploitation des haut fourneaux incommensurables par rapport aux pratiques européennes et japonaises. En particulier, une distinction est fréquemment introduite entre injection de charbon à basse mise au mille de coke, et injection de charbon à haut mise au mille de coke. L'objectif affirmé des injections européennes et japonaises était l'injection de charbon permettant d'économiser du coke.

⁵⁹⁴ Entretien, responsable de production, site de O., Japon, septembre 1996.

Maurice et Alii nomment *espace de qualification*, est fortement marqué par cette division des savoirs (⁵⁹⁶). Le poids des savoirs pratiques est lisible dans les exercices de jugement contribuant à la légitimation des ‘faits industriels’: pour les haut fournistes, les *données d’opérations* demeurant la référence essentielle à l’aune de laquelle est rapportée la validité des discours.

Institutions

L’article japonais a été publié dans le numéro spécial de la revue *Ironmaking and Steelmaking* consacrée à l’utilisation du charbon dans la production de la fonte et de l’acier “Direct use of coal in iron- and steelmaking”. Ce numéro spécial a offert une sélection d’articles faisant suite à la tenue d’une conférence sur ce thème organisée en octobre 1982, par la Metals Society britannique, propriétaire de la revue. L’objectif de la conférence consistait à ‘*examiner les techniques utilisées et en cours de développement, conçues pour permettre l’utilisation directe de charbon dans l’industrie sidérurgique. L’utilisation plus large de ces techniques permettrait de réduire la dépendance vis à vis de matières énergétiques très coûteuses - fuel, gaz naturel et électricité - et de rendre possible la substitution de charbons indigènes en lieu et place des charbons à coke*’. La revue britannique possède une excellente réputation d’après les experts que nous avons interrogés sur cette question, et est connue pour mêler des articles de recherche et des articles à vocation plus industrielle.

La revue s’est donc fait l’écho d’une attente croissante dans le monde européen de la sidérurgie, concernant les technologies d’injection de charbon disponibles ou en cours d’élaboration, suite aux deux chocs pétroliers et à la flambée des prix des hydrocarbures. La publication d’un article faisant à la fois état d’une maîtrise pratique et technologique de l’injection de charbon, associé à une légitimité scientifique offrait donc à J. steel la possibilité de se positionner comme l’un des offreurs les plus sérieux de la technologie, et de créer les conditions d’une dynamique d’enrôlement d’entreprises utilisatrices intéressées à éviter les démêlés avec l’incertitude d’un investissement délicat en R/D.

Trois auteurs ont co-signé l’article. L’article ne présente pas leur statut, mais notifie leur appartenance au personnel du site d’O, connu dans le monde des hauts fournistes comme un site de référence en matière industrielle. Cela souligne la volonté des auteurs d’appuyer leur démonstration sur l’administration de données opérationnelles, sur la base de données collectées dans le cadre d’une installation commerciale, sur un haut fourneau légitime.

⁵⁹⁵ Entretien Direction Technique, siège de F. Steel, Paris, janvier 1996.

⁵⁹⁶ Les fondements théoriques et empiriques du concept *d’espace de qualification* ont été présentés dans le travail de comparaison de l’organisation du travail dans des entreprises françaises et allemandes. Maurice, M., Sellier, F., Silvestre, JJ. (1982) *Politique d’éducation et organisation industrielle en France et en Allemagne*. PUF.

Le titre de l'article - "*Pulverized-coal injection into n°1 blast furnace at O. Works, J. Steel*" – confirme cette tendance, tout en insistant sur le transfert de technologie. La reprise du terme consacré par Armco (Pulverized-coal injection ou PCI) dont l'utilisation n'était pas généralisée à l'époque indique l'établissement d'une filiation entre la technologie Armco et la technologie mise en place à O. Cette technologie américaine a été expérimentée et déplacée dans (into) le contexte du haut fourneau 1 de l'usine de O., appartenant à la société J. Steel. L'article propose donc de livrer les principaux résultats du transfert.

Callon et Alii (1993⁵⁹⁷) dans leur travail sur la scientométrie, montrent que l'existence d'identités collectives, de communautés de recherche peut être mise en évidence par la technique dites de *co-citations*. En d'autres termes, la mise en commun d'un univers de références crée ou marque l'existence d'une représentation commune des choses, et d'une dynamique commune d'apprentissage, d'une identité. Les références représentent également un effort d'inscription des énoncés dans un travail collectif plus large qui leur donne du poids. Dans le cas japonais, huit références sont présentées, dont trois japonaises, trois américaines, une britannique et une roumaine. La première lie le texte à la publication originale effectuée par les ingénieurs d'Armco. Trois articles présentent des recherches fondamentales de type expérimentales sur la combustion du charbon publiées dans les 8 années précédentes dans des revues et proceedings étrangères 'énergie' et 'combustion'. Quatre titres ancrent l'article au cœur du patrimoine de connaissances de l'entreprise. Ces références renvoient à des travaux de recherche appliquée à la modélisation de la forme du raceway appartenant au patrimoine distinctif de l'entreprise J.steel (les co-citations indiquent la filiation entre travaux fondateurs britanniques anciens (1957) et leur approfondissement dans les 7 dernières années par des chercheurs japonais (⁵⁹⁸).

L'article français a été publié dans les proceedings de l'AIME (American Institute of Mining, Metallurgical & Petroleum Engineers) Ironmaking Conference Proceedings. Chaque année, la division Fonte de l'Iron and Steel Society organise cet événement, dont la visibilité est importante parmi les haut fourneaux. L'AIME Ironmaking Proceeding a pour vocation de présenter l'état de l'art sidérurgique dans le domaine des hauts fourneaux. L'article français a donc été inscrit dans un cadre à

⁵⁹⁷ Callon, M., Courtial, JP, Penan, H. (1993) La scientométrie. PUF

⁵⁹⁸ Nous adaptons ici le terme co-citation à un contexte sensiblement différent de son usage originel, puisque nous n'étudions qu'un article, dont nous cherchons à caractériser l'univers de référence. Au sens communément entendu en scientométrie, ce terme signale la co-occurrence de la citation de deux références par plusieurs articles. Nous utilisons ce terme ici pour désigner le groupement par les auteurs de l'article d'une série d'articles entre lesquels ils établissent une filiation, généralement chronologique, sous la forme '(6-8)'.

la fois prestigieux et classique adressé à la communauté haut fournoise internationale. D'après les experts, la revue américaine est l'une des places possédant la plus grande visibilité (⁵⁹⁹).

Conjointement avec quatre autres articles, les acteurs ont été invités à présenter l'injection de charbon et ses récents développements en Europe et au Japon. Contrairement à J. steel, les auteurs français n'avaient en quelque sorte rien à vendre, sauf l'intérêt d'acquérir un crédit technologique, une légitimité supplémentaire par leurs performances technologiques, et de signaler leur compétence en matière d'injection de charbon.

Comme dans le cas japonais, trois auteurs ont co-signé l'article. Conformément aux pratiques de la revue, le statut des auteurs n'a pas été précisé, mais leur appartenance au personnel du site de D. est indiquée. Cela souligne le caractère opérationnel de la perspective adoptée (⁶⁰⁰). Deux auteurs ont été directement impliqués dans le projet d'innovation (⁶⁰¹).

Le titre de l'article - "*Coal injection practice in U. Steel D. BF2*" - met en valeur plusieurs éléments. Premièrement, la mention 'Coal injection' situe le texte dans la catégorie des injections au haut fourneau. La position du mot charbon en début de phrase attire l'attention sur l'originalité du type d'injection pratiquée, jusqu'alors considérée comme une technologie incertaine et difficile à stabiliser. Le contexte local d'utilisation de l'injection de charbon est précisé, il s'agit du haut fourneau 2 de D. La rhétorique "U. Steel, D., BF 2" possède un effet croissant de localisation exactement inverse à "n°1 BF at O. Works, J. Steel". Le premier insiste sur le caractère local de l'expérience dont on va nous faire part. Il est probable que peu de lecteurs du AIME ironmaking conference proceedings avaient connaissance de l'existence du haut fourneau 2 de D. L'effet rhétorique est strictement opposé à celui utilisé dans l'article japonais, lequel met en valeur la réputation de l'entreprise, son engagement dans l'expérience, la mise en place de l'opération sur l'un de ses sites les plus prestigieux. Même si U. steel possédait une certaine réputation, permettant de rendre crédible le message, le titre donne bien le ton de l'article jouant sur l'idée qu'une 'petite usine' a réussi, sur un haut fourneau méconnu, à maîtriser l'injection de charbon, une technologie réputée complexe et délicate. Le terme 'pratique' renforce l'importance du contexte localisé de l'expérience, et indique la nature du registre de l'action et du récit.

⁵⁹⁹ Une autre indication de la pertinence de cette revue est également corroborée par le fait que de nombreux articles traitant de PCI, parmi ceux que nous avons pu consulter, font régulièrement référence à des articles de cette revue. La revue Ironmaking & Steelmaking est sensiblement plus 'hybride', dans la mesure où l'on y trouve des articles à vocation académique.

⁶⁰⁰ L'accent est mis sur l'expérience d'utilisation. La direction de l'usine et de l'entreprise apparaissent sous le terme U. Steel. L'article en langue française, conformément à l'habitude de la revue donnait le statut, mais aussi le background scolaire des acteurs: école et promotion pour les ingénieurs. D'un point de vue extérieur, cela peut paraître surprenant. Maurice et Alii (1982) et Lanciano et Alii (1992) ont montré l'importance particulière des diplômes dans la formation de l'espace de qualification français. Sont également précisés les principaux postes tenus et les usines.

⁶⁰¹ L'auteur dont le nom apparaît en premier est le chef de projet. Le second est l'ingénieur d'affaire ayant collaboré à l'opération. Le troisième n'a pas participé au projet mais représente les utilisateurs. L'article français a fait suite à une communication à l'ATS en décembre 1984, rédigée sous forme d'article au printemps 1985, et publié dans la revue de métallurgie. Bien qu'en langue française, la notoriété de la revue est bonne, et suivie, particulièrement en Europe.

Les auteurs laissent entendre au lecteur leur intention de lui faire part d'une expérience pratique d'utilisation du charbon en injection dans un haut fourneau commun, sans distinction (⁶⁰²).

L'article français ne fait référence à aucune autre publication (⁶⁰³). Cela a pour vertu de souligner plus encore le caractère localisé et opérationnel des résultats et des faits présentés.

2.1 b) *Asymétrie*

D'un point de vue économique, nous avons noté que l'enrôlement passe par la création d'une asymétrie de compétence reconnue par les utilisateurs. Comment cette asymétrie a-t-elle été signalée aux lecteurs des deux articles étudiés ? Nous distinguons deux éléments de ce signalement : la reconnaissance d'un *investissement innovatif*, c'est à dire implicitement ou non, la création d'irréversibilités données à voir à travers leurs produits (objets intermédiaires, enregistrements etc), et la mise en scène du caractère *distinctif* de cet investissement et de ses résultats, suggérant l'existence d'une propriété intellectuelle virtuelle.

Investissement innovatif

Pour le lecteur appartenant au monde des hauts fournistes, le titre de l'article japonais – '*PCI injection into n°1 bf at O. works J.steel*' - est d'ores et déjà très significatif, puisque, de part la réputation industrielle de l'entreprise, le développement de la technologie PCI sur les hauts fourneaux de J. steel, leader technologique, constitue un *signal* d'investissement dans cette direction, favorisant en soi, la formation d'anticipations concernant les développements à venir.

L'*abstract* confirme et précise l'ensemble de ces propositions. Les auteurs y affirment d'abord que la rencontre a été un succès – '*J.steel has successfully adapted pulverized coal injection technology*'. D'un point de vue rhétorique, la question de la réussite de l'investissement innovatif est donc désamorcée. Le lecteur est donc prévenu que l'article se propose d'entrer dans le contenu de la technologie mise au point et des apprentissages réalisés pour parvenir à ce succès – '*in this paper are described the development of the technology especially with regard to the combustion and raceway characteristics and to safe transport of the pulverized coal*' -. L'entreprise a pu adapter la technologie stabilisée par Armco au contexte d'excellence de l'un des hauts fourneaux japonais de référence. Le

⁶⁰² L'effet rhétorique met en valeur la performance réalisée en 'dévalorisant' le contexte dans lequel il s'est déroulé: sans gros moyens, sur un haut fourneau commun, avec une petite équipe, de manière très pragmatique. L'article semble dire: voilà ce qu'il est possible de faire avec l'injection de charbon, dans des conditions tout à fait ordinaires. Les résultats exceptionnels atteints dans ces conditions contrastent singulièrement avec la 'banalité' supposée de l'environnement.

⁶⁰³ La version française ne présente pas de référence non plus.

développement technologique a porté en priorité sur la maîtrise de la nouvelle fonction de production hf-PCI, fondée sur l'expertise de l'entreprise en matière de process interne du haut fourneau, et sur la sécurité de l'installation.

L'article a choisi de faire découler logiquement l'investissement innovatif – et donc la nouvelle technologie dont il est question- de deux sources essentielles découlant l'une de l'autre: la R/D ayant assuré les bases d'un investissement en capital fixe dans une première installation.

L'investissement réalisé en R/D et ses principaux résultats sont résumés sous forme de graphiques (graphes 1, 2, 3 et 4).

Les graphiques insistent sur les itérations effectuées, sur les conditions expérimentales mises en place – *'the combustibility was tested by injecting it through one of the tuyeres on the n°2 bf () with non coking coal (32,5% volatile and 7,5% ash contents) injected at a rate equivalent to 80 kg/t at a blast temperature of 1230°-1300°C under a blast pressure of 3.3 kg cm⁻²* - sur le caractère finement contrôlé, instrumenté, répété et reproductible des expériences menées – *high-speed films, gas analysis and depth measurements, raceway estimated by differential equations* – et, implicitement, sur les compétences mobilisées. Bien que deux objets de R/D soit présentés – *combustibility in raceway*, et *problems with transporting pulverized coal* – le second élément est tronqué. Nous savons par ailleurs, par la reconstitution du processus innovatif, nous savons qu'il s'agit d'une plus value majeure apportée au système Armco par J.steel, et pourtant, les auteurs masquent ce point précis – *the use of the distributor, one of the main features of the Armco process, has greatly contributed to achieving this aim in both the test apparatus and the commercially operating furnace* -. Nous ne savons pas exactement les raisons qui les ont poussées à masquer ce point décisif. On peut penser qu'un accord sur cette question a été conclu avec Armco (⁶⁰⁴).

La construction d'une installation est alors présentée comme le fruit de cet investissement en R/D : *-having studied the combustibility of pulverized coal and raceway phenomena, and verified the applicability of the pci process by using test apparatus installed on a commercially operating blast furnace, a full scale PCI system () was constructed-* . La description de l'objet technique est remarquablement orientée vers l'utilisateur (et non vers le producteur). Une série de détails anticipent des soucis d'utilisation, créant une proximité avec le lecteur intéressé, et contribuant à former le sentiment rassurant que toutes les éventualités ont été prises en compte. Chaque élément décrit est ainsi rapporté à son utilisation – *'the system as a whole is easy to maintain'* ou encore *'should one tank be shut down () the process can be continued'* etc -.

⁶⁰⁴ Nous n'avons pas trouvé trace de brevet international détenu par J.steel sur le distributeur qu'il a conçu.

Dans le cas français, à l'inverse, l'investissement innovatif est identifié à l'investissement matériel. Le haut fourneau est présenté dans ses équipements, ses dimensions, sa production, son fonctionnement: il ne fait pas partie des références communes. L'article expose, insistant sur les arbitrages réalisés, les caractéristiques techniques du haut fourneau et de l'installation d'injection. Cette emphase souligne le soin apporté à sa composition, à sa construction. Les descriptions font état des principes, des dimensions, des capacités et de certaines spécifications (en particulier sur la question de la sécurité). 5 'schémas de principes' détaillent les différents segments de l'objet technique. La présentation de chiffres et de dimensionnement renforcent le sentiment d'identité singulière de l'expérience menée (⁶⁰⁵).

Sur le plan rhétorique, le haut fourneau et l'installation de charbon sont présentés comme les deux acteurs d'une histoire, d'une rencontre improbable et dramatique, dont l'issue ne sera délivrée qu'à la fin de l'article. L'innovation est conçue comme la rencontre entre le haut fourneau 2 (fig 1) et une installation d'injection dont les principes généraux respectent des impératifs de sécurité, de fiabilité, de facilité d'opération (fig 2) lesquels reprennent les termes de la grille d'évaluation ayant présidé à la construction d'une offre et d'une demande technologique (⁶⁰⁶). Aucun élément n'est donné sur le succès ou l'échec de l'opération, ménageant le suspens et un effet de surprise lorsqu'en conclusion, les performances réalisées sont enfin révélées. La situation du lecteur, avec lequel une familiarité est recherchée, correspond à l'incertitude prégnante ayant régné sur l'espace d'innovation jusqu'à la réalisation des prouesses techniques.

Distinctif

L'objet de l'article japonais consistait à affirmer que J. steel était détentrice de l'état le plus avancé de la technologie, et par conséquent, représentait un interlocuteur incontournable de l'espace technologique : la première ligne de l'abstract court ainsi '*J.steel has successfully adapted pci for a large blast furnace of 4000m³ inner volume that uses high top pressure and a high blast temperature*'. Pour ce faire, la rupture devait être consommée avec la technologie Armco. Plusieurs lignes et un tableau sont consacrés explicitement à distinguer les deux technologies, celle antérieure et datée développée par Armco – '*this technology was developed by Armco and babcock and Wilcox, who have operated it commercially for many years*'- , opposée à la toute nouvelle, mise au point par J.steel –

⁶⁰⁵ Nous avons noté l'absence de chiffrage de l'article japonais.

⁶⁰⁶ Ces questions que se sont posés les auteurs sont censées être partagées avec le lecteur, s'il devait à son tour se trouver dans une situation identique.

'Operation at O. started in june 1981, since then good progress has been made- et fruit d'un progrès décisif.

L'article évoque les fondements scientifiques et technologiques de la transformation d'un procédé déjà éprouvé par Armco, dont la transférabilité sur un haut fourneau moderne était questionnable, en une technologie fiable, efficace et économique, aux 'avantages fermement établis'. Les auteurs insistent ainsi sur l'incertitude ayant entouré l'investissement réalisé : *'it was questionable whether it would be possible to introduce PCI at the O n°1 blast furnace because it differed in many respects to the Amanda blast furnace at Armco's Ashland Works, where the process has been operating (see table 1). Hence a preliminary study was necessary'*. La première page de l'article est ornée d'un tableau soulignant terme à terme les différences entre le haut fourneau d'O et le haut fourneau Amanda, insistant sur l'écart comblé par l'innovation. La différence de nature séparant le haut fourneau d'Armco et celui de O. permet de mesurer le caractère distinctif de la technologie J.steel. Le déplacement de la technologie s'est accompagné de l'acquisition, par J. Steel de l'état de l'art technologique le plus avancé, reléguant Armco à une référence du passé.

La rupture, la distinction technologique entre Armco et J.steel est présentée comme une rupture épistémologique fondée sur l'application de la Science. La technologie japonaise, telle qu'elle est présentée, découle de l'application des résultats de recherches fondamentales appliquées à l'optimisation de la combustion dans le raceway, d'une part, et des compétences distinctives accumulées dans ce domaine de recherche par J.steel depuis un certain nombre d'années. Les références, les graphiques, les tableaux insistent sur cette scientificité.

Dans le cas français, l'originalité de la rencontre du haut fourneau 2 de D et de l'installation d'injection est préparée par la structure même de l'article, mettant en avant la singularité des appareils. Les deux acteurs étant présentés, les auteurs nous rendent témoins, dans une seconde partie, du déroulement chronologique de leur rencontre. Les détails fournis sur le contexte de l'action sont très nombreux. Une série de résultats correspondant à différentes étapes sont livrés comme une progression dramatique jusqu'à l'exploit industriel (⁶⁰⁷).

Le caractère distinctif de l'expérience est amené par une série d'effets de surprise ménagés par rapport aux savoirs partagés. Contrairement aux savoirs partagés par les grands savants de la recherche sidérurgique, la petite usine française a atteint des taux d'injection jugés inconcevables !

⁶⁰⁷ La version française, nettement mieux rédigée, est plus emphatique. "La qualité de la marche obtenue avec injection de charbon est bien traduite par les résultats, à notre connaissance unique au monde, établis début 1985 et résumés au tableau III. Les progrès constants de la marche du HF 2 situent bien les performances actuelles: il ne s'agit pas d'un record ponctuel, mais d'une marche courante tout à fait maîtrisée, grâce aux équipements de commande et de contrôle dont le hf 2 a été doté lors de sa refecton. Elles démontrent la haute rentabilité de l'investissement 'injection d echarbon' décidé fin 1981." (Graffeuille et Alii 1985b, p.798).

Contrairement aux prédictions des modèles ni la perméabilité, ni la productivité, ni les performances économiques (taux d'équivalence, fuel ratio, coke ratio (fig 6)) ne se sont dégradés avec l'augmentation du taux d'injection. Contrairement aux recommandations des experts internationaux, une très faible suroxygénation s'est avérée très suffisante (⁶⁰⁸). Les faits industriels mis en évidence par l'usine de D. et ses exploitants contredisent les théories scientifiques de l'injection au haut fourneau.

2.1 c) *Maîtrise*

Problème, solution technique

Quelle est la meilleure technologie d'injection au haut fourneau, étant donné la situation énergétique ? Cette question résume le problème soulevé par l'article de J. steel. La réponse formant la déclaration de l'article ('claim' Myers 1985) est que d'une part, PCI est la meilleure solution technologique, et d'autre part, que J. steel en maîtrise la version la plus évoluée grâce à son travail innovatif: '*PCI est la technique la mieux adaptée à la situation énergétique courante*'. La validité de cette déclaration est d'emblée située dans une perspective très large. Une étude générale de l'espace des injections au haut fourneau a désigné l'injection de charbon comme le candidat le plus valable: '*J. steel has studied various types of fuel for injection through tuyeres, in addition to measures for ascertaining the limits of operation with fuel-oil injection*'.

Comment résoudre le problème de D. confronté à une situation de pénurie de coke dès que la production de l'usine excède 4 millions de tonnes ? La réponse théorique dictée par les calculs économiques consistait à faire le pari de l'innovation en construisant une installation d'injection de charbon à D : '*coal injection appeared to be the least expensive form of injection which would reduce coke consumption and require less capital investment than the addition of extra coke ovens*'. Restait à éprouver en pratique la viabilité d'une telle installation. L'introduction précise le contexte particulier du processus de prise de décision et des termes de l'engagement. Elle souligne l'importance structurante de la relation tissée avec la direction dans la formation de l'espace d'innovation. Le ton employé, très descriptif et événementiel, souligne le caractère de bricolage local du processus. Cette présentation met en exergue la valeur des données d'opérations, des faits industriels, des savoir-faire concrets mis en œuvre.

Stable, prédictible, calculable

⁶⁰⁸ le seul petit nuage technique présenté est l'usure prématurée des tuyères.

Nous avons souligné l'importance de la légitimité des savoirs pratiques dans le monde des hauts fourneaux, et l'attention conséquente apportée aux données d'opération. Les deux articles se rejoignent dans la formation de leur dernière partie, celle de l'administration de la preuve des allégations formulées antérieurement : tous les deux exhibent les données d'opération, les tableaux conventionnels de caractérisation de l'état du haut fourneau en vigueur dans la communauté sidérurgique internationale.

La troisième partie de l'article japonais présente la stratégie de montée en cadence et ses principaux résultats. Les données d'opérations sont comparées en marche tout coke, avec injection de fuel et avec injection de charbon. Des enregistrements représentant le fonctionnement du haut fourneau sur longue période sont synthétisés en tableaux (table 4) et en courbes (fig 6,8) dont la linéarité est flagrante. Courbes et graphiques, données chaudes en provenance directe du lieu de production donnent à voir la grande stabilité des opérations, l'impeccable régularité du fonctionnement avant et avec l'injection de charbon. Elles forment autant de signes de la maîtrise technologique de l'entreprise J. steel sur l'injection de charbon. Le tableau de bord présentant la stabilité de différents indicateurs de performance et de fonctionnement montre que l'injection de charbon a pris place toute chose égale par ailleurs (fig.6). Elles suggèrent le caractère étroitement planifié de la montée en cadence et du processus d'innovation. Elles valident les hypothèses formulées, et l'équivalence fondatrice postulée par les auteurs entre fuel et charbon : les effets de PCI sur l'équilibre thermique et chimique du haut fourneau sont équivalents à ceux obtenus avec l'injection de fuel. Ils sont donc prévisibles et calculables – taux d'équivalence corrigé de 1.21 -.

Dans l'article français, la maîtrise de l'innovation est démontrée à partir de données d'opération caractérisant le fonctionnement du haut fourneau 2. Les données d'opérations (tableau 1), reproduction des documents internes, et différents tableaux insistent sur la stabilité et la régularité de marche du nouveau haut fourneau. Même à haut niveau d'injection, la stabilisation des opérations est inaltérée (Fig 7). Des enregistrements réalisés au cours de l'année 1984 sur les ratios de mise au mil sont synthétisés dans des courbes indiquant la progression des performances (fig 6). Des courbes indiquent la forte stabilité des opérations (fig 8). Des mesures de descente de charge effectuées le 13 février 1985 soulignent la régularité exceptionnelle du fonctionnement du haut fourneau. Pour le lecteur incrédule, une série de preuves est exhibée, dans une forme conventionnellement lisible par tout haut fournaiseur -objet frontière -, pour illustrer les performances atteintes (fiabilité, équirépartition, sécurité, taux d'injection, niveau de mise au mil). Le détail des ajustements réalisés est explicité : légère suroxygénation, suppression de la vapeur d'eau et augmentation de la température de flamme,

augmentation de la température du vent (fig 8), et enfin et surtout accommodation du chargement à couche de mine inchangée (⁶⁰⁹).

La conclusion met en avant la rentabilité de l'investissement, la fiabilité de l'installation, l'équirépartition, la stabilisation de la marche du haut fourneau y compris à un taux d'injection que beaucoup pensaient impossible à atteindre sans dégradation des performances. Le comportement de la nouvelle fonction de production a été rendu prévisible, et calculable : *'the installations were rapidly developed to a high standard of reliability () maintaining a coal replacement ratio at the theoretical level of 0.84 as calculated with the mathematical model'*. Un taux d'équivalence – 0,84- permet de manière stable d'effectuer des calculs économiques d'investissement : l'expérience a été suffisamment convaincante *'convincing to allow plans to go ahead for installation of a similar system on n°4 blast furnace in 1985 (14m hearth diameter)'*. L'investissement portera alors sur un grand haut fourneau.

IIIB. Figures de l'investissement

Notre idée est simple. L'accumulation repose sur la mise en correspondance d'un effort de représentation collective, de théorisation de la technologie, d'une part, et de la base installée d'autre part, comme résultat de processus individualisés, singuliers et contextualisés d'investissement.

La démonstration de cette idée passe cependant par la mise en évidence de plusieurs éléments : la construction d'une théorisation, la coordination des plans des entreprises, la mise en place de dispositifs d'apprentissage collectif.

1) Mise en correspondance théorisation – objets techniques

⁶⁰⁹ Les figures 6, 7 et 8 livrent une série de données pour l'année 1984. Les graphiques sont tracés à la main. Seul le tableau

La question de la standardisation technologique est intéressante car elle implique la mise en place d'un mode de coordination industrielle fondée sur la spécialisation et l'intégration, la création d'une asymétrie de compétence collectivement reconnue entre concepteurs, producteurs et utilisateurs. Elle peut donc être comprise comme le résultat d'une dynamique d'enrôlement passant par la production et l'adhésion collective d'un package mettant en correspondance les pratiques localisées et une représentation collective théorisée offrant une explication rationnelle de ces pratiques.

La première partie de cette thèse s'est efforcée de présenter le monde commun formé autour des injections au haut fourneau. Ce point de vue d'expert' (Gathergood, 1988, Poos et Decker 1990) a pris pour acquis une certaine théorisation 'agrégée', patiemment constituée par les acteurs au fil des années, et toujours sujette à controverse sur certains aspects. De façon à mettre en évidence le travail de mise en correspondance dans le cas PCI, nous nous sommes appuyés, ainsi que nous l'avons mentionné précédemment, sur la constitution d'un corpus de textes présentant différentes représentations de PCI dans les années 1980.

1.1) Appropriation

De nombreux articles ne sont jamais lus (Callon et Alii 1995 ⁶¹⁰). Les lecteurs doivent avant tout être intéressés au texte présenté. Le fait de publier un article, s'il représente indiscutablement un effort pour établir un fait industriel, pour créer un monde commun ou y participer, n'est pas en soi suffisant pour garantir cet objectif. Il doit, de plus être reconnu comme tel par des lecteurs, qui se faisant, lui offrent un caractère collectif, un contexte. Comme l'a souligné Latour (1989, p. 91), *le contexte de citation* est un élément essentiel de qualification de l'énoncé produit. "*Le statut d'un énoncé dépend des énoncés ultérieurs qui l'établissent ou l'infirmen*" (Latour, 1989, p. 75). Contrairement aux rapports internes, le public ne peut être déterminé à l'avance, et la coordination ne peut être strictement organisée dans le cas des articles. La dynamique d'association et d'utilisation des articles est beaucoup plus flexible, et beaucoup moins contrôlable que celle des rapports internes. Ses lecteurs ne sont pas strictement prédéfinis à l'avance. L'une des raisons à cela est que la plupart n'existent pas encore. L'article s'efforce d'ancrer l'innovation dans une généralité durable.

Avec l'aide d'un expert de l'Irsid (⁶¹¹), de la consultation systématique des conférences de l'AIME, d'un travail de recoupement des bibliographies pour mettre en évidence les 'références communes', nous avons pu constituer un corpus de textes traitant de l'injection de charbon. Nous avons cherché à

1, présentant les données d'opération est dactylographié.

⁶¹⁰ Callon M., Laredo P. et Mustar P. (1995) *La Gestion stratégique de la recherche et de la technologie*. Economica

⁶¹¹ Nous remercions M. Picard de son aide précieuse.

repérer systématiquement les textes citant les deux articles que nous avons précédemment présentés (ou leurs versions nationales) pour caractériser leur destin collectif. Les lecteurs ne sont pas nécessairement des auteurs, par conséquent, cette approche par les citations minimise l'impact d'un article. La méthode suivie a consisté à réunir un corpus conséquent de textes sur les injections de charbon et à repérer 'manuellement' les citations de nos deux articles. L'avantage de cette approche est qu'elle permet de retrouver le 'contexte de citation', également significatif, et d'envisager une approche qualitative.

Destin collectif de l'article japonais

Sans prétendre à l'exhaustivité, les paragraphes suivant évoquent la reprise et la qualification de l'énoncé de Wakuri et Alii par d'autres textes.

L'article publié par Wakuri et Al., dans ses différentes versions japonaises et anglaises, a d'abord contribué à la formation d'une représentation collective pour l'entreprise J. Steel. Le trait marquant de la publication et de son usage est la mise en exergue des compétences acquises par l'entreprise J. steel. Ainsi, lorsqu'un nouvel arrivant a été intégré à l'équipe PCI à la fin des années 80, son premier travail a consisté à lire les rapports techniques, les articles de référence produits dans le temps par son entreprise et par d'autres. Dans un rapport clé produit par J. Steel en 1989 statuant sur l'avenir de PCI chez J. steel, on trouve référencé l'article de Wakuri et Alii: "*It was confirmed that pulverized coal injection is effective in stabilizing the operation of a large blast furnace (Oita n°1 blast furnace)*". L'énoncé ne porte pas de trace de 'construction, de temps, ni de lieu', c'est un fait (Latour 1989). Pour les auteurs du rapport sur l'injection de charbon et ses perspectives, la première référence fiable, la première pierre de l'édifice technologique PCI est donc l'article de Wakuri et Al. ayant confirmé la maîtrise de cette technologie et de la nouvelle fonction de production par leur entreprise, et l'existence d'une technologie adaptée aux hauts fourneaux de grande taille (⁶¹²).

Ce fait technologique, reconnu comme tel dans une revue prestigieuse, a ouvert la voie au développement de la technologie PCI, non seulement au Japon, mais aussi en Europe. La phrase suivante positionne Wakuri et Alii à l'origine d'une progression des pratiques industrielles d'injection de charbon. "*N°6 blast furnace of Hoogovens in the Netherlands, and Dunkirk n°2 blast furnace of U. in France are reported to be operating stably with pulverized coal injection at high rates of a level of 130 kg/t and without lowering the coke/coal replacement ratio. In Japan, Ohgishima n°2 blast furnace of NKK and n°1 blast furnace of Nakayama steel Works are operated at coal injection rates of 102 kg and 121 kg/t , respectively.*" (⁶¹³). Wakuri et Alii ont été les premiers à confirmer la viabilité de cette

⁶¹² Les auteurs anonymes du rapport se réfèrent à la version japonaise, publiée dans Tetsu to Hagane en 1982.

⁶¹³ Rapport J. Steel.

voie technologique sur les hauts fourneaux de grande taille et à en établir les bases sur les hauts fourneaux de grande dimension.

Comment l'article de Wakuri et Al a-t-il été perçu et reçu à l'extérieur de l'entreprise J. Steel?

La première référence, bien qu'indirecte, vient d'Armco elle-même. Dès 1983, les ingénieurs d'Armco notaient dans l'un de leurs articles: "*The technology of PCI developed by Armco and Babcock and Wilcox has recently been successfully adapted to a large, modern high-pressure furnace in Japan () In addition to the difference in fuel cost, the stabilization of furnace operations has been claimed as a benefit*" (Sexton et Al 1983 ⁶¹⁴). La position d'Armco a consisté à reprendre l'énoncé proposé par Wakuri et Alii relatifs aux résultats positifs du transfert et à la modernité du haut fourneau. L'inclusion de cet énoncé dans le prolongement du développement technologique Armco tend à promouvoir l'idée d'une trajectoire technologique linéaire, d'un simple déroulement.

Un second groupe de référence a fait de l'innovation de J. steel, l'origine historique du développement de la technologie d'injection de charbon au Japon et dans le monde (⁶¹⁵). Deux des publications produites l'ont été dans le cadre de rapport de l'International Iron and Steel Institute. Cela constitue un point important car cet institut a pour vocation de classer, d'ordonner l'espace technologique de la sidérurgie mondiale. L'une des références est d'ailleurs faite par un 'expert' chargé par cet institut de réaliser une synthèse sur l'espace technologique des injections de charbon (Gathergood 1988). Dans cette perspective, l'énoncé de Wakuri et Al. est repris et daté - la technologie a été transférée avec succès - et qualifié positivement. Dans le texte de Gathergood, important car il est le premier, et l'un des seuls textes d'expert relatif aux injections de charbon, J. steel se trouve à l'origine véritable du développement technologique. Suivant les textes considérés, l'innovation est plus ou moins spécifiée en fonction de l'importance accordée à la valeur ajoutée introduite par J. Steel. Si l'antériorité de l'investissement de J. Steel est généralement reconnue, son caractère incontournable est volontiers relativisé.

La troisième lecture est nettement plus inattendue. Il est caractéristique de la tournure hybride de l'article, et partant de l'espace d'innovation dont il est issu. Il s'agit d'articles scientifiques et de

⁶¹⁴ Les auteurs ne citent pas explicitement l'article de Wakuri et Alii, qui à l'époque n'était publié qu'en version japonaise. Mais ils se réfèrent à une communication privée et à J. Steel News, n°142.

⁶¹⁵ "In conjunction with J. Steel, the Armco-babcock system was designed and developed to be suitable for implementation on large blast furnaces with high top pressure and high blast temperature. Particular care was taken in ensuring that the control and accuracy of individual tuyere injection rates from the distributor were acceptable for large blast furnace operation. The first installation in J. Steel and the first coal injection plant in Japan began operation in June 1981 on O. n°1 (hearth diameter 14m)." (Gathergood, D. Coal injection into the Blast Furnace. IISI. Pp 1-31). "Pci was adopted for the first time in Japan at O. n°1 BF of J. Steel, in June 1981. The basic techniques were introduced from Armco and babcock and Wilcox, and it was adapted to the large furnace with super high top pressure (ref. Wakuri et Alii)." (Matsumoto et Alii (1986) Present condition of PCI for blast furnace in Japan. EIC) "PCI was first adopted at O. in 1981 as the means to reduce the use

recherche. Nous avons noté deux articles faisant explicitement référence à l'article de Wakuri et Alii, pour son apport scientifique aux connaissances sur la combustion. Le premier traite des éléments fondamentaux de l'injection. Il note l'intérêt du travail de Wakuri et Al. lié à la mise en place, sur un haut fourneau commercial 'réel', d'une série d'expériences sur le raceway permettant d'établir un lien entre recherche expérimentale et conditions d'exploitation (⁶¹⁶). Le second article souligne que le travail de Wakuri et Alii représente jusque là, la seule et unique modélisation du raceway avec injection de charbon et fournit des données exclusives sur ce phénomène. Il propose néanmoins d'en développer considérablement l'élaboration. (⁶¹⁷).

Enfin, notons que les ingénieurs de F. Steel ont cité l'article japonais à plusieurs reprises. L'énoncé de Wakuri et Al. s'y trouve généralement inséré dans un paragraphe sur le développement rapide des injections de charbon en France dans les années 1980. L'association ainsi créée met en scène une rupture entre les technologies des années 60, (Armco) et la vague technologique des années 80 dans laquelle F. Steel et J. Steel ont été les pionniers ayant stabilisé la technologie. J. steel et F steel y sont rapprochés. Outre cette mise en scène temporelle, les présentations regroupent le développement technologique par zone géographique, Europe, Japon, Etats Unis (⁶¹⁸). La mise en place d'une filiation Arbed, O., D. est intéressante, car elle souligne l'influence des pratiques industrielles japonaises dans la sidérurgie française, renforcée par la référence conjointe à Babcock (⁶¹⁹).

of expensive oil and to control the furnace stability." (Inaba, S. (1995) "Successful development and future prospects for injection technology of blast furnace in Japan". IISI)

⁶¹⁶ L'auteur appartient à l'institut de métallurgie du fer de l'université technique de Aachen. "For comparison of the experiments under simulated conditions with these in practice, investigations were undertaken at industrial blast furnace. Based on measurements of the gas composition in the raceway, it had been concluded, that the reaction speed of oxygen was increased by coal injection, proving the simulated studies (fig 17 La figure 17 est une reproduction de la figure 1 de Wakuri et Alii.). However, J. Steel did not find the variation of raceway size in the blast furnace." (Gudenau, H. (1986) Fundamentals of blast furnace coal injection, EIC

⁶¹⁷ "There is some evidence, however, that the flow of the molten metal into the raceway is prevented by the ascending gas flow, forming a 'dry zone' around the raceway (2-4). () The inevitable consequence of the large number of unknowns is reflected in few modelling attempts (2-4), and rather drastic simplifying assumptions used in the models. Most models are one-dimensional in form; with simple treatments for the reaction kinetics. Only one model considers pulverized coal injection (4), the others being concerned with coke combustion alone" Jamaluddin, A et Al. (1986) "Mathematical modelling of combustion in blast furnace raceways, including injection of pulverized coal". Ironmaking and Steelmaking, Vol 13, n°2.

⁶¹⁸ "Indeed, coal had been already injected in the early sixties in the United States (1) as well as in France (2) but it was abandoned later on as the oil prices were lower. A few furnaces in America (3) and in China (4) have been still continuing to inject coal ever since that time. However, as the oil prices soared again, coal injection began to spread, first in Europe with the Arbed PW system at Belval in May 1980 (5) and in Japan with the Armco Babcock & Wilcox facility in O. (Wakuri et Alii). Simultaneously, coal injection also developed in France in U. in January 1982 (7) and in D. with the PW Fives Cail Babcock facility on BF2 in July 1983. (). Such a rapid development of the injections is the mere consequence of the good control of this technique at all steps of the process, from the preparation and the transport of the fine coal to the combustion and the operation of the blast furnace with low coke rates." Grafeuille F. et Alii (1991) "The drive towards coke rate less than 300 kg from the concepts to the practice" EIC.

⁶¹⁹ La citation suivante montre la proximité ressentie vis à vis de l'expérience japonaise "Le développement industriel de l'injection de charbon a débuté en Europe avec la réalisation de l'unité Arbed-Paul Würth du haut fourneau A de Belval qui a démarré en Mai 1980 (8,9) et qui fut bientôt suivie par l'unité Armco-Babcock & Wilcox de J. steel à O. en juin 1981 (11, 12) puis par l'installation Sprunck d'U. en janvier 1982 (12)" (De Lassat de Pressigny, Y. (1987) *Etude des aspects métallurgiques de l'injection de charbon pulvérisé au haut fourneau*. CECA. Le style de la phrase intègre totalement le site

L'analyse des citations présente cet inconvénient, que si l'on y prend pas garde, on oublie l'importance des *non-citations*. Or l'aspect sans doute le plus marquant souligné par notre analyse est l'absence de citation croisée de la part des autres entreprises japonaises. Si l'on excepte les revues historiques déjà citées, dans lesquelles une antériorité historique datée est reconnue à J. steel, les références croisées publiées dans les revues internationales ont été nulles de la part des autres entreprises japonaises. Or ces entreprises constituaient l'une des cibles privilégiées que les efforts de J. steel, et donc de l'article de Wakuri cherchait à convaincre. Nous savons que l'article a été lu, par conséquent, la non-référence ne signifie pas l'ignorance, mais la non reconnaissance de la prétention essentielle de l'article de Wakuri: J. steel possède la maîtrise de l'état de l'art technologique en matière d'injection de charbon, et par conséquent, est un point de passage incontournable pour les hauts fourneaux japonais.

Destin collectif de l'article français

Il serait erroné d'assimiler le caractère très localisé des espaces sociaux construits dans le cas de D. à un désintérêt général de la part des hauts fourneaux français. Il est très probable qu'ils aient attendu avec intérêt les résultats de l'expérience menée à D. comme en témoigne le souvenir qu'en conserve un acteur extérieur *“Je me souviens à l'époque, quand j'ai entendu parlé pour la première fois de l'injection de charbon sur le hf2, je n'étais pas dans la société. Je travaillais dans une autre société, et j'ai vu un article dans l' Usine Nouvelle, qui annonçait un essai d'injection - euh c'était plus qu'un essai puisque c'était une installation industrielle sur le hf2”*. L'équivalent fonctionnel du comité des hauts fourneaux de J. Steel est probablement ce que les sidérurgistes nomment 'la profession', c'est à dire une structure collective organisée par métier, dont l'Association Technique de la Sidérurgie (ATS) constitue le pivot central. Nous avons évoqué son rôle dans la qualification des ingénieurs.

L'ATS et l'Irsid (nous reviendrons sur le rôle de l'Irsid dans la suite) ont donc constitué des lieux d'échange privilégié entre les acteurs français. Un chercheur se souvient de la fréquence des discussions sur le charbon pendant les années 80:

“Oui il y a eu des échanges, ben de toute façon, il y a toujours des échanges, [..], à cette époque là, il y avait plusieurs sociétés, naturellement, ...ça pouvait parfois poser problème, mais il y a toujours eu, dans le domaine du hf, une grande facilité d'échange: les gens se parlaient facilement parce que, en fait la fonte c'est tellement loin du produit, c'est pas un truc stratégique, réellement, c'est à dire qu'on est plus ouvert, et la communauté ht fourneaux, je dirais, est une communauté qui communique beaucoup. En France, alors, je dirais à travers l'Irsid sur des aspects scientifiques ou autres, et il y a aussi l'ATS, donc l'ATS, dans ces années, à chaque réunion on parlait de charbon, donc l'ATS était quand même un lieu de rencontre ou les expériences s'échangeaient, que ce soit en séance plénière, ou dans les couloirs, et puis la façon dont les gens de D.

de O. dans l'univers européen du haut fourneau. On peut citer aussi le chef de projet qui soulignait *“on était un peu rassuré par le fait que J. steel avait la même démarche que nous finalement”* (Chef de Projet PCI).

venaient. Il y a eu des échanges pour dire, "finalement, le principal, là dedans, ça marche." A partir du moment où on a dit "chez nous, ça marche" pas besoin de dire comment ça marche!"⁽⁶²⁰⁾.

L'article de F. steel ne présente donc pas le même énoncé que celui de J. steel. Il n'était pas question, pour G. et ses collègues de devenir un point de passage obligé pour les futurs utilisateurs de l'injection de charbon, mais plutôt d'établir le fait industriel suivant: l'usine de D. a démontré que l'injection de charbon était faisable. Des taux élevés de l'ordre de 130-140 kg étaient réalisables et même bénéfiques au fonctionnement du haut fourneau et à son économie. Par rapport aux croyances concernant les risques de telles pratiques, par rapport aux modèles scientifiques prévoyant la dégradation des performances au-delà de taux d'injection de l'ordre de 60-80 kg, les auteurs ont proposé l'ouverture d'une voie technologique, performante, efficace, économique.

En interne, l'article a été abondamment cité comme référence industrielle, comme un fait industriel marquant une nouvelle ère de ce qu'il était possible de faire avec l'injection de charbon. Il est néanmoins utile de distinguer deux lectures différentes de l'article.

La première est la lecture que les autres sites français ont faite de l'article proposé. Nous n'avons pas trouvé de référence directe à l'article cité de la part des autres sites français, ce qui nous semble très significatif d'un effort de singularisation de chaque usine.

La seconde est celle de l'Irsid. Cette mise en relation est tout à fait cruciale car elle se développe dans le cadre de la hiérarchie des savoirs, entre savoirs théoriques, abstraits, dont le centre de recherche est l'emblème, et savoirs pratiques, savoir-faire toujours légitimes des hauts fournistes dans le domaine des hauts fourneaux. Réinscrit dans ce cadre, l'exploit industriel de D. a été lu comme un rappel de l'importance des savoir-faire et de la relativité des savoirs théoriques.

La lecture de l'Irsid peut elle-même être décomposée en deux tendances. Premièrement, les chercheurs de l'Irsid qui suivaient l'opération ont trouvé un intérêt accru dans la participation à l'action⁽⁶²¹⁾. Deuxièmement, la lecture de l'Irsid a adopté volontiers, ainsi que nous l'avons noté dans le cas de l'article japonais, une perspective 'historique' dans laquelle le 'fait industriel' défendu par Graffeuille et Al. A été régulièrement présenté comme une étape essentielle dans la progression

⁶²⁰ Entretien chef d'équipe de recherche, Irsid, F. Steel, France, janvier 1996.

⁶²¹ "L'injection de charbon pulvérisé aux tuyères du haut fourneau est rapidement devenue une technique classique car les problèmes technologiques ont pu être résolus et parce que les expériences industrielles ont montré tout l'intérêt de cette pratique sur les plans économiques et métallurgiques. Les résultats obtenus au haut fourneau n°2 d'U. à D. sont éloquentes de ce point de vue. L'injection de fines maigres a permis d'obtenir un fonctionnement très régulier et des performances énergétiques remarquables puisque l'augmentation du taux d'injection jusqu'à un niveau proche de 145 kg/tf n'a pas eu d'influence sur la mise au mille totale de combustible (coke plus charbon) en raison d'une amélioration du degré d'utilisation du gaz réducteur qui découle indirectement de l'injection de charbon" "pour accompagner ces développements, l'Irsid souhaitait s'intéresser aux aspects scientifiques de l'injection de charbon () En raison de l'intérêt que ces études pouvaient présenter pour la Communauté Européenne, un financement CECA a été accordé."(De Lassat, 1987, Rapport CECA)

historique vers la haute injection (⁶²²). L'expérience pratique, sur un haut fourneau commercial, menée dans un contexte local a permis de montrer que ce que les croyances de l'époque, et les modèles expérimentaux désignaient comme impossible était, en fait, tout à fait réalisable (⁶²³). L'article de G. et Alii est donc devenu un cas emblématique renforçant l'idée que les savoirs pratiques doivent bénéficier d'une forte légitimité et d'une autonomie dans le secteur des hauts fourneaux.

L'usage du travail de Grafeuille et Alii à l'extérieur de l'entreprise est également tout à fait digne d'intérêt. Groupé avec les récits des exploits de Thyssen et de Hoogovens, l'article de F. steel est utilisé comme anomalie, indiquant le défaut de correspondance entre théorie pci- méthodologie et réalités concrètes localisées. Il est possible de distinguer deux zones géographiques d'usage de la référence: l'Europe et le Japon (tout particulièrement J. Steel). Dans un cas comme dans l'autre, la référence à la publication de Grafeuille et Al. a été utilisé comme un fait industriel démontrant l'invalidité des modèles existants et des expérimentations menées sur des maquettes et des prototypes de combustion (⁶²⁴). Pour les acteurs de J. Steel, le fait industriel établi par Grafeuille et Alii a rouvert la boîte noire de la limite d'injection de charbon au haut fourneau. Il s'est inscrit dans le cadre d'un ensemble de faits industriels convergents, démontrant, en dépit des anticipations négatives, la faisabilité de la haute injection (⁶²⁵). La référence a donc été utilisée comme support à l'appui d'une distinction entre PCI et High PCI, entre technologie des années 60 (Armco) et technologie moderne.

⁶²² "During the last decade coal injection in the blast furnace has become a standard practice, and nowadays coal rates in the order of 190-200 kg/THM are achieved in routine operation on several blast furnaces (1-4) (). In France, coal injection, first investigated in the early sixties, and then rapidly abandoned (5), gained renewed attention in the beginning of the eighties. Following the first industrial trials in U. in 1982 (6), coal injection steadily developed from 1983 to 1989, reaching rapidly a level of 145kg/thm in 1985 (Grafeuille et Alii). The barrier of coke less than 300 kg/thm was definitely broken in 1990 at BF 4 in S. D.(1)" Van Crayelinghe, M. et Alii (1996) 'Fundamental aspects and industrial practice of high coal injection in the blast furnace within S.' *Rev. Met.* n°1-2.

⁶²³ La longévité des citations est intéressante dans le cas français et contraste fortement avec le cas japonais. Y compris en interne, nous n'avons plus noté de référence à l'article original à partir des années 90 dans le cas japonais, ce qui correspond au début de la période haute injection. A l'inverse, l'article de Grafeuille et Alii continue d'être cité par les chercheurs de l'Irsid et même d'autres chercheurs, comme ayant ouvert la voie à la haute injection. Dès 1986, les chercheurs de l'Irsid ont commencé à mobiliser la référence à D. Cette publication mettait en exergue l'unicité du fait industriel et son intérêt. "From June 1984, the coal rate has been continuously increased to reach a maximum monthly average of 143 kg in June 1985. At this time the oxygen was 24,5% in the blast and the coke rate was 333 kg including 20 kg of small coke loaded with the sinter and 313 kg of standad metallurgical coke, the lowest value ever achieved worldwide. The first semester of 1985 is especially interesting since it clearly shows the good esults which can be obtained at very high coal rates. Burden descent was smooth with quite no hanging nor slip and the furnace efficiency was high, CO2/ (CO+CO2) at top was higher than 0,51 and the departure from ideality (according to Irsid-Bf modelling) was negative..." Partie française d'un article européen rédigé par De Lassat (1986) EIC

⁶²⁴ Ainsi, dans un article daté de 1986 présenté à la première conférence européenne de la fonte (EIC), faisant le point sur les injections au haut fourneau, une référence indirecte à l'article est utilisée de la manière suivante: "However it seems that all these phenomena measured in the combustion laboratory do not influence the blast furnace for accepting the injection of coal, as is borne out by the various blast furnace applications: -high volatile pulverized coal carried in air: Hoogovens and Arbed - low volatile pulverized coal carried in air: U. D. hf 2 and Arbed -anthracite pulverized coal carried in air: China -high volatile granular coal carried in air: BSC Scunthorpe" Guili et Alii (1986) "Blast Furnace Auxilliary Fuel Injection in Europe". EIC).

⁶²⁵ "N°6 blast furnace of Hoogovens in the Netherland (2) and D. n°2 blast furnace of U. steel France are reported to be operating stably with pulverized coal injection at high rates of a level of 130 kg/ t and without lowering the coke/coal replacement ratio () High pulevriized coal injection rates and granular coal injection are challenged in actual operation in this way. Upper limits of pulverized coal inejction rate and pulverized coal particle size are not yet known. () It is thus imperative to clarify the combustion characteristics of pulverized coal in the raceway of the blast furnace and the upper

Signalons enfin l'existence d'un article à vocation plus fondamentale, plus englobante produits par deux experts reconnus en matière de technologie d'injection. Son argumentation, construite autour du rapprochement entre les 'théories' et les 'faits' de l'injection, suggère la complexité des phénomènes en jeu, et la faiblesse des modèles et prototypes expérimentaux ayant vocation à représenter les phénomènes internes au haut fourneau. L'article de G. et Alii est ainsi intégré à un groupe de 5 faits industriels (Hoogovens BF 6, D. BF 2, Shoudu, Hamborn BF 4, Schwelgern) menés dans des contextes variés ⁽⁶²⁶⁾ pour en dégager la substantifique moelle. Comme dans la lecture de l'Irsid, ces faits industriels sont le support à la mise en évidence d'une rupture dans le développement de la technologie à compter des années 80 ⁽⁶²⁷⁾, une différence de nature entre technologie pci et technologie high pci fondée sur le développement de mise au mille de coke inférieure à 300kg/t : de petite énergie auxiliaire, l'injection devient une source essentielle de l'équilibre énergétique du haut fourneau, modifiant radicalement ses équilibres internes. Cet article nous semble très intéressant du point de vue de la formation de l'axe théorie – objets techniques concrets. On y observe le jeu des représentations à vocation plus ou moins générales, de leurs confrontations, de leur rapprochement, de leur mise en correspondance, et de leur mobilisation dans la validation ou l'invalidation d'énoncés théoriques : elles forment la matière des théories technologiques. Le regroupement de faits est l'occasion de comparaisons, de généralisations, de formulation d'hypothèses, d'élaboration de concepts remontant à leur principe, à leur explication.

L'étude de l'usage collectif de la publication présentée par Grafeuille et Alii indique un élément fondamental du processus de généralisation à la française. L'Irsid a pris le relais du travail réalisé à D. L'Irsid a œuvré à l'établissement et à la reconnaissance du fait industriel présenté par Grafeuille et Alii. L'Irsid a également traduit le fait industriel présenté en une série de problèmes à valeur scientifique, de phénomènes et éléments d'intérêts pour une communauté internationale de R&D: l'unicité des faits établis à D. a été mobilisée pour questionner les représentations partagées par la communauté des spécialistes des hauts fourneaux. Non seulement l'injection de charbon à haut niveau était possible, en contradiction avec les connaissances de cette communauté, mais elle ouvrait

limits of pulverized coal injection rate and pulverized coal particul size and to develop optimum pulverized coal injection techniques" Rapport J. Steel 1989.

⁶²⁶ Il est fait référence à l'article de Grafeuille et Alii à différentes reprises et pour différentes questions. Nous n'allons pas citer l'ensemble. Les faits reconnus sont essentiellement le record du monde en matière de consommation de coke, le niveau d'injection atteint ("For a long time it was generally admitted that the injection rate of coal had to be limited to about 15% (environ 75 kg) of the total fuel rate and still today, some furnaces apparently do not yet accept higher rates"), la possibilité d'injecter du charbon à faible teneur en matière volatile, l'influence non avérée de la teneur en cendre du charbon (supposée négative), la constance du taux de remplacement à faible et à fort taux d'injection (également soulignée dans le rapport J. steel).

⁶²⁷ "After further years of stagnation and set-backs, coal injection into blast furnaces has finally found a rapid expansion during the past ten years and this trend still continues. Not only the number of installations has increased, but also injection rates and a residual coke rate as low as 295kg/thm could be attained" (Poos, A, Ponghis, N. (1990) "Potentials and problems of high coal injection rates" Ironmaking Conference Proc.).

une série de questions de recherche en mettant le doigt sur une série d'anomalies, ou d'écarts par rapports aux modèles existants (⁶²⁸).

La correspondance entre la dynamique des espaces d'innovation et la structuration des articles est donc étroite, dans un cas comme dans l'autre. Les articles peuvent être considérés comme des efforts de représentation de l'innovation destinés à inscrire ceux-ci dans des réseaux existants et dans une généralité plus grande. L'innovation y est présentée comme un résultat, plutôt que comme un processus. Elle est transformée en un bien collectif, disponible sous la forme d'un objet technique identifié, aux entreprises qui souhaiteraient l'acquérir. L'innovation s'y voit *attribué* une série de caractéristiques et de performances rapportées aux autres alternatives de l'espace technologique dans lequel on cherche à l'inscrire. L'innovation y est présentée dans le cas japonais comme l'aboutissement d'un développement technologique, d'une trajectoire logique, dont il est l'aboutissement. Elle est présentée dans le cas français comme une anomalie en rupture profonde avec l'espace technologique et les savoirs qui le caractérisent.

Les deux articles correspondent à deux approches contrastées de PCI. L'accent mis sur les performances en France, rend en partie invisible l'effort de maîtrise des phénomènes internes au haut fourneau (inscription dans un effort collectif de modélisation et de représentation), et de maîtrise des conditions de production de la technologie de la part de J. steel. Pour les acteurs de D., le modèle de calcul fourni par L'Irsid et la technologie d'injection de charbon fournie par PW et Babcock ont formé des boîtes 'noires'. Réciproquement, l'intérêt de taux d'injection élevés pouvaient sembler peu pertinent aux acteurs de J. steel disposant généralement de capacités en coke importantes. L'une et l'autre approche sont entrées en partie en contradiction, le 'fait industriel' de Grafeuille et Alii entrant en contradiction avec les recommandations issues des modèles soigneusement élaborés par les acteurs de J. Steel. Une large controverse les a opposée en les associant chacun avec une série d'autres représentations.

Les deux articles ont eu un effet 'arthurien', chacun dans son registre particulier. Parus à un moment où une compétition technologique régnait entre différentes alternatives, dont le charbon, les articles ont été positionnés comme une première pierre collective posée dans le développement des injections de charbon au haut fourneau. Comme l'a souligné Arthur, indépendamment des préférences individuelles, les anticipations des agents les amènent à prendre en considération les 'avancées technologiques', la technologie la plus rapidement stabilisée – disponibilité - ayant toutes les chances

⁶²⁸ Même à fort taux d'injection, aucun signe caractéristique des limites d'injection n'est apparu. De plus, Arbed, Hoogovens et D. ont obtenu des taux de remplacement identique dans des conditions pourtant différentes du point de vue des modèles. L'un des rôles importants des communautés de R&D mis en évidence par le cas PCI (par sa mise à défaut), n'est pas tant la mise au point des équipements que la fabrication de certitudes concernant les effets (techniques et économiques *taux de remplacement*) et les limites de l'injection. (Cf chapitre 2 sur l'utilisation des modèles fournis par les chercheurs dans les décisions d'investissement, Modèle Irsid à D., Modèle T à O.).

d'acquérir un avantage décisif. Le concept de signalement de Spence peut être appliqué aux articles, dans la mesure où ceux-ci signalent l'existence d'un investissement innovatif maîtrisé, et vise donc à influencer sur les décisions d'investissements d'autres acteurs soumis à des conditions d'incertitude. Dans cette perspective, les deux publications présentées peuvent être comprises comme des tentatives pour imposer l'idée que la technologie d'injection de charbon était désormais stabilisée et avait acquis un avantage compétitif décisif sur ses rivales, un signal destiné à modifier les anticipations d'autres agents. L'article français s'est adressé à de possibles utilisateurs de PCI. Il soulignait à la fois tous les avantages retirés par D. de son choix innovateur, et les potentialités inattendues de la technologie. Il fournit des références permettant de justifier et de calculer un investissement plus aisément sur la base d'une expérience commerciale dans une usine 'ordinaire': F. steel a donc réduit l'incertitude pesant sur l'injection de charbon en la transformant en une pratique industrielle maîtrisée et économique. L'article japonais affirme que la technologie PCI, contrairement à la plupart de ses alternatives possibles, est parfaitement stabilisée et opérationnelle. J.Steel a produit les connaissances qui manquaient pour en faire une technologie performante, adaptée aux besoins des hauts fourneaux modernes. Les futurs utilisateurs n'auront même plus à se soucier de développement, J. steel sait tout ce qu'il faut savoir pour qu'ils puissent facilement devenir utilisateurs de l'injection de charbon.

1.2) vers la création d'une théorisation intégrant des représentations multiples de pci

"In the development of any new, complex technology there is a relatively long period during which a substantial amount of learning takes place." Cowan R. (1991) *Tortoises and Hares* (⁶²⁹).

Les articles sont les supports privilégiés pour la formation d'une théorisation controversée de l'objet technique. L'une des questions essentielles au cœur des débats lors des premières expériences d'injection de charbon a été la granulométrie (partie 1). Le succès industriel d'Armco a clos la controverse. Malgré la mise au point de l'injection de charbon grenu par British Steel, et les efforts désespérés de cette entreprise pour enrôler d'autres adopteurs, la controverse n'a pas été réellement

⁶²⁹ Cowan R. (1991) "Tortoises and Hares: Choice among Technologies of unknown merit" in: The Economic Journal, Vol 101, July 1991, pp. 801-814.

rouverte dans les années 1980, et globalement, les autres entreprises ont adopté, souvent à la lettre, la théorisation proposée par Armco et ayant débouché sur la formule $80\% \leq 78\mu$ sur la base de la formule d'Essenhigh (partie 2)⁶³⁰. La théorie n'acquiert de valeur qu'étroitement articulée à une méthode, à l'objet technique démontrant son efficacité pratique.

De plus, une connaissance, et a fortiori une théorie, ne peut véritablement prendre une dimension collective – une reconnaissance- qu'en étant inscrite dans ces lieux d'échange collectifs que sont les revues, les conférences, les colloques. Les revues, comme les autorités de délivrance des brevets, représentent une certaine légitimité, un certain intérêt collectif, une certification nécessaire à la reconnaissance collective. De la même façon qu'un article scientifique vise à établir un fait scientifique (Latour 1989), on peut avancer qu'un article à vocation technologique s'efforce de promouvoir la reconnaissance d'un 'fait industriel'. La définition donnée par Latour dans le cas des faits scientifiques peut aisément faire l'objet d'une transposition. Selon l'auteur, les faits sont des énoncés ne portant "*aucune trace d'appropriation, de construction, de temps ni de lieu*" (Latour 1989, p. 64). En d'autres termes, les faits sont des énoncés à validité générale, abstrait des conditions particulières de leur production.

Un espace technologique marqué par la rupture entre PCI et high Pci

Le champ des représentations de pci s'est structuré autour d'une tension principale, une rupture progressivement instituée entre pci et high pci.

Dans le cas de PCI, la théorisation a pris la forme d'une dynamique d'apprentissage controversée, confrontant différentes visions de l'injection de charbon, de ses performances, de son intégration dans la fonction de production du haut fourneau : ce débat s'est cristallisé autour de l'établissement d'une distinction entre technologies 'PCI' et 'High PCI'.

Il ne nous a pas été possible de réunir des données précises sur chaque participant à cette vaste construction. Néanmoins, il se trouve que F. steel et J. steel peuvent être considérés comme deux représentants essentiels de deux groupes d'influence ayant contribué à former l'espace technologique des injections au haut fourneau. La confrontation de leurs deux approches éclaire donc le point de tension essentiel qui s'y est joué entre 'pci' et 'high pci'.

⁶³⁰ La seule exception jusqu'à une période récente était Pacha, un système mis au point par F.steel. Depuis le milieu des années 1990, les entreprises américaines ont commencé à s'intéresser au charbon, et l'une d'elle a adopté le système de British Steel.

Inscrite dans une volonté de double continuité technologique avec l'injection de fuel et avec Armco correspondant bien à ses besoins industriels, J. steel s'est efforcé de développer une théorisation de l'injection de fuel permettant d'optimiser l'ensemble injection-haut fourneau à partir d'une stabilisation des phénomènes intervenant dans le haut fourneau, en cantonnant cette interaction au raceway - combustion parfaite-. D'importants investissements ont donc été réalisés pour clarifier les conditions optimales dans lesquelles le couple charbon –raceway serait strictement équivalent au couple fuel- raceway. La mise en correspondance d'une théorisation technologique et d'objets techniques localisés en démontrant l'efficacité aurait assuré à l'entreprise le contrôle du marché technologique des injections au haut fourneau. D'autres entreprises japonaises se sont efforcées d'acquérir des connaissances orientées dans la même direction, et de construire des objets techniques alternatifs fondés sur des principes similaires. On peut raisonnablement penser qu'elles ont ainsi cherché à entrer en dissidence face à la volonté de J. steel de les enrôler en tant qu'utilisateurs de pci, ainsi que nous l'avons noté.

Partant d'une problématisation nettement plus singulière liée à une situation de pénurie en coke de l'usine de D., F. steel, en dépit de son implication dans la co-conception d'un objet technique avec Würth, Babcock et CdF, fondé sur les calculs incitatifs du modèle Irsid, s'est positionné prioritairement comme un utilisateur de l'injection de charbon, aux exigences particulièrement orientées vers l'économie maximale de coke. De façon pragmatique, dans le rapport à l'objet technique construit, les utilisateurs ont entrepris d'accroître leurs connaissances relatives aux conditions d'usage de PCI en 'poussant' la fonction de production à ses limites. Cette approche a amené les utilisateurs à dénoncer les théorisations existantes, en bonne part fondée sur l'extension heuristique des connaissances acquises en matière d'injection de fuel. Les théories de la combustion en vigueur, et sur lesquelles s'appuyait en partie J. steel ne tenait plus face aux faits industriels établis par D : en particulier, l'injection de charbon semblait devoir permettre l'ouverture de gisement de progrès cruciaux en matière d'économie de coke.

Nous avons rapidement évoqué le fait que l'article de F.steel s'est d'emblée positionné, lors de la conférence donnée à la réunion annuelle de l'AIME, dans une controverse technologique opposant les européens de British Steel, de Hoogovens et de F.steel, aux japonais de Kawasaki et Kobe steel à propos des 'best practices' et des possibilités – gisement de progrès anticipé - ouvertes par PCI. L'un des responsables de la recherche PCI se souvient de l'atmosphère qui régnait à la conférence:

“C'est amusant, j'étais à un congrès en 85 et il y avait une session sur l'injection. 1er exposé, c'était les japonais, des gens J. Steel - bel exposé comme le font les japonais, il faut faire ci, il faut faire ça etc.. En gros, il faut: des charbons à haute teneur en matière volatile, il faut un minimum de cendres, 4% de cendre, il faut de l'oxygène, et puis 70 kg, c'est l'optimum, il faut pas en mettre plus. Arrivent les gens de...oh oui, et puis pulvériser. Arrivent les gens de British Steel: nous on a du grenu, je ne sais plus combien de cendre, c'est du haut volatile, il y a peu d'oxygène, on est à 120 kg. D'accord. Hoogovens, oh, ben nous, on a du pulvérisé, c'est du haut volatile quand même, il n'y a pas beaucoup d'oxygène, ils avaient un charbon à basse cendre et on est

arrivé à 130 kg. Dunkerque: c'est du pulvérisé, c'est du bas volatile, pas d'oxygène, 13 % de cendres, et on a fait jusqu'à 145 kg. Dernier exposé -il y en avait 5-, Kawasaki Steel, japonais.-bon ben il faut du pulvérisé, du haut volatile, pour les cendres ils en ont pas trop parlé, il faut de l'oxygène et il faut surtout pas dépasser 70 kg! {tape dans les mains} {rires}. Donc on peut raconter n'importe quoi. Et dieu sait pourtant si ceux là avaient fait de la recherche et des tas de trucs!" ()).

1.1 a) *Fondements cognitifs de la technologie: entre substitut au fuel et nouvelle technologie, à quoi pci est-il donc utile?*

J steel : Une heuristique fuel= charbon au fondement du développement technologique

L'espace d'innovation s'est ouvert sur une heuristique forte à J. steel, la mise en équivalence du fuel et du charbon. Nous avons évoqué le travail de recherche et développement opéré dans le cadre de l'espace d'innovation pour donner une validité à cette proposition. L'orientation prise par J.steel n'a pas été suivie par elle seule. Les '5 grandes' ou 'big five' japonaises ont toutes entrepris des recherches portant sur des phénomènes très proches réalisées dans le même esprit, avec des méthodes similaires. Toutes ont comparé le charbon au fuel, toutes ont étudié dans quelles conditions (facteurs) le charbon se rapprochait le plus du fuel en matière d'efficacité de la combustion, à l'aide d'appareils expérimentaux différents. Cette émulation a favorisé à la fois le développement de controverses sur l'interprétation des résultats, mais aussi la mise en place d'une certaine accumulation de connaissances.

Il nous semble important de retrouver les dynamiques d'accumulation au sein desquelles ces expérimentations ont vu le jour. La combustion du charbon à de hautes températures comme celles des raceways et pour des temps de résidence très faible (inférieur à 10ms) étaient considérées comme mal connues par les spécialistes de la combustion. De même, les phénomènes intervenant dans le raceway semblaient largement mystérieux du fait des difficultés pratiques d'observation de ces foyers où règne une température de plus de 2000°C: "*because of the immense difficulties in performing combustion related measurements under actual blast-furnace conditions, knowledge about combustion in the blast furnace is extremely limited*"⁽⁶³¹⁾. Un certain nombre de recherches avait été menées sur la combustion du charbon dans des fours (Gudenau 1986⁶³²). Un certain nombre d'études avaient été menées sur les phénomènes de combustion dans le raceway (Jamaluddin 1986). Les sidérurgistes japonais avaient entrepris d'instrumenter les raceways de façon à mieux connaître les mécanismes y trouvant place. Mais l'étude de la combustion de charbon pulvérisé dans le raceway a ouvert un nouveau domaine d'étude aux confluent de ces deux courants jusque là séparés et permettant l'acquisition de connaissances nouvelles sur le raceway et sur le charbon et sa combustion: en suivant le charbon pulvérisé au cœur des foyers du haut fourneau, les chercheurs ouvraient de nouveaux champs de connaissance sur les raceways et sur la combustion du charbon. Les investigations menées sur la

⁶³¹ Bortz, S. et Flament, G. (1983) op cit.; Jamaludin, A. et Alii (1983) op cit.

combustion du charbon pulvérisé dans le raceway ont donc présenté un intérêt commun pour des spécialistes de la combustion et de la chimie de la combustion désireux de mieux saisir les phénomènes à l'œuvre dans les hauts fourneaux réels afin d'asseoir leurs théories sur une efficacité réelle et des enjeux économiques, et des sidérurgistes ayant pour objectif d'approcher les phénomènes en jeu dans le raceway pour optimiser les pratiques d'injection à partir de l'application de théories valides universellement indépendamment des hauts fourneaux considérés (⁶³³).

Cette émulation a favorisé le développement par les sidérurgistes japonais, au début des années 80, d'une série de prototypes, toujours plus sophistiqués, figurant les phénomènes de combustion au haut fourneau (⁶³⁴). Le premier appareil utilisé par J.steel, était une chambre vide chauffée à 1200°C pour reproduire les conditions du foyer, munie d'une tuyère et d'une lance d'injection. Cet appareil était équipé de thermocouples mesurant la température, d'une camera et d'un échantillonneur de poussière, permettant d'évaluer le niveau de combustion du charbon. J.steel a montré que la taille des particules devait être maintenue autour de 100 microns, que la teneur en matière volatile devait être élevée (autour de 30%) pour une combustion atteignant 80% (équivalent à du fuel) (⁶³⁵). Kobe steel a utilisé un modèle de haut fourneau dit 'coke bed', instrumenté d'un analyseur de gaz, d'un thermomètre et d'un échantillonneur de poussière, de manière à évaluer l'influence de l'injection sur la forme et la profondeur de la cavité, et sur la distribution de la température (⁶³⁶). Avec le même type d'appareil, Sumitomo a montré l'existence d'un arbitrage entre taille des particules de charbon, teneur en matière volatile et niveau d'injection et a abouti à la recommandation de charbon à haute teneur en matières volatiles, à faible grain (équivalent Armco), et de la suroxygénation (⁶³⁷). NKK a construit un prototype de haut fourneau chauffé à l'aide d'une lance au plasma. Ils ont mis en évidence le rôle de la température de vent était importante dans le préchauffage du charbon dès son entrée dans la tuyère et ont également montré que la combustion du charbon était plus complète à 80 cm au-dessus de la tuyère (les mesures s'effectuaient jusque là au niveau de la tuyère) (⁶³⁸). En 1986, J. steel a pris la décision de construire un 'hot model' d'un nouveau genre, qui d'après nos interlocuteurs est aujourd'hui encore unique au monde, inspiré directement d'un haut fourneau réel, et permettant de simuler, à échelle réduite, l'ensemble des opérations d'un haut fourneau. Dans le processus de R/D relatif à pci, le développement d'objets intermédiaires, permettant

⁶³² Gudenau, H. (1986) "Fundamentals of blast furnace coal injection" in : European Ironmaking Conference, IV, 5, pp.2-35.

⁶³³ Les citations croisées, fréquentes sur toute la période étudiée, le démontre. Rappelons aussi la citation de l'article de Wakuri et Al dans un contexte de recherche fondamentale, du fait à la fois des mesures fournies, rares et donc précieuses, et de l'effort de modélisation qui les accompagnaient. Les entreprises japonaises se sont trouvées à la pointe de ce mouvement hybride de recherche et de développement technologique et industriel au début des années 1980.

⁶³⁴ Des maquettes 'froides' et 'chaudes' avaient été utilisées dès les années 50-60 aux Etats Unis et en Europe Gardner, G. (1960) in : Trans. Met. Soc. AIME, v.28, p.423 ; Taylor, J. et Al (1957) in : J. Iron & Steel Inst., v.187, p.330. Le caractère cumulatif, collectif et appliqué est spécifique au cas du Japon.

⁶³⁵ Wakimoto, H., Sato, T, Hara, Y (1984) in : Tetsu to Hagane, v. 70, S.805

⁶³⁶ Kanayama, H., Seki, Y, Saito, T., Maekawa, M., Narita, K., Tamura, S. (1982) in : Tetsu to Hagane, v.68, s. 763.

⁶³⁷ Myazaki, T., Shinoda, T., Kamei, Y., Masuike, T. (1982) in : Tetsu to Hagane, v.68, S.2385.

⁶³⁸ Ariyama, T., Mitsufuji, H., Nishio, H., Ono, Y., Yamada, H., Fukushima, T. (1985) in : Tetsu to Hagane, v.71, S. 83.

de traduire les théories en pratiques et les pratiques en théorie a donc été tout aussi saisissant que l'accumulation de connaissances à proprement parlé.

Une seconde voie a consisté à chercher à instrumenter les foyers des hauts fourneaux réels. De nouveau, les sidérurgistes japonais, et en particulier J.steel, ont développé des outils et des instruments originaux permettant d'enregistrer les phénomènes se produisant au cœur des hauts fourneaux, et de commencer à accumuler des données concernant la profondeur, la composition gazeuse (oxygène et dioxyde de carbone), et les zones de températures mesurées dans différents hauts fourneaux concrets (⁶³⁹).

L'article de Wakuri et Alii a alors fourni des éléments uniques d'articulation de ces différents 'mondes' en mettant en correspondance pour la première fois, des données collectées au cœur d'un haut fourneau soumis à l'injection de charbon, les instruments patiemment élaborés dans les recherches industrielles sur les raceway - les instruments utilisés pour caractériser le raceway (profil gazeux, profondeur du foyer, température de gaz) correspondent aux résultats des recherches expérimentales menées auparavant - et un modèle de raceway avec injection de charbon (Jamaluddin et Alii 1986). L'expérience industrielle de O., présentée par Wakuri et Alii, a contribué à valider la plupart des hypothèses posées et des résultats obtenus dans les expérimentations menées sur la combustion. D'après les études et recherches menées sur la base des connaissances du fonctionnement interne du haut fourneau, les conditions optimales d'utilisation de l'injection de charbon ont été fixées à 80kg/tonne de fonte (⁶⁴⁰), avec une limite implicite de l'injection située, comme dans le cas du fuel, aux environ de 100-120 kg/tonne de fonte (⁶⁴¹). Le charbon devait impérativement contenir environ 7% de cendres (⁶⁴²), 33% de matières volatiles (⁶⁴³) et être broyé très fin (80% <=à 72 microns) (⁶⁴⁴). Les certitudes ont donc fait place aux questions. En assurant la conformité du broyage, en s'assurant des ressources en charbon à faible teneur en cendre et à haute teneur en matière volatile, et en

⁶³⁹ Jamaluddin et Alii (1986) citent une autre instrumentation par Inabati et Alii. D'après Jamaluddin et Al (1986) les équipes japonaises sont les seules à avoir développé ce type de mesures de manière systématique. Depuis lors, des mesures ont été effectuées sur un haut fourneau australien (BHP Newcastle 1) par un chercheur de l'université de Hokkaido Nomura, S. (1986) in : trans-ISIJ, v.26, p.107.

⁶⁴⁰ Les expériences de N.steel repéraient un optimum à 80kg. S. steel repéraient un optimum à 60kg. Ariyama, T. et Alii (1985) "Combustion of pulverized coal in an experimental furnace", in: Tetsu to Hagane, 71, S.83.; Myazaki, T. et Alii (1982) "Combustion of pulverized coal in experimental furnace" in: Tetsu to Hagane, 68, n°11, S.2385-92.

⁶⁴¹ Suzuki, T. et Alii (1982) in: Tetsu to Hagane, 68, n°11, S.762; Wakimoto, H. et Alii (1983) in: Tetsu to Hagane, 69, n°4, S.105; Borz, S et Al (1983) "Experiments on pulverized-coal combustion under conditions simulating blast furnace environments" in: Ironmaking and Steelmaking, Vol 10, n°5, pp. 222-229.

⁶⁴² Uenaka et Alii (1985) de K. steel recommandent un taux de cendre inférieur à 10%. Les ingénieurs d'Armco ont établi le rôle des cendres en proposant une équation $R=1.48 - 0.666 (\% \text{cendre charbon} / \% \text{cendre coke})$. D'après Armco, les taux de remplacements dépendraient directement des taux de cendres du charbon injecté. Fletcher, L. (1981) "Technical & Economic Aspects of Coal Injection at Blast Furnace Tuyeres" in: AIME op cit.

⁶⁴³ Suzuki et Alii (1982) op cit. recommandent des charbon à haute teneur en matières volatiles. Tanaka et Alii (1985) revue de métallurgie, op cit., Uenaka et Alii (1985) AIME, op cit. recommandent explicitement un taux supérieur à 30% de matières volatiles.

⁶⁴⁴ Comme nous l'avons noté, cette équation provient d'Armco et des résultats de recherche de Essenigh dont ils se sont inspirés. Ishikawa (1982, 18th Ironmaking and Steelmaking meeting) a reporté que J. steel a mené des études ayant abouti à

remplaçant, dans le tableau de bord la mesure de mise au mil de fuel par celle de mise au mil de charbon, J.steel revenait à une situation de production routinière. L'heuristique charbon= fuel reposait désormais sur un axe théorie-instruments-objets techniques concrets robuste et efficace, faisant basculer pci dans l'univers du connu. Les acteurs de J. steel ont en particulier pu capitaliser sur les progrès importants réalisés dans la compréhension des phénomènes d'injection au moment de l'injection de fuel et inscrire pci dans la continuité des compétences, connaissances, et objets intermédiaires leur ayant assuré une suprématie technologique.

La correspondance construite a permis de définir, d'anticiper un certain usage de PCI, un certain gisement à exploiter. Dans une certaine continuité avec le travail mis en œuvre pour comprendre l'apparition inattendue de limites à l'injection de fuel, lesquelles semblaient fluctuer, suivant les expériences industrielles, autour de 100 kg /tonne de fonte ⁽⁶⁴⁵⁾. L'une des recherches de l'époque ⁽⁶⁴⁶⁾ a montré qu'au-delà d'un certain seuil, le taux de remplacement du coke par le fuel tend à décroître, rendant de plus en plus sous-optimales les pratiques d'injection au-delà d'un taux limite. Ayant pu confirmer à l'aide d'études et de mesures que le charbon se comportait comme le fuel, les acteurs ont transféré les méthodes d'investigation au charbon. Dans le cas de pci, les mesures effectuées sur la première installation de O. ont confirmé l'existence d'un tel seuil, situé aux environs de 30 kg/tpi. Ainsi, même si les limites 'physiques' de l'injection de charbon n'avaient pas été explorées industriellement, les savoirs accumulés démontraient qu'une injection élevée était, au mieux indésirable. Cette base de connaissance était par ailleurs fortement convergente avec la situation industrielle des sites de J. steel, déjà évoquée, pour lesquels une injection de l'ordre d'une soixantaine de kg par tonne de fonte était de nature à optimiser la marche des hauts fourneaux ⁽⁶⁴⁷⁾.

Les recherches et études citées, dans leur stratégie d'établissement des conditions optimales de l'injection de charbon, ont donc eu tout naturellement tendance à se tarir une fois 'connues et définies' les conditions recherchées, et une fois l'univers inconnu du charbon transformé en 'univers connu' ⁽⁶⁴⁸⁾). Aussi, lorsque qu'un chercheur a manifesté son désir de poursuivre des études sur l'injection de charbon, en particulier en ce qui concerne la limite supérieure d'injection de charbon, il s'est trouvé singulièrement isolé et renvoyé à son inutilité. *"Donc là c'était une recherche prospective.*

des résultats proches, en particulier, d'une perte d'efficacité de la combustion au delà de 100-150 microns. K. steel recommande exactement la même dimension Uenaka, T. (1985) op. Cit.

⁶⁴⁵ Rappelons que Poos et Ponghis situent cette limite conventionnelle autour de 15% du fuel rate soit environ 75kg/ fonte *"For a long time, it was generally admitted that the injection rate of coal had to be limited to about 15 of the total fuel rate and still today, some furnaces apparently do not yet accept higher coal rates"* (Poos et Ponghis, 1990, op cit p. 443)

⁶⁴⁶ Tate, M. (1972) in: *Tetsu to Hagane*, Vol 58, p. 566.

⁶⁴⁷ Kobe Steel, une autre grande société japonaise, s'est trouvée en concurrence avec J.steel depuis la fin des années 1970, y compris dans la démarche d'acquisition d'une technologie américaine existante. Avec deux années de décalage par rapport à la mise en service de l'installation à O., Kobe steel a suivi une dynamique d'optimisation très similaire authentifiée par une structuration identique de son article, et la mise en avant de résultats très similaires. Tanaka, K. (1984) "L'injection de charbon pulvérisé aux hauts fourneaux de K. steel" in: *Revue de Métallurgie*, Octobre 1985, pp. 765-773.

⁶⁴⁸ L'expression 'connu' ne réfère pas à une évaluation 'objective' mais à la perception qu'en ont développé, à un moment donné, les acteurs concernés...

Intuitivement, en tant que chercheur, je pensais qu'il était nécessaire de déterminer jusqu'à quelle charge on pouvait aller. C'était ça ma question. Je pensais qu'il était nécessaire de montrer les limites de ce genre de.. et les gens ils pensaient qu'en réalité, on était à 60 kg, mais les gens pensaient qu'on pouvait aller jusqu'à 100 kg de charge de pci.” ⁽⁶⁴⁹⁾. A quoi bon connaître les limites supérieures de l'injection si l'optimum se situe à 60 kg et que cette technologie est parfaitement maîtrisée ? Au début des années 1980, il n'était pas question d'injecter du charbon au-delà des limites possibles. Au point que mener des recherches sur pci pouvait sembler quelque peu déplacé: “ *porter l'injection à un haut niveau, ce n'était pas tellement le rôle de la recherche. Même si on fait de la recherche là dessus, on suit des tendances, des faits qui sont réalisés par ailleurs, donc c'est pas...ce n'était pas tellement le rôle de la recherche de faire ça, et là, a été mis en place le projet d'injection de minerai de fer. Ca, c'est une technique qui était beaucoup plus avancée. Enfin c'était une technique d'avenir d'une certaine façon, parce qu'il y a de nouvelles technologies de hf ou on envoie directement le minerai....”* ⁽⁶⁵⁰⁾. C'est donc sur une base cognitive stabilisée, dans un univers connu, que s'est progressivement articulée la mise en correspondance entre technologie et objets techniques. Les attributs de l'objet techniques ont été cristallisés, fixés à partir de calculs rationnels.

b) De boîtes noires en boîtes grises: exploration progressive des conditions de production et d'utilisation de Pci à F. steel.

En comparaison, l'approche française semble mériter l'adjectif attribué par le chef de projet à sa démarche : 'pragmatique'. Après avoir construit une première installation en composant avec une série de ressources limitées, les utilisateurs ont exploré, dans le corps à corps avec l'objet, l'échelle de performance dont celui-ci était capable, et les ajustements que cela requérait.

Dans le cadre de l'espace d'innovation, le chef de projet de D. a construit une série de repères liés à l'utilisation de la technologie pci. La formulation a respecté les objectifs négociés avec la direction de l'entreprise: les spécifications précisaient les principes et les performances attendues d'une installation décomposée en organes, l'objectif d'injection représentait le compromis trouvé avec la direction, Le taux de remplacement représentait le fonctionnement interne du haut fourneau tel que les modèles de l'Irsid permettaient de l'appréhender.

Ces différents éléments ont agi comme des boîtes noires permettant au chef de projet d'avancer dans la réalisation de son projet sans avoir à acquérir une multitude de connaissances touchant à ces différents domaines. Il ne s'agissait pas pour lui d'établir les bases scientifiques et

⁶⁴⁹ Entretien chef d'équipe de recherche , J. steel, décembre 1995.

⁶⁵⁰ Entretien general manager de la recherche division fonte, Futsu, Japon, novembre 1995.

technologiques de l'injection de charbon, mais de mener sa mission à un terme heureux, en mettant en route une installation en bon état de fonctionnement sur le hf 2.

La contrepartie de cette stratégie d'investissement tient à ce que les épreuves se sont traduites en 'succès' ou en 'échec': les acteurs ont été autant en cause que les concepts. Ainsi, les exploitants estiment aujourd'hui, que si le hf 2 a connu une marche exceptionnelle entre 84 et 86, au moment de la réalisation des exploits industriels avec l'injection de charbon, ces exploits ont tenu à la persévérance et aux croyances des leaders, personne n'ayant été réellement en mesure de comprendre les raisons du succès *"oui, on ne savait pas, on n'avait pas toutes les..., on n'avait pas à l'époque toutes les... on avait beaucoup d'analyses mais par contre, on n'a jamais su dégager la substantifique moelle, on n'a jamais su dégager vraiment les points, les points clés"* (651).

Dans le cadre de la démarche pragmatique retenue, fondée sur un apprentissage par 'essai-erreur', et étant donné le caractère localisé de l'espace d'innovation, le maintien des boîtes noires n'est pas apparu comme un problème en soi, aussi longtemps que les performances étaient atteintes et que l'objectif de réduction de coke progressait : dans une atmosphère très controversée sur le bien fondé de l'injection de charbon, la tenue de l'installation, la démonstration de son bon fonctionnement, et du profit potentiel qu'il serait possible d'en tirer constituaient des priorités. L'exploit démontrait bien entendu, qu'en matière de haut fourneau, *"ce n'est pas la dernière des choses qu'on a faite qui fait qu'il ne marche pas bien"* et contrariait l'idée tenace selon laquelle *"l'injection, ça fait mal marcher les hauts fourneaux"*. D'après le chef de projet, la controverse a été close à partir de la réalisation de performances exceptionnelles: le charbon étant injectable économiquement, le débat était clos.

"De ce jour là, ma conviction a été définitivement faite, que l'injection de charbon - malgré toutes les personnes qui pouvaient dire 'oui, mais s'il y a quelque chose...' - là, tout le monde était d'accord, unanime, pour dire 'euh, ben le hf il peut pas mieux marcher, - et que c'est dans les cas positifs qu'il faut tirer les conclusions et pas négatifs, hein - il peut pas mieux marcher, il y a 130 kg de charbon, de charbon maigre, donc ne nous laissons pas dire que l'injection de charbon ça fait mal marcher le fourneau, ils peuvent très bien marcher à condition de trouver les bons points de réglage, hein, le charbon maigre, ça fait marcher les fourneaux aussi bien que les autres hein, 130kg!'. Un certain nombre de tabous qui sont tombés comme ça, et en 1985, c'est quelque chose de vraiment capital" (652).

En battant le record d'injection, les acteurs de D. n'ont pas uniquement démontré le bien fondé de leur position, mais ouvert un véritable gisement de progrès en matière d'économie de coke. Cet exploit a d'ailleurs été confirmé par d'autres 'faits industriels' publiés par d'autres sites européens (Maldonado 1985, Koen et Al 1985). Ces résultats se sont inscrits dans un débat plus large entre exploitants, dépositaires de savoirs pratiques sur les hauts fourneaux, d'une part, et d'autre part, experts et chercheurs qui, sur la base de leurs calculs et de leurs modèles, annonçaient l'impossibilité

⁶⁵¹ Entretien ingénieur section technique, site de D., F. steel, janvier 1996.

⁶⁵² Entretien, chef de projet Pci, siège de F. steel, janvier 1996.

pure et simple de telles performances. Un intérêt commun est donc né autour de l'explication des phénomènes d'injection de haut niveau (high pci) entre les chercheurs stimulés par cette anomalie contrariant leurs prévisions, et mettant en cause leur édifice conceptuel, et les exploitants à la recherche d'éléments théoriques leur permettant d'optimiser leurs pratiques indépendamment des fluctuations et des variations liées aux situations singulières dans lesquelles ils opèrent. Les objets techniques concrets et leurs performances ne correspondaient plus aux théories formulées lors de l'injection de fuel. L'exemple de ré-articulation réalisée par les chercheurs de l'Irsid et les exploitants de D. offre un exemple de réaction particulièrement adaptative à cette situation.

Alors que l'édifice japonais reposait sur l'hypothèse de dégradation de l'économie de coke au-delà de 60- 80 kg/ t de fonte, les performances réalisées à D. sur le haut fourneau 2 indiquaient que l'injection de charbon à des taux de l'ordre de 150kg/t de fonte ne perturbait absolument pas le fonctionnement du haut fourneau, et ne se traduisait pas par une dégradation de l'économie de coke. Cela invalidait deux hypothèses au fondement des connaissances construites à J.steel : l'idée d'un optimum à 60kg/t de fonte reposant sur le confinement du charbon dans le foyer, et l'hypothèse de mise en équivalence du fuel et du charbon. Cette fracture entre deux visions de pci a été exposée clairement au moment de la conférence de l'AIME (Détroit 1985), déjà évoquée, durant laquelle les deux positions inconciliables ont opposé européens et japonais.

De boîtes noires en boîtes grises: articulation centre de R/D - site.

Jusqu'à l'exploit industriel réalisé par D., l'implication de l'Irsid a été épisodique. Un chercheur avait certes mis en place quelques protocoles de mesure permettant d'évaluer grossièrement les températures et le degré de combustibilité de différentes catégories de charbon à l'occasion des expériences pilotes menées à U. Il en avait conclu que le charbon maigre ne convenait pas à l'injection de charbon. Les modèles de combustion stochiométrique imposaient également l'évidence que l'injection de charbon était nécessairement limitée à un taux avoisinant les 100 kg/t.

L'intervention de l'Irsid ne s'est pourtant pas cantonnée à des mises en garde théoriques. Une jeune recrue a été envoyée sur le site en 1984 pour porter une évaluation sur l'installation et son fonctionnement. Il s'agissait de mettre en évidence les écarts entre les objectifs et les spécifications des différents organes de l'installation et leur fonctionnement 'réel' *in situ*. L'une des études menées a consisté à mesurer la marge d'erreur de l'équirépartition. Pour résoudre la difficulté liée à la mesure de l'équirépartition, un protocole expérimental a été mis en place. Deux lignes de transport correspondant à deux tuyères ont été équipées de deux capteurs de pression différentielle, mesurant les variations de pression entre deux piquages espacés d'une trentaine de mètres. Les mesures ont été comparées, à

partir de l'hypothèse que les pertes de charges devaient être similaires sur chaque ligne si l'équirépartition était bonne. Les résultats ont dans l'ensemble confirmé la légitimité de la fermeture de la boîte noire technologique: tout semblait marcher comme prévu (⁶⁵³).

A partir de l'exploit industriel, et autour de la mise en place d'un investissement sur le gros haut fourneau français (1985), le haut fourneau 4, une véritable coopération s'est mise en place entre les chercheurs de l'Irsid et les hauts fournistes de D. Cette dynamique, que l'on peut situer entre 1985 et 1990, a vivement contribué au rapprochement entre D. et l'Irsid :

“ il y a eu réellement un changement de mentalité, et il y a eu réellement une époque très favorable à D. Au point d'ailleurs qu'à ce moment là, les gens de l'Irsid préféreraient presque aller faire un chantier à D. qu'à F!” (chercheur Irsid). Le chef de projet se souvient d'avoir sollicité l'aide des chercheurs : *“Autrement dit, j'ai dit un peu comment s'est développé, c'est pas très intellectuel notre démarche, elle est d'abord économique, elle a été ensuite d'essayer de voir ce qui se passait, très pragmatique, on s'est jeté à l'eau, et à partir de ce moment là -on nous a dit tout est facile etc - mais maintenant regardons avec l'Irsid ce qu'il faut faire, et l'Irsid, depuis cette époque là, a toujours travaillé avec nous, et puis, à D. d'abord, et puis avec d'autres, mais même avec D., sur ces sujets là. On se basait sur l'expérience de D.”* (chef de projet pci).

Cette articulation entre hauts fournistes et chercheurs s'est traduite par un double mouvement de mise en action, interne et externe. Les questions liées à l'utilisation ont été dans une large mesure prises en charge par les hauts fournistes de D. Les problèmes ne pouvant pas être réglés sur place, ou impliquant une élaboration scientifique ont été posés à l'Irsid:

“Autrement dit, il faut chercher à expliquer ce qui se passe, et en particulier, essayer de comprendre, et faire des essais de combustion, au laboratoire de Mulhouse etc - des choses qu'on a du vous raconter après - entreprises par l'Irsid, beaucoup de choses qui ont été faites, moi je dirais que c'est la conséquence de ce qui a été fait à D, et puis on les a pris, moi j'ai...on a dit " maintenant il faut travailler, voir comment ça marche, voilà les questions qu'on se pose, point de vue qualité de charbon, point de vue autre chose, essayons d'expliquer - est ce qu'on peut en mettre plus, comment? ben on va voir"...

Dans les deux cas, il est essentiel de noter que l'optimisation s'est faite dans une large mesure dans le cadre de l'action productive, en marche, par rapport à des questions définies très largement par les utilisateurs et découvertes dans la relation à l'objet technique et à leurs objectifs.

Les transformations les plus importantes se sont produites autour de la nouvelle fonction de production au hf 4, le haut fourneau de grande taille du site. Alors que l'Irsid n'avait jusque là, jamais eu accès à ce haut fourneau, la préparation du haut fourneau en prévision de l'injection a été l'occasion de développer une série d'instrumentations, d'outils de contrôle et de caractérisation du

⁶⁵³ Quatre problèmes analytiques ont été étudiés plus en détail: la question de l'usure des tuyères et la question de l'écoulement du charbon, correspondant à des préoccupations de la part des utilisateurs, et la question de la combustion du charbon et du battement du jet de charbon, correspondant à des interrogations des chercheurs. Il s'agissait de poser les premiers jalons sur des questions durables: la position de la canne, la combustion du charbon, l'influence de la composition du charbon sur le transport, l'optimisation du layout. Dans l'ensemble, cependant, les résultats obtenus n'ont pas contribué significativement à assoir les pratiques d'injection au hf 2 de D. Le résultat le plus significatif d'après les acteurs de D. concernaient la combustion du charbon. Les études menées à U. et à D. montraient sans ambiguïté que l'utilisation du charbon maigre devait être banni, car il limitait irrémédiablement l'injection à de faibles niveaux.

fonctionnement, récemment mis au point sur le site de F. en collaboration entre les ingénieurs de F. et l'Irsid. Le hf 4 a alors bénéficié des technologies et des connaissances les plus avancées en matière de contrôle du process, très comparable aux équipements des hauts fourneaux japonais, et largement inspirés par ces derniers, et permettant d'instrumenter le modèle RIST-Irsid du haut fourneau (⁶⁵⁴).

L'un des points d'articulation des connaissances ayant ouvert une possibilité de monde commun est la question de la combustibilité du charbon et le débat qui l'a caractérisé. L'expérience des acteurs de D. entrainait en conflit avec les théorisations développées à l'Irsid, et plus largement, dans le monde de la recherche:

“Alors, je peux vous dire que c'est là où l'expérience industrielle est forte importante et, nous on en mettait sur le Fx2 et les semaines passaient, et puis finalement, quand on mettait 50 kg de charbon, parce que c'était pas plus que ça à l'époque, les 1ers mois, ben on enlevait l'équivalent de coke quoi - donc on disait 'je ne sais pas si ça brûle pas mais le Fx, il marche bien hein - il marche raisonnablement, il n'y a pas de problème particulier -bon-', et donc on était confronté à une expérience industrielle qui était pas négative du tout. Je ne sais pas si - je ne sais toujours pas où est-ce que ça brûle le,- bien qu'il y ait des théories, le charbon, le charbon maigre ou l'autre- mais manifestement intellectuellement il y avait un problème, en disant, 'ben tiens, ça doit pas brûler - d'accord ça brûle pas, je veux bien croire que ça brûle pas - par contre, ça brûle bien quelque part puisque le hf marche et que ça remplace du coke. Donc on a continué” (chef de projet).

Les résultats industriels remettaient en question les fondements des connaissances patiemment construites sur les injections au haut fourneau (⁶⁵⁵), et faisaient basculer l'injection de charbon définitivement dans la zone des phénomènes inconnus:

“Oui, au delà de l'approche stochiométrique -stochiométrique ça veut dire lorsqu'on a une quantité d'air suffisante pour faire brûler le charbon - on rentrait dans une zone inconnue, la combustion sous-stochiométrique du charbon. Donc, on savait bien que ça coïncerait à un moment ou à un autre, mais on n'avait aucune idée de quand. Et là, c'est une compétition, c'est symétrique entre...on sait bien que le charbon, on peut le gazéifier avec du CO2 mais ça prend beaucoup plus de temps, et ...On a essayé de décrire le mieux qu'on pouvait, en modèle, on a cherché..” (ancien chercheur Irsid).

Les recherches de l'Irsid se sont donc trouvées relancées et aiguillonnées par cette anomalie:

“on a montré en fait aussi que de toute façon, ben le grain de charbon il n'avait aucune chance de brûler dans la cavité. Enfin, on était incapable de dire combien on brûlait, mais, compte tenu des temps de combustion qu'on pouvait mesurer, on trouvait que ces temps de combustion étaient beaucoup plus longs que les temps de séjour dans la cavité, donc on disait, 'il n'y a pas de problème, il n'y a pas de problème, on ne peut pas!' {rire} On a commencé à dire aussi, 'bon ben si on peut pas le brûler...', comme je disais, les calculs et les dépouillements qu'on peut faire sur les hf montraient que finalement, le charbon était bien consommé.() On a commencé à regarder les problèmes de gazéification, c'est à dire que ces charbons, ben ils remontent avec le gaz, à un moment il va trouver du CO2, parce qu'on va former du CO2 en formant des oxydes de fer. Or on sait très bien que dans le hf, on a des endroits où on a une réaction $CO_2 + C = 2Co$. On s'est dit donc il peut.. maintenant, comment réagit-il? On a là aussi, regardé comment se faisait cette réaction avec des semi-cokes issus de charbons, ou avec du coke. On s'est rendu compte que elles sont beaucoup plus réactives que le charbon. 'Donc ça nous donne un petit peu...bon ben, il peut se consommer!'. Donc on a avancé un petit peu progressivement, pas à pas, en disant bon ben, on explique déjà des mécanismes, donc on est capable de donner des explications - la 1 ère chose c'était ça: dire pourquoi ça marchait. Ensuite, ben progressivement là, on a,

⁶⁵⁴ Nicolle, R., Hug, P., Biausser, H., Capelani, R., Wanin, M. (1982) “Détermination de l'état interne du haut fourneau” in : *Revue de Métallurgie*, août 1982, p.671.

⁶⁵⁵ Lorsque les limites à l'injection de fuel sont apparues - sous forme de suies au sommet des hauts fourneaux- l'hypothèse a été posée, puis démontrée, que cela tenait fondamentalement à la limite de la combustion parfaite dans le raceway. L'oxygène se trouvant en quantité insuffisante au delà d'un certain seuil d'injection, relativement au fuel, ce dernier ne pouvait pas brûler avant de quitter le raceway. Tel était l'état des connaissances au début des années 80. Il semble que le charbon ne se comporte pas comme le fuel en injection...

toujours un peu ce rouleau compresseur, ben bon maintenant on va essayer peut-être d'aller un peu plus loin et de quantifier." (chercheur Irsid).

Si l'on prend l'exemple des connaissances acquises sur la combustion, la mise en œuvre d'une articulation verticale apparaît clairement : l'Irsid a progressivement traduit les questions posées par les pratiques mises en œuvre à D en question de recherche beaucoup plus générales, et inscrites dans les débats internationaux sur la combustion du charbon dans le raceway. Le problème des limites d'injection s'est transformée en 'question charbon-tuyère'. Les tonnes de charbon injectées ont été remplacées par une particule dont le comportement a été étudié, analysé, modélisé en coopération avec le laboratoire de chimie de Mulhouse et EDF.

Un des éléments très remarquables de la démarche suivie tient à l'effort d'articulation réalisé entre connaissances théoriques, et phénomènes industriels. Cet effort s'est traduit par la mise en place de coopération avec les universités, les grandes écoles, ou encore le centre de recherche spécialisé de l'EDF. Bien que cette dynamique de construction de correspondance se soit déclinée sur différents modes, nous en avons retenu deux éléments particulièrement marquant : la construction d'un logiciel de simulation de l'injection de charbon (représenté par le parcours d'une particule) au sein du raceway -MELODIF- en coopération avec EDF, et le financement d'une thèse de doctorat encadrée par le laboratoire de Mulhouse sous la direction du professeur Prado. Finalement, l'équipe de recherche a fini par démontrer que les charbons à faible teneur en matière volatile étaient préférables aux charbons à haut teneur en matière volatile: *"In fact, specific laboratory tests have shown that high volatile coals, heated up rapidly, could generate much higher amounts of gas than anticipated on the basis of their chemical analyses which can subsequently lead to soot formation"* ⁽⁶⁵⁶⁾.

Un second exemple caractéristique de cette articulation est donné par la progressive qualification du charbon. Dans le cadre de l'espace d'innovation, nous avons noté que les acteurs, sur le conseil des ingénieurs d'Ashland et de Donetzk ont sélectionné un charbon à faible teneur en matières volatiles (11-12%) pour des raisons de sécurité. Le charbon contenait un taux de cendres relativement élevé (12-13%). Les premiers temps, ce charbon a été conservé, car des doutes subsistaient sur le plan de la sécurité: les consignes fixées par le Cerchar n'ont pas pu être respectées. Nous avons noté que les premières études de l'Irsid militaient en faveur de l'abandon rapide de ce charbon au profit de l'adoption d'un charbon de type 'Armco', à haute teneur en matières volatiles et à faible teneur en cendres, considéré comme plus favorable à l'optimisation de la combustion. Toutes les études menées internationalement sur des appareils expérimentaux allaient dans le même sens. Bortz et Flament (1983) ont explicitement désigné, au terme d'une série d'expériences, le charbon Armco

⁶⁵⁶ Poos, A et Al. (1990) op cit. p. 447.

comme constituant l'injectant idéal ⁽⁶⁵⁷⁾. L'expérience d'injection à 140 kg de charbon maigre a totalement pris le contre-pied de ces prédictions, rouvrant la question de la qualification du charbon.

L'usine de D. s'est forgé sa propre expérience en mettant en œuvre une diversification progressive des charbons au milieu des années 80. Mais les acteurs conservent un très mauvais souvenir de ces tentatives qui se sont rapidement arrêtées. Elles se sont régulièrement soldées par des bouchages inattendus des lignes:

“les problèmes sur le transport ont été en général liés aux problèmes de changement de charbon. D'où la fiabilité transport et c'est vrai qu'on était allergique après à tout, à partir du moment où on avait le charbon sur le hf4, on ne voulait pas se lancer à l'aventure pour changer de charbon. Petit à petit on était, voyez, on restait un peu avec le même charbon parce que là, on était sûr que ça marche, les autres ben à chaque fois on se plante, alors planter le hf4 parce que le charbon tout à coup on bouche les tuyaux hein...euh là c'était du sport hein! Alors là, on a eu une paire de désagréments forts importants.”(site de D.).

Si les connaissances des sidérurgistes sur la chimie des charbons semblaient satisfaisantes - question de la combustibilité- il n'en allait pas de même des connaissances sur la physique des charbons. Certains charbons prometteurs sur le plan économique n'ont jamais pu arriver régulièrement dans les foyers des hauts fourneaux. Les questions de la broyabilité, de la transportabilité, du comportement dans les silos de stockage sont apparues comme des questions clés pour une injection maîtrisée ⁽⁶⁵⁸⁾.

L'Irsid a donc été largement sollicité sur les questions liées au charbon:

“Et on a quand même eu beaucoup, beaucoup de problèmes, avec, depuis le début, et ça c'est peut-être 1 an ou 2 ans après les premiers essais, même pas, on s'est tout de suite retourné vers l'Irsid en disant "mais dites nous ce qu'il faut mesurer sur un charbon pour pas avoir l'impression de faire le loto, là, et de choisir un charbon qui va pas nous donner de souci en injection". Et quand je dis coté injection, c'est pas coté combustion si vous voulez, c'était arriver jusqu'à la tuyère, hein...() et c'est là où je n'ai fait que le répéter depuis, cette époque là et vraiment à l'Irsid "trouvez nous un indicateur qui permette de choisir un charbon, alors on en a un, mais on voudrait bien en avoir d'autres.” ⁽⁶⁵⁹⁾.

Les connaissances se sont progressivement affinées à partir d'une savante mobilisation d'éléments hybrides. Les questions comme celle de la broyabilité ont fait l'objet d'une normalisation:

“La seule chose qu'on avait c'était de dire on fait l'essai, à quelque chose près...on est arrivé à un certain nombre de conclusions, c'était qu'il fallait pas un charbon très tendre, ça c'est sur, on regardait chez les...euh de façon un peu empirique, Hoogovens a démarré tout à fait à la même époque que nous, J. steel O. aussi, non légèrement avant, et ils utilisaient toujours qu'un charbon: c'était des charbons qui avaient des indices hardgrove autour de 50, donc assez durs, et donc c'était des choses qu'on avait comme référence, on savait que s'il était trop tendre- une fois on en a essayé un assez tendre, il ne rentrait même pas dans le broyeur- il ne passait pas la grille du broyeur. Là on avait été très loin, on savait qu'il fallait qu'il soit raisonnablement dur.” (site de D.)

⁶⁵⁷ D'après cet énoncé, Armco, par le hasard de la géologie terrestre, se trouvait donc situé sur une mine de charbon dont les qualités étaient idéales pour l'injection.

⁶⁵⁸ Le charbon fournit un excellent illustration de la singularité des installations technologiques. Un charbon injecté à Hoogovens, ne passe pas nécessairement à D.

⁶⁵⁹ Entretien chef de projet PCI, siège de F. steel, janvier 1996.

Une série d'aller retour entre action et représentations ont ainsi pris place. Chaque nouvel échec industriel mettant en œuvre les outils affinés de mesure du charbon a renvoyé à l'exploration d'autres éléments:

“mais les caractéristiques physiques du charbon, c'était pendant bien longtemps finalement, uniquement l'indice hardgrove pour le choix d'un charbon, et on voyait bien que ce n'était pas suffisant, que le charbon reprenait plus ou moins l'humidité une fois qu'il était séché, et puis qu'il y en avait qui se transportaient bien et d'autres qui collaient () Il a fallu que F. en 89, se plante avec deux charbons russes qui prenaient fortement l'humidité, pour que on finisse par mettre au point un test qui pouvait nous aider un peu, et qu'on a fait en commun” (site de D.).

L'articulation de la recherche et des expériences industrielles a été particulièrement marquée dans ce cas:

“selon la nature du charbon à D., on a constaté que dans certains cas, ça passait bien, et que dans d'autres cas, ça se passait moins bien du point de vue technologique, enfin...problème de séchage, problème d'équirépartition donc en fonction du charbon, donc il y a plusieurs pilotes, il y a toujours des pilotes - caractériser pour essayer de comprendre qu'est ce qui se cache derrière ce problème - identifier et après faire passer une batterie de tests à un certain nombre de charbon. Donc ça, ça continue. On a en même temps amélioré la technologie des installations. Comme on avait des problèmes quand on passait d'un charbon à l'autre, on a fait un truc tout con, on a équipé nos installations, au moins F. et D., euh de systèmes qui permettent d'utiliser les charbons en mélange. Avant c'était le charbon A puis le charbon B. Dès fois ça se passait mal quand on passait de A à B. Les gens ne voulaient plus changer de charbon parce qu'une fois que tout était stable, il faut pas me parler d'autre chose'. Donc on a mis en place des installations pour pouvoir euh, faire des essais et pouvoir passer de A à B progressivement. Pouvoir faire 50/50 ou 70/30. et faire donc les transitions de façon souple et sans risque” (ancien chercheur Irsid).

La construction d'une correspondance, dans le cas français est passée par la mise en place d'une coopération entre hauts fournistes du site de D. et chercheurs de l'Irsid. Le rapprochement des hommes autour d'intérêts communs s'est traduit par la construction de connaissances de différents ordres, par la mise au point de logiciels permettant de représenter les phénomènes, par la création de tests inscrits dans le cadre de l'action productive, par une instrumentation poussée, à la japonaise, du haut fourneau 4. Lorsqu'en 1990, les acteurs du site de D. ont publié un second article dans les proceedings de l'AIME celui-ci portait les marques de changements radicaux. L'article s'est doté d'une foule de graphiques, d'indicateurs, de courbes référant à la fois à la mise en place d'une instrumentation diversifiée, à la nouvelle composition de l'équipe Fonte, à l'articulation des différents types de savoirs favorisés par la coopération avec l'Irsid. Une série d'articles co-signés ont commencé à apparaître à la même période.

2) Dispositifs d'accumulation collectif, apprentissage généralisé

L'espace d'innovation s'est caractérisé par son caractère exploratoire. Il s'est accompagné d'une forte instabilité et d'une forte incertitude justifiant un investissement limité dans le temps et une évaluation soignée. Ces premières étapes ont formé une chaîne de 'petits événements' marquant profondément de leur empreinte la dynamique de diffusion.

Sur la base de ces premières innovations s'est forgée une dynamique accélérée de confrontation et de controverse, de concurrence et d'alliance, au fur et à mesure que l'objet technique s'est autonomisé et s'est inscrit dans des réseaux toujours plus larges. Le jeu s'est complexifié alors car l'innovation n'était plus qu'une innovation parmi d'autres, et les connaissances toujours confrontées à des expériences plus variées. Alors que le contexte de l'innovation s'est complexifié, son contenu a tendu à s'incorporer dans l'objet technique et dans une série d'objets complémentaires. La généralisation s'est développée à travers un effort d'optimisation – de rationalisation- progressive des ressources mobilisées dans les conditions de production, la définition d'un objet technique susceptible d'être utilisé dans des situations diversifiées, la possibilité pour l'objet technique de voyager à des distances de plus en plus grandes indépendamment de ses conditions de production et d'utilisation. En d'autres termes, il s'agissait de pourvoir l'objet technique d'une autonomie, de fabriquer des boîtes noires, d'automatiser et de simplifier les procédures, de créer des objets intermédiaires facilitant le déplacement de l'objet technique. par rapport à ses conditions initiales de production, de le transformer en bien.

2.1) Standardisation versus modularité

J.steel et F.steel offrent deux cas polaires de dynamique d'accumulation et de généralisation d'une innovation : l'une fortement standardisée reposant sur la création d'une forte asymétrie et une division du travail marquée entre producteurs et utilisateurs de la technologie, l'autre modulaire, articulant des savoirs hybrides et mêlant les acteurs.

2.1 a) *Logique de standardisation à J.steel*

une division du travail organisée autour de l'accumulation des savoirs de conception et de production dans le Département central d'ingénierie

Chez J.steel, la mise en projet de l'innovation a été l'occasion d'une collision entre organisation et logique d'innovation. Il est frappant de constater à quel point *l'espace de qualification* japonais s'est prêté au jeu de l'innovation. En retour, l'organisation du projet a épousé les contours de l'organisation routinière du travail chez J. Steel (⁶⁶⁰).

Lorsque la question de la généralisation de pci a été ouverte chez J. Steel en 1982, une certaine controverse a vu le jour. Un nouveau groupe de projet a donc été monté autour de la nouvelle

⁶⁶⁰ En ce sens les termes flexibilité et rigidité sont ambigus puisque dans une certaine mesure, chaque organisation représente une certaine combinaison des deux ingrédients. Ainsi, la flexibilité de l'espace de qualification vis à vis des activités d'innovation non routinière peut être vue comme une extrême rigidité organisationnelle.

problématisation: “*comment et quand rendre PCI profitable?*”. Sous la direction morale du Honsha noseisenbutcho, le projet s’est une nouvelle fois appuyé sur la mise en relation des principaux représentants organisationnels des acteurs impliqués par la question.

La composition du groupe de projet trahit la même logique triangulaire que celle suivie lors de la mise en place du transfert de technologie. On y trouve, d’un côté les ingénieurs d’O., dépositaires de l’état de l’art en matière d’utilisation de l’injection de charbon, de l’autre, les ingénieurs des sites, N., K., Y., T., représentants le collectif d’utilisateurs “qui voulaient introduire PCI”. Entre les deux, positionnés en pivot, chargés de la responsabilité de l’organisation du projet, trois ingénieurs du PET, détenteurs des savoirs liés aux conditions de conception et de production de l’équipement, ont été intercalés. Une équipe de chercheur est également venue renforcer l’équipe par son expertise et apporter une capacité d’investigation ponctuelle sur certains points particuliers, ainsi que les ingénieurs de PMD.

Cette équipe d’une vingtaine de personne s’est d’abord livrée à un ‘brainstorming’ destiné à repérer une liste de points susceptibles d’amélioration et d’économies: on retrouve ici une logique de ‘reverse engineering’ pour laquelle le Japon a acquis une réputation d’excellence (Freeman, 1988⁶⁶¹). Les investigations liées à la fiabilisation et à la reconception ont ensuite été confiées à une équipe d’experts du PET, en fonction de leurs compétences. Après deux années de travail et de réflexion, le coût de l’installation a pu être réduit de 40%, ouvrant la possibilité d’une généralisation des équipements chez J. steel, et au-delà

“ce travail a permis d’abaisser le coût d’environ 40%. Ainsi, cela a permis de démarrer l’installation PCI à N. BF 1 en 1984 et dix mois plus tard, à T. BF 4...Ce mouvement de baisse du coût de l’installation se poursuit. Si l’on construisait, aujourd’hui, un équipement équivalent à celui introduit à O. BF 1, le coût serait à peu près de moitié... donc réduit de 50% par rapport au coût initial” (⁶⁶²).

Formation d’un objet frontière: vers le poly-usage d’une installation modèle

De la première à la seconde installation: modalités de la généralisation

Une fois abaissé le coût de l’installation, conformément aux souhaits des ‘utilisateurs potentiels’ réunis au sein du groupe de travail, la seconde installation a été mise rapidement en place à N. dès 1984. Puis, moins d’un an plus tard à T. Nous avons noté précédemment la logique d’amélioration rapide, et de routinisation employée à J. steel. L’un des ingénieurs responsables de la diffusion nous confiait ainsi, “*Bien sûr, nous avons pris en charge la première, le deuxième, et peut-*

⁶⁶¹ Nous avons eu l’occasion de nous entretenir avec un ingénieur français en stage dans une grande entreprise de construction automobile japonaise à ce sujet. Il a confirmé l’importance et la minutie du travail d’étude des modèles de la concurrence connaissant un certain succès. D’après cet ingénieur, les modèles achetés étaient démontés minutieusement, mesurés et analysés, “chaque boulon pesé” pour évaluer les points intéressants et les points améliorables du modèle. Ce mode d’étude de la concurrence, au concret, rejoint les observations faites par Magaud et Sugita (1991) sur les chaînes de montage de téléviseur, où l’organisation du travail était organisée, non sur la base de prescription venues d’en haut, mais en commun, à partir du démontage-remontage avec le chef d’atelier d’un prototype du produit à venir.

⁶⁶² Entretien ingénieur du PET, Futtsu, Japon, octobre 1995.

être la troisième installation, mais après ça, c'est devenu un peu 'routinisé'". Suffisamment routinisé pour en confier progressivement la charge à de nouvelles recrues du PET.

Nous avons évoqué le travail de réduction du coût de l'installation menée par le groupe de travail consacré à cette tâche. De même, nous avons souligné l'intégration progressive d'éléments importants mis en évidence et mis en place par les utilisateurs comme l'automatisation progressive du criblage du charbon avant son entrée dans le broyeur. Enfin, l'un des points essentiels de cette amélioration rapide a concerné les logiciels permettant de concevoir les installations selon un même modèle, *"les algorithmes qui permettent d'adapter ce genre d'équipement à différents sites"* ⁽⁶⁶³⁾. Sous l'impulsion du PET, ceux-ci ont été adaptés aux critères japonais à partir de la seconde installation:

"Pour la première installation, c'est à dire lors de l'installation à O., nous avons suivi fidèlement, formule par formule, les know how fournis par Armco. Mais deux années plus tard, pour le BF 4 de T., nous avons tout modifié, tout chamboulé...à la manière du Kaizen japonais. Nous avons fait l'apprentissage pendant deux années, puis nous avons adapté ces techniques d'opération à nos conditions particulières." ⁽⁶⁶⁴⁾.

De la seconde à la nième: dynamique d'amélioration

A chaque nouvelle installation, il était possible de réaliser l'équipement un peu plus vite ⁽⁶⁶⁵⁾, avec un coût plus faible, une fiabilité plus grande, et une mobilisation de plus en plus réduite. Cette organisation a donc permis de faire sortir l'objet technique des conditions singulières de son espace d'innovation et de définir des conditions de re-production optimisées et routinisées, faisant de l'ensemble une boîte de plus en plus noire. Les compétences singulières développées dans l'espace d'innovation, et les exigences des utilisateurs ont été progressivement incorporées dans une série d'outils de calcul, de mesure, de mieux en mieux ajustées à des contextes variables, autorisant de jeunes ingénieurs expérimentés de prendre en charge la production d'une installation et sa mise au point.

Cela ne signifie pas que chaque installation soit strictement identique aux autres. Au contraire, les ingénieurs du PET insistent sur les spécificités de chaque haut fourneau, et même, de chaque installation PCI

"chaque installation PCI est unique () Si l'on compte l'ensemble de nos interventions, cela doit faire plus de trente...Ne serait-ce qu'à O., on a fait cinq équipements..et chaque fois, on a recommencé à partir de la conception du plan... c'est une construction à l'unité PCT" ⁽⁶⁶⁶⁾.

En d'autres termes, une bonne maîtrise routinisée des conditions de re-production d'une installation d'injection de charbon ne consiste pas à produire automatiquement, indépendamment du contexte d'implantation. A l'inverse, il s'agit de fixer ce qui d'une installation à l'autre est commun, et

⁶⁶³ Entretien ingénieur responsable de la planification au PET, Futtsu, Japon, octobre 1995.

⁶⁶⁴ Entretien ingénieur du PET, Futtsu, Japon, février 1996.

⁶⁶⁵ A titre indicatif, un temps moyen de mise en route nous a été donné: 6 mois pour les années récentes avec un coût évalué à environ 50 % du coût de départ.

⁶⁶⁶ Entretien ingénieur responsable de la planification au PET, Futtsu, Japon, octobre 1995.

de laisser variable, selon des lois de mieux en mieux explicitées, ce qui d'une installation à l'autre varie. Il s'agit d'arriver à la formulation d'une série de 'principes de base' du design permettant d'adapter chaque installation à son contexte spécifique.

“Chaque BF a des conditions de production différentes. Donc on doit adapter l'équipement PCI à chaque situation particulière. Par exemple, la dimension du bf, donc la capacité de production est singulière, le niveau de pression à l'intérieur du bf n'est pas le même (d'un fourneau à l'autre), le volume de PC injecté est différent, la qualité du charbon utilisée...” ⁽⁶⁶⁷⁾ ⁽⁶⁶⁸⁾.

Tout était prêt, chez J. steel, dès la troisième installation, pour la production d'installations de charbon 'Armco-NSC' ⁽⁶⁶⁹⁾ à grande échelle, et la diffusion des concepts et des arbitrages réalisés lors des premières installations au sein de l'entreprise, aussi bien qu'au Japon, et ailleurs.

Entre 1985 et 1990, tous les hauts fourneaux de J. steel ont été équipés, à l'exception d'un seul, celui de M. Ils injectaient régulièrement du charbon à un taux moyen de 66kg par tonne de fonte ⁽⁶⁷⁰⁾. Au Japon, la diffusion semblait également bien lancée puisque J. Steel s'est trouvé en mesure de vendre une installation à NS Steel dès 1984, suivie par une seconde dès 1985. En juillet 1985, 6 hauts fourneaux sur dix installés au Japon étaient l'œuvre de l'entreprise. Pourtant, l'expansion s'est arrêtée là. La seule opportunité véritable de revente d'une installation s'est présentée lorsque N. steel a affiché son intention de s'équiper en 1986. Mais la bataille a été perdue au profit de K. steel. A l'étranger, J. Steel a été indirectement à l'origine de la sélection d'Armco par deux entreprises importantes, Posco en Corée, et China Steel à Taiwan. Au milieu des années 1995, J. Steel évoquait de possibles marchés au Philippines et en Afrique du Sud.

Pour les ingénieurs du PET, la technologie Armco était la seule technologie véritablement efficace et éprouvée d'injection de charbon. Pour J. steel, comme pour les autres entreprises qui souhaitaient se trouver à la pointe de la technologie en matière de haut fourneau, il paraissait nécessaire de passer par l'expertise et les brevets déposés par Armco. Un bon moyen de se rendre aussi indispensable qu'Armco vis à vis des autres entreprises japonaises consistait par conséquent à en adapter les principes à la 'marche excellente' des hauts fourneaux japonais. En d'autres termes, il s'agissait pour le PET de s'inscrire dans une continuité technologique vis à vis de la technologie dont Armco était

⁶⁶⁷ Entretien ingénieur du PET, Futtsu, Japon, février 1996.

⁶⁶⁸ On voit ici une figure supplémentaire de la complexité de la standardisation. Un design peut être standardisé sans que les produits de ce design soient identiques. Ils sont plutôt semblables.

⁶⁶⁹ L'expression est employée par Gathergood (1988) op cit. dans la synthèse qu'il a produite pour L'International Iron and Steel Institute.

⁶⁷⁰ “Le site de M. était le dernier à introduire PCI en 1993 () parce que comme la cokerie de M. avait une grande productivité, il n'y avait justement pas d'intérêt à introduire PCI, (ce qui aurait conduit à réduire) la production de coke” Entretien ancien responsable département Fonte de M., Etat Major J. Steel, octobre 1995.

dépositaire, toute en reléguant Armco au passé de cette technologie, et en se positionnant dans l'avenir de celle-ci (⁶⁷¹).

Comment procéder? Nous avons connaissance d'un certain nombre d'éléments de cette stratégie, en particulier concernant le 'transfert' de la technologie Armco et sa méthode. Mais le simple transfert propulse l'entreprise, au mieux, s'il est parfaitement exécuté, dans le présent de la technologie. Comment alors se positionner dans l'avenir d'une trajectoire technologique? comment devenir la référence en matière d'injection de charbon? La réponse de J. steel a consisté à qualifier la technologie Armco, à évaluer ses limites, et à l'améliorer' -c'est à dire à l'adapter en remontant à ses conditions de production- dans la perspective de son usage futur. La partition comporte donc deux voix, celle des conditions de production et celle des conditions d'utilisation. Le nœud de l'analyse réside donc dans la qualité des liens tissés entre représentants de la production et représentants de l'utilisation de l'objet technique. L'organisation de J. steel a servi d'incubateur.

D'après les ingénieurs du PET, le cœur de la technologie Armco résidait dans les know how de conduite et les algorithmes permettant de calculer l'optimisation de l'objet technique. Ce sont donc en priorité sur ces algorithmes et formules de calcul communes qu'ont portés les améliorations. Une bonne illustration est fournie par le cas du layout. L'élément essentiel de la performance de l'installation du point de vue technologique pour les ingénieurs du PET est l'équirépartition

“ça n'arrêterait pas le haut fourneau (si on n'atteignait pas 5% d'équirépartition)..mais si on atteint pas cet objectif, il y a deux conséquences. D'une part, la production se déstabilise. Le volume de fonte produite risque de diminuer. D'autre part, les opérations du hf étant déstabilisées, il est nécessaire d'injecter une quantité plus importante de coke, alors le coût de production augmente”(⁶⁷²).

L'équirépartition dépend en partie du distributeur. Nous avons évoqué au chapitre précédent l'épisode étonnant de son amélioration. Pour que le distributeur standardisé puisse travailler, un autre élément doit être optimisé, il s'agit de la disposition des lignes de transport du charbon, ou layout.

La remontée aux conditions de production de l'équipement Armco a pris la forme d'une prise en main des logiciels et des formules d'optimisation du layout fournis par l'entreprise américaine. Les formules de calcul se présentaient sous forme de 'logiciels essentiellement'. En mettant les formules bout à bout, 'on obtenait une solution (installation) au bout'. La première installation a fourni aux ingénieurs du PET une occasion de comprendre comment les ingénieurs d'Armco calculaient leur layout. Les données d'utilisation fournies par le haut fourneau moderne, utilisé comme un lead user de PCI, ont alors servi de socle à une interrogation des formules, à partir des écarts constatés entre objectifs japonais et réalisation. *“Les deux ans d'opération nous ont permis d'acquérir des données*

⁶⁷¹ Nombre d'économistes ont insisté, après Schumpeter lui même, sur ce qu'ils ont perçu comme un signe de continuité technologique fort, le fait que les innovations majeures sont en général constitué d'associations inédites de technologies existantes (Nelson et Winter 1982). Le cas évoqué ici met à jour que cette continuité, souvent interprétée en terme de déterministes (technologie= la technologie s'impose), tient à un travail d'alignement stratégique de la part des entreprises.

d'opération. On est arrivé à savoir comment le charbon pulvérisé se comporte dans nos hauts fourneaux"(ibid). On voit bien ici le travail de mise en correspondance, d'instrumentation, de la théorie technologique d'un côté, de l'objet technique localisé et de ses performances de l'autre.

Prenons un exemple montrant que la mise en correspondance permet la généralisation. Nous avons évoqué le bricolage ingénieux qui a permis aux acteurs du PET de confirmer leurs doutes vis à vis de la fiabilité du distributeur Armco. En disposant des sacs en bout de ligne, juste avant le montage définitif, et en comparant le poids de ces sacs, une estimation de marge d'erreur de l'ordre de 20% a été faite. Ce bricolage peut être considéré comme un élément typique de l'espace d'innovation. Le processus de généralisation a alors consisté à étendre la validité de cette démarche et à construire un outil utilisable aisément sur un ensemble de sites. Il n'existe pas de mesure incorporée ligne par ligne de débit de charbon, alors comment faire? Les ingénieurs du PET ont simplement réitéré le bricolage dans différentes conditions et en ont tiré un tableau, une base de données de référence. A partir de là, ils ont construit une équation contenant des variables telles que la pression de l'installation, la pression du haut fourneau, le débit global du charbon etc - dont nous avons noté qu'il a constitué le premier effort d'instrumentation de manière à pouvoir "estimer le volume de charbon pulvérisé" et sa répartition sans avoir à les mesurer directement. Les ingénieurs du PET se sont donc doté d'un outil général leur permettant d'estimer l'équirépartition sur les différents hauts fourneaux.

Plus que n'importe quel autre élément de l'objet technique, le layout traduit les arbitrages nécessaires entre l'application d'une formule commune et l'adaptation des principes au cas toujours singulier du contexte dans lequel ils sont inscrits. C'est singulièrement au layout que pensent les ingénieurs du PET lorsqu'ils déclarent: "*Chaque installation PCI est unique.... Le layout varie en fonction de l'espace utilisable () chaque haut fourneau a une histoire différente. Les équipements annexes s'accroissent autour du fourneau. Chaque fois qu'on a installé cet équipement pci, on n'a jamais connu la même situation.*"⁽⁶⁷³⁾.

La performance d'ensemble de la technologie dépend donc de ce réglage subtil, cette mise en cohérence de l'objet technique et de son contexte, le raccordement de l'injection de charbon au haut fourneau. Il ne s'agit pas uniquement d'optimiser le circuit de transport du charbon, mais de régler son interaction avec le 'circuit vent' présent à la circonférence du haut fourneau. Un chercheur français notait que ce travail s'apparente au réglage d'un instrument de musique:

"on a démontré qu'en fait, tout ce qui est, tout le circuit vent du hf () c'est un tuyau d'orgue, donc en fonction de sa géométrie, de la température du vent, elle a des fréquences de résonance et donc, on a des fluctuations des pulsations de pression ici, comme dans un tuyau d'orgue, bon à faible fréquence etc, en infrason, mais ce sont ces pulsations, qui en fait, provoquent les battements du jet de charbon." ⁽⁶⁷⁴⁾. Cette optimisation s'est effectuée en deux temps.

⁶⁷² Entretien ingénieur du PET, Futtsu, Japon, février 1996.

⁶⁷³ Ingénieur du PET responsable du planning, Futtsu, Japon, octobre 1995.

⁶⁷⁴ Le travail est tellement délicat et complexe que dans certains cas l'optimisation n'a pas réussi comme dans le cas du hf 3 de D. qui malgré les efforts déployés par les ingénieurs de la section technique et l'Irsid, n'a jamais pu être réglé. Le résultat se traduit par une mauvaise équirépartition "on a eu beaucoup de problèmes sur le fourneau 3..j'ai beaucoup de raisons de penser -on a fait des mesures après avec l'Irsid, et on avait des différences de 20 à 30 %, souvent 30% d'ailleurs, de différence d'injection entre une tuyère et une autre.() (il existe) une installation Würth mais pneumatique à F., du genre de

Dans un premier temps, les ingénieurs ont évalué la formule proposée par Armco et ont tenté de proposer son adaptation aux conditions d'utilisation japonaises "*nous avons fait l'apprentissage, durant ces deux ans, et adapté ces techniques d'opérations (know how) à nos conditions particulières*". L'une des adaptations a d'ailleurs consisté à simplifier les logiciels Armco: une journée de calcul sur un gros ordinateur était nécessaire. Ce temps de calcul a été réduit à quelques secondes. La stabilisation de la formule correspond étroitement au mécanisme de standardisation. La standardisation consiste précisément à mettre à jour la formule permettant d'appliquer strictement le même calcul de mise en forme dans une variété de contextes différents, c'est à dire à mettre à jour ce qu'ils ont en commun. Il s'agit de trouver l'unité de mesure commune à un ensemble d'installations optimisées, l'unité de mesure qui les rend strictement comparables et semblables.

Le second temps de l'optimisation est de nature plus informelle. Il s'agit de l'expérience gagnée, de la compétence accumulée en interne, et indispensable à l'utilisation et l'application de la formule aux différents contextes rencontrés. Un spécialiste de la question commente:

"Bien sûr, le distributeur joue un rôle important () Mais ce savoir-faire du layout des lignes est aussi, sinon plus important pour atteindre une telle précision de l'équirépartition (aller au delà de 5%). C'est un savoir-faire que l'on a acquis, nous, dans le temps. Nous faisons à chaque fois, un calcul d'optimisation avec l'ordinateur, compte tenu de l'espace utilisable. L'objectif de 5% est un seuil minimal. A chaque installation nouvelle, nous cherchons à dépasser ce seuil. Si possible, on essaie d'aller au-delà, en cherchant à optimiser le layout des conduites".

La formule constitue l'unité de mesure qui garantit la re-production du modèle J. steel. Elle offre un support stabilisé aux ingénieurs du PET, qui peuvent alors se focaliser sur l'unicité de chaque contexte. Cette capacité d'utilisation et d'interprétation de la règle est un élément complémentaire essentiel de la standardisation. Autour de la règle et de son application peut se déployer une accumulation de savoir- faire (Hatchuel 1994). La standardisation stabilise ce qui est commun, et facilite la prise en considération des spécificités, la constitution d'une expertise capable de lui donner une validité générale (Griesemer & Star, 1989). Pour satisfaire les critères d'excellence des hauts fourneaux japonais, les ingénieurs du PET ont donc à la fois constitué des outils stables et standardisés prenant en compte leur commune mesure (objets intermédiaires permettant d'appliquer le même principe à différents contextes), et la capacité d'interprétation, l'expérience irremplaçable nécessaire au raccordement apparemment sans couture de l'injection de charbon et des hauts fourneaux.

L'exemple du layout illustre donc la méthode employée, et les apprentissages mis en œuvre au cours du processus de généralisation. Pour J. steel, la généralisation a essentiellement pris la forme d'une logique de standardisation. Les données recueillies, les accommodements mis en place, ont formé une base d'expérience à partir de laquelle des règles comparatives, des unités de mesures

celle.. de la même famille que celle (du hf 3) mais avec euh, quand même, disons, une meilleure répartition. Une très bonne répartition disons - c'est là où il y a quelque chose qui tient à leur procédé, bien que globalement, c'est le même type de procédé" (Chef de projet PCI)

communes, des indicateurs et capteurs ont été forgés pour être étendu à l'ensemble des hauts fourneaux. Les bricolages tels que le crible maladroitement assemblé par les utilisateurs de O., ou la technique des sacs permettant d'approcher grossièrement l'équirépartition, ont été instrumentés, automatisés de manière à être dégagé, autant que possible, de leurs conditions locales de production. Les mises en formes subies ont cherché à faciliter la circulation, l'utilisation rapide, l'usage partagé d'objets simples, universels (⁶⁷⁵).

Un autre exemple marquant est donné par le 'manuel d'opération' dont nous avons mentionné l'existence au chapitre précédent (⁶⁷⁶). Le 'manuel' n'est pas un traité de principe sur la théorie de la conduite de la nouvelle fonction de production. Il est un manuel rédigé par les utilisateurs pour les utilisateurs (⁶⁷⁷). Il 'objective' l'expérience et les savoirs détenus par les utilisateurs : par l'écriture, il rend accessible et reproductible à une multitude de contextes. Le contenu du manuel est composé de descriptions de situations jugées représentatives, singulièrement de situations de dysfonctionnement, c'est à dire de situations où les compétences supposées de l'objet technique et des utilisateurs, réglées en principe, ont dû être raccommodées localement. Le manuel présentait ainsi une série de recettes et de solutions bricolées à O. Le manuel est chez les ouvriers, comparable à la règle chez les ingénieurs, un moyen de sortir de l'interpersonnalité, du caractère incorporé des savoirs pratiques, ou plus exactement de les compléter en leur fournissant un support, un cadre stable et partagé, une référence commune.

La standardisation peut donc être comprise comme une modalité de généralisation basée sur le tracé de frontières entre ce qui est commun aux sites et ce qui est différent.

2.1b) Le cas de F. Steel: multiplication des systèmes locaux

C'est précisément au moment où tout semblait devoir être routinisé que les hauts fourneaux de D. ont entamé une dynamique d'apprentissage les amenant à remonter vers les conditions de production et d'utilisation de la technologie. Après quelques mois de prise en main des installations visant à stabiliser les opérations et en particulier à bien maîtriser les nouveaux instruments de contrôle du chargement mis au point par l'Irsid, une nouvelle logique de progrès, d'optimisation du fonctionnement a ainsi été insufflée: "*Fin 88, début 89, on a commencé à réfléchir sur - 'ben comment*

⁶⁷⁵ Nous entendons ici 'universel' au sens où l'outil est accessible à un ingénieur non spécialiste. Au lieu d'exclure en requérant une capacité théorique chèrement acquise, les objets intermédiaires simplifient en figeant les principes et en favorisant le développement de savoir d'utilisation. La multiplication de ces petits outils communs renforcent à l'inverse le sentiment de professionnalité commune.

⁶⁷⁶ Ici l' 'universalité' vaut pour la profession ouvrière. Le 'manuel' joue pour dans l'univers du sens pratique de la conduite des haut fourneaux, le rôle des équations pour les ingénieurs dans l'univers du sens des formes.

⁶⁷⁷ Cette horizontalité des mises en relation et des apprentissages a souvent été considérée comme un trait caractéristique de l'organisation industrielle japonaise (Aoki 1988, Magaud et Sugita 1991, Maurice 1988). En France, la 'formation' prend

ça se faisait qu'on arrivait pas à injecter plus finalement, parce que on achète une tour pour 40 tonnes/heure, mais nous on veut lui en faire faire 60" (678).

De la première à la seconde installation: modalités de la généralisation

Dès décembre 1984, la direction d'U. décidait de consentir un second investissement, à destination cette fois du gros haut fourneau de l'usine de D., le hf 4. La seconde installation a été conçue dans une forte continuité vis à vis de la première. La prise de décision a été nettement plus rapide dans la mesure où les arguments présentés ont été les mêmes, les procédures également, et que les acteurs avaient acquis l'expérience du marché. Comme le laissait entendre le bilan de clôture, l'investissement devait également rééquilibrer une situation de surcapacité de broyage charbon, et permettre de rentabiliser pleinement le premier investissement. Il ne s'agissait donc pas d'investir dans une installation complète, mais simplement dans une tour d'injection (679).

Les acteurs promoteurs de l'injection avaient fortement gagné en légitimité depuis leur première expérience, que ce soit la direction technique du site ou le chef de projet. La position du chef de projet PCI, était également beaucoup plus favorable, puisqu'en juin 1984, il venait d'être promu chef de service fabrication pour l'ensemble des hauts fourneaux. L'encadrement en général avait été remplacé, et l'atmosphère du Département dans son ensemble était nettement plus favorable au développement de l'injection de charbon. Le risque industriel semblait réduit dans la mesure où les acteurs de D. avaient à leur actif une première réussite

"C'est pratiquement fin 84 qu'on marchait régulièrement sur le hf 2, mais avec 60-80 kg - fin 84 a été prise la décision de lancer l'installation pour le fourneau 4, avec un gros pari, hein, ça a été donc lancé fin 84, un gros pari - mais moins gros quand même (que dans le cas de la première installation) - c'est parce qu'on voyait que le hf marchait bien, avec moins de , enfin on était à 80 kg, ça marchait bien - 80 kg sur le hf 4 alors qu'il consomme deux fois plus, deux fois plus de coke, c'est quand même une économie importante. Alors la technologie, on l'a, elle est bien maîtrisée, il y a pas de problème, on y va." (680).

La conception de l'installation a donc été similaire à celle du haut fourneau 2, avec une transposition, sur un haut fourneau de grande dimension, des principes acquis et un appel au même fournisseur, Paul Würth:

"dans le cas du hf 4, l'installation c'est la même que le hf 2, un peu améliorée parce qu'on était en 1986, la même installation qu'en 82." (681).

L'important, pour le chef de projet était de reproduire la même installation à grande échelle, de façon à pouvoir bénéficier des mêmes performances sans avoir à parcourir de nouveau la courbe d'apprentissage *"on avait une installation qui nous donnait satisfaction sur le fourneau 2, et on ne*

souvent l'allure d'un enseignement fondé sur des principes dont les enseignés se plaignent régulièrement de la distance vis à vis de la pratique.

⁶⁷⁸ Entretien ingénieur Section technique, site de D., janvier 1996.

⁶⁷⁹ D'après nos calculs, une tour seule représente environ 30% du coût de l'investissement initial.

⁶⁸⁰ Entretien chef de projet PCI, siège de F. steel, janvier 1996.

⁶⁸¹ Entretien chef de projet PCI, siège de F. steel, janvier 1996.

voyait pas très bien pourquoi on allait en reprendre une autre.. reformer les gens - parce que c'est quelque chose qu'on oublie à chaque fois, D. justement, de ce point de vue là, a eu assez de problèmes de ce genre là, on a jamais su faire trois installations semblables à la file, avec le même constructeur”⁽⁶⁸²⁾. Des pressions politiques se sont pourtant exercées sur les acteurs de D. pour tenter d'imposer un autre constructeur, le fournisseur de la première installation française sur le site d'U., mais, pour les acteurs de D. cela représentait un éloignement vis à vis de leur cahier des charges⁽⁶⁸³⁾.

Forts de l'expérience déstabilisatrice vécue lors de la première installation, les responsables ont décidé de régler les problèmes propres au fonctionnement du haut fourneau avant de commencer à y injecter du charbon. La mise en place de l'injection de charbon, sous l'impulsion du nouvel encadrement a donc été l'occasion d'une mise en chantier de grande importance, tant du haut fourneau 4, que des habitudes de travail. Deux 'antennes' Irsid ont ainsi été détachées à temps plein auprès de l'équipe du haut fourneau 4 pour les assister dans la caractérisation de son fonctionnement, et dans la mise à niveau de sa conduite et de ses instruments.

L'un des chercheurs se souvient de son étonnement à son arrivée sur place:

“Tout marchait mal! Dans tous les domaines, ça marchait mal! Il y avait eu une percée de creuset en 83. Événement imprévu et regrettable, il avait été rafistolé en 83, c'était une percée imprévue, donc on était pas prêt. Le hf 4 a été remis en route, et il fallait faire en sorte de préparer l'injection. Mais en 84-85, la marche n'était pas bonne” “le hf 4 sortait d'une phase très mauvaise, et donc il fallait faire en sorte de participer à sa remise à flot au sens process⁽⁶⁸⁴⁾ et production () On ne faisait pas la production programmée tous les jours hein!”⁽⁶⁸⁵⁾.

Mais, le chercheur se souvient aussi de l'importante mobilisation qui a eu lieu pour préparer le haut fourneau avant le démarrage de l'injection de charbon *“C'était quand même le problème industriel du moment et beaucoup de gens y étaient impliqués () j'exagère sans doute un peu en disant toute personne du département, mais c'était un peu ça le principe quand même.”* Tout un ensemble de modifications a alors été mis en place en 1985, tant sur la partie chargement, que sur la qualité des matières enfournées.

⁶⁸² Ibid.

⁶⁸³ En considération des développements importants connus par l'injection de charbon en Allemagne, au Japon, aux Etats Unis, et même au Brésil, une série d'alliances différentes entre l'Irsid, le site de U., le site de D. et le fournisseur en question aurait, dans d'autres circonstances, probablement pu déboucher sur une forme d'externalisation de la technologie plus proche de celle visible chez J. Steel. Tout l'argument de notre travail ici est précisément de montrer que cette dynamique ne correspondait pas à la dynamique innovatrice mise en place. Après la nationalisation en 1982, puis plus encore avec la création du groupe F. steel en 1987, une nouvelle logique s'est progressivement mise en place, ainsi que nous le verrons en conclusion de cette thèse. L'épisode de la pression politique vis à vis des acteurs de D. peut ainsi être lue comme les prémisses d'une nouvelle rationalité en voie d'émergence, mise en place sous l'impulsion de l'Etat français. De ce point de vue, l'article de David et Rothwell (1996) est illustratif d'une certaine vision industrielle propre à l'Etat français.

⁶⁸⁴ “Le process, ce qu'on appelle process, c'est le fonctionnement interne métallique du haut fourneau et tous les moyens pour améliorer ce fonctionnement interne. Donc il y a des retombées technologiques (variables d'action) au niveau du chargement, système de distribution, alimentation matière, mais où les phénomènes qu'on essaie de régler, ou réguler, sont les phénomènes internes au haut fourneau.”ibid.

⁶⁸⁵ Entretien ingénieur Section Technique, site de D. janvier 1996.

Le haut fourneau 4 devant subir une réfection en 1987, il était prévu de n'équiper, dans un premier temps, que la moitié des tuyères, et de limiter l'injection à 80 kg environ, de façon à faciliter la prise en main de l'installation par les utilisateurs. Par ailleurs, nous avons évoqué précédemment l'effort mené sur le hf 2 pour amener l'installation à ses limites.

“Et donc en 1986, au mois de février, on est parti très rapidement sur le hf 4 et sans états d'âme sur le charbon, parce que l'année 1985 avait été remarquable au point de vue injection de charbon” ⁽⁶⁸⁶⁾. Une formation a été prévue aux nouveaux dispositifs de régulation en 1987. Tout devait ensuite être prêt pour la montée rapide en cadence en 1988. Mais la montée en régime a été longue: *“En 88, en gros, il y avait eu beaucoup de changements de fait au moment de la réfection, ça a été presque une année de mise au point d'un certain nombre de choses. Et en 89-90, la marche en avant a repris, et en 90, on a profité d'une..en fait, on était limité par la production de charbon pulvérisé, par les broyeurs.”* ⁽⁶⁸⁷⁾.

De la seconde à la nième: dynamique d'amélioration

La seconde installation a été inscrite dans la continuité de la première. Pourtant, elle fait figure d'exception. Les installations suivantes n'ont pas systématiquement bénéficié de cette dynamique d'amélioration. Dans chaque cas, le contexte de prise de décision a eu une importance considérable. Y compris sur le site de D., il n'a pas été possible de stabiliser réellement les conditions de reproduction de l'objet technique.

La localisation par site étant forte, il est difficile de parler d'une dynamique d'amélioration globale et systématique de l'injection de charbon en France, entre la première installation qui a pris place à D. et la et la dernière installation, qui a pris place à F. ⁽⁶⁸⁸⁾. Les neuf hauts fourneaux équipés étalent une hétérogénéité flagrante. Sur le site de D., la troisième et dernière installation, dont a été gratifiée le hf 3, n'a pas été totalement maîtrisée et est considérée aujourd'hui comme celle ayant le fonctionnement le moins satisfaisant. Difficile pour l'Irsid, dans ces conditions, de promouvoir systématiquement une série d'améliorations: *“Ah ben il y avait autant de systèmes que d'usines. Alors là c'est clair, on a jamais eu d'homogénéité des équipements hein-“* ⁽⁶⁸⁹⁾.

Pourtant, les apprentissages en matière d'utilisation de l'injection réalisés progressivement à D., sur le hf 2 puis sur le hf 4, ont pu bénéficier au site de F., en particulier par l'intermédiaire de l'Irsid: *“F. finalement, on a eu beaucoup moins d'activité, puisqu'en fait quand même il y avait le, ben tout ce qui avait été accumulé comme connaissances a été utilisé là bas..”* ⁽⁶⁹⁰⁾. F. s'est équipé plus tardivement, après avoir mené ses propres études sur le charbon à partir de 1984, pour finalement opter pour le même fournisseur que D. en 1989,

“bien sûr on est allé voir un petit peu partout, bien entendu, on a choisi délibérément, enfin on a quand même, effectivement on s'est quand même extrêmement inspirés de D., ça c'est clair, on a donc décidé dès le

⁶⁸⁶ Entretien chef de projet Pci, siège de F. steel, janvier 1996.

⁶⁸⁷ Entretien ingénieur Section Technique, site de D., janvier 1996.

⁶⁸⁸ Soulignons que, d'une part, au début de l'action F. appartenait pour 50% à U. steel. Ensuite, à partir de 1987, les deux usines ont été réunies au sein de la même entreprise.

⁶⁸⁹ Entretien chef d'équipe de recherche, Irsid, Maizières les Metz, janvier 1996.

⁶⁹⁰ Entretien chef d'équipe de recherche, Irsid, Maizières les Metz, janvier 1996.

départ de faire une injection de charbon pulvérisé, c'est à dire fin, comme ça marchait à l'Armco et comme ça s'est développé à D., donc ça c'était décidé, au point de vue ensuite disons de la technologie, parce qu'une fois qu'on a dit ça disons qu'après c'était la technologie, et il fallait trouver donc un constructeur d'installation capable de..enfin en lequel on ait confiance et qui avait quand même des références, alors comme D. avait développé plusieurs systèmes donc on avait quand même une idée effectivement disons des technologies, en plus effectivement on a également eu des contacts avec Sidmar, Sidmar donc à Gent, qui a développé aussi, donc avant nous et avant F. l'injection de charbon, et on a pris donc comme fournisseur essentiel pour l'injection Paul Wurth qui était le fournisseur de Sidmar, et bon ses hf marchaient bien, sachant qu'il y a aussi une installation à D., et puis par contre pour le broyage on a pris aussi, donc le pulvérisé mais alors là on a gardé le principe de D., c'est à dire des broyeurs à boulets..” (691).

Les modes de généralisation ont été très contrastés entre l'entreprise japonaise en l'entreprise française. La première offre l'image d'une dynamique très organisée, articulée autour d'un pivot central qu'est le PET, chargé d'optimiser et de produire des installations reproduites d'après un modèle commun, et de mettre en relation à long terme les utilisateurs et les producteurs. La seconde offre l'image d'une série d'investissements localisés, fortement influencés par les conditions particulières de la prise de décision. Le monde commun ainsi formé se limite à quelques principes et à quelques spécifications transversales fondées sur le succès des opérations précédentes.

Le résultat le plus significatif de ce mouvement d'optimisation est le dépassement de la capacité nominale sur la quasi-totalité des appareils de broyage et d'injection. En 1990, la capacité de broyage atteignait 137% de l'investissement installé. Le même type de performance a été obtenue sur les tours d'injection (692). L'optimisation n'a donc pas consisté, comme au Japon, à définir un design standard optimal, mais à acquérir les connaissances nécessaires à l'optimisation de la capacité utile des investissements déjà en place. Ainsi, les broyeurs ont été spécifiquement optimisés pour le charbon maigre régulièrement injecté à D. La remontée sur les conditions de production s'est effectuée en étroite relation avec les objectifs d'utilisation: les acteurs n'ont pas eu besoin de reconcevoir l'ensemble de l'outil, mais uniquement les goulets d'étranglements et les points faibles de la chaîne de production.

Un nouveau record mondial est venu saluer les investissements consentis:

“et puis mai 90, boum, 180kg de charbon à la tonne de fonte, 270 kg de gros coke, () F. steel d'or, et on a fait ça, mai, juin, juillet”(693) “donc en 90, voyant que finalement on montait et que ça se passait bien, on a continué à monter, on s'était donné comme objectif au mois de mars de dire, d'emmener ça un fois pour toutes de voir jusqu'où ça peut aller, et le fourneau, jusqu'où il peut marcher, hein. Donc là, on a réalisé, à partir du mois d'avril donc on a monté le charbon progressivement, et on était arrivé à 180 kg de charbon, au mois de juillet 1990, avec des résultats, et là j'insiste lourdement parce que c'est là, je me suis attrapé plusieurs fois avec M. hein, avec des résultats exemplaires, autrement dit, les meilleurs résultats de marche du hf4 de Dunkerque étaient les mois de juillet 1990” (site de D.)

⁶⁹¹ Ancien chef de Département Fonte de F., site de D., F.steel, janvier 1996.

⁶⁹² Ce mouvement d'optimisation a continué. Un chercheur de l'Irsid estimait en 1996 que la capacité effective atteignait environ 170% du nominal. Ce chiffre est à prendre avec prudence. Une amélioration de l'ordre de 50% est sans doute plus proche de la réalité.

⁶⁹³ Entretien ingénieur section technique, site de D., janvier 1996.

Pour le responsable des hauts fourneaux, une nouvelle étape était franchie, et de nouvelles perspectives s'ouvraient:

“Mais là dedans, dans cette période là, on a quand même eu des semaines où euh le, la quantité de gros coke est descendu à 270 kg, 260 kg même donc ça a été un deuxième point, un point capital pour moi, c'est qu'à partir du mois de juillet 1990, il était clair que l'étape 130 kg-140 kg elle était loin derrière nous, 180 kg ça pouvait marcher très bien, le hf marchait très bien, et surtout qu'avec moins de 300 kg de coke - et même voir 270, 260 kg mais c'est des semaines où on voyait que le Fx se détraquait pas, hein- Donc en dessous de 300 kg alors que on nous disait "le fx, il va plus aller parce que s'il a plus assez de coke, il va plus marcher, il va plus être perméable etc..". Ca continue à marcher parfaitement Et donc à partir de ce moment là, j'ai passé mon temps à prêcher "mais pourquoi pas 250 kg un jour sur les hf?" avec les étapes intermédiaires bien sûr. Et c'est là où on est rentré dans une période où on a bâti des projets autour de ça, à partir de 91. 91 les gens doutaient encore un peu, en partie coté direction technique F. steel, donc ils disaient "vous avez fait ça une fois, vous n'êtes pas capable de" "on est capable, c'est plus que le raisonnable au point de vue technologique si vous voulez". C'est un coup à me faire mettre dehors si je m'étais planté parce qu'on avait une quantité de charbon limitée, hein, le mettre à toute force sur un hf, alors qu'on aurait pu le répartir plus industriellement, c'est plus favorable de prendre moins de risque, et de répartir sur 3hf que de pousser sur un et d'essayer d'aller très loin. Alors on a quand même recommencé, on a fait des marches à 185, même un mois on a fait 195 kg en 91, pour montrer qu'au fond, on savait le refaire quand même, on savait faire ces choses là, mais que manifestement c'était difficile de, il fallait mettre tous nos atouts dans notre jeu, et que {tape des bras sur la table}ça pouvait pas être industriel sur le hf4, on pouvait pas marcher comme ça pendant un an ou deux ans ou trois ans”(ibid)

2.2) Formes d'engagement à long terme et construction des acteurs

Avant d'entrer dans le détail des opérations de stabilisation des conditions de production et d'utilisation de l'objet technique, nous souhaitons évoquer rapidement la question des engagements ayant formé le support des apprentissages réalisés.

2.2a) Inscrire le changement dans la durée: le rôle de la flexibilité dans l'organisation japonaise

La flexibilité organisationnelle japonaise a été, tout bien considéré, limité à une période de temps relativement étroite, correspondant à la création technologique. Très rapidement ensuite, les acteurs ont organisé la 'routinisation', mis en place les conditions de reproduction optimisées, fait basculé l'innovation dans une logique de production.

L'hybridation des savoirs mobilisés pour établir les bases de l'optimisation de la première et de la seconde installation a été marquée par une forte capacité de mobilisation et de coopération. Une fois les bases cognitives de l'optimisation de la technologie pci assurées, une fois les rôles délimités et l'asymétrie de compétence créée, les savoirs ont commencé à s'accumuler en parallèle chez les utilisateurs, au PET, et dans le laboratoire central de recherche de manière relativement indépendante, selon une logique de standardisation.

Ainsi, pour ce qui concerne les savoirs technologiques, après la période d'optimisation mentionnée, le PET est entré dans une logique productive-reproductive où la routinisation a pris le

dessus, et où les 'seniors' ont cédé la place aux 'juniors'. Le cas pci montre les limites d'une telle dynamique, dont l'efficacité dépend de la stabilité des conditions d'usage et de production des objets techniques. Il ne s'agit pas pour nous de défendre l'idée que l'entreprise japonaise est cloisonnée, mais de montrer que, dans le cas qui nous intéresse, du fait de la standardisation rapide de la technologie, et de la clôture tout aussi rapide de la dynamique d'apprentissage sur une série de certitudes s'est traduite par une capacité de réaction amoindrie. J. steel a vécu une inscription rapide de l'innovation dans les réseaux productifs existants. A partir de là, les changements pouvant intervenir ont été considérablement limités, du fait des exigences liées à la mise en commun: l'irréversibilité créée a été particulièrement forte.

La dynamique d'apprentissage collectif s'est donc largement organisée autour du PET et de l'optimisation du modèle d'installation dont celui-ci était dépositaire. La standardisation et la centralisation du design ont permis la mise en place d'une base de connaissances commune, évoluant incrémentalement au rythme d'expérimentations locales menées ici et là. Dans le cas de J. steel cependant, on ne saurait exagérer le rôle de ces expérimentations locales, tout compte fait peu nombreuses, et largement contrebalancées par l'irréversibilisation liée à la capitalisation.

Les équipements installés ont été utilisés comme la base essentielle de la dynamique d'apprentissage et de coopération instaurée entre acteurs, une forme de 'network internality' ⁽⁶⁹⁴⁾ renforçant les liens transversaux d'homologie. Cette référence commune a grandement facilité la circulation horizontale des personnes et des objets, conférant aux compétences et aux investissements locaux une validité générale. La fonction de production modèle a formé le cadre collectif de l'action, créant une proximité technico-économique entre les sites et entre des acteurs 'identiques'. L'abolissement de la distance socio-technique entre les acteurs a rendu possible l'action à distance, une forme de coopération par 'objet interposé'. La simple mise en circulation de données, ou de recettes suffit à donner un sens commun.

Dans cet univers d'uniformité construite, les acteurs ont volontiers laissé dériver un paramètre ci ou là. Une certaine différenciation a toujours été de mise, comme l'indique le cas des broyeurs. En 1987, alors que 80 % des broyeurs installés depuis 84 étaient de marque TD, le site de H. a installé un petit broyeur K. Après 1990, tous les broyeurs installés étaient de marque K. Selon l'expression de l'un de nos interlocuteurs, le broyeur a été 'qualifié': toutes choses égales par ailleurs, le site de H. a fourni un apprentissage local à validité général sur les performances de cet outil. Les qualités attribués

⁶⁹⁴ Le network internality peut être illustré par l'avantage que trouve le membre d'une organisation ou d'un club à opter pour le même standard informatique que les autres.

au broyeur sur le site de H. ont acquis une validité générale sur l'ensemble des sites équipés de la même fonction de production. Le site de M. a été le seul à ne pas installer pci pendant les années 80. Le site de O. a été le seul à ne pas installer le nouveau système de chargement 'bell less' de Paul Würth. Ces expériences locales, 'nichées' à la marge du cœur productif de l'entreprise (Foray et Grübler 1991), peuvent ensuite se trouver à l'origine de nouvelles vagues de généralisation. Les objets qualifiés en un point du réseau, acquièrent une validité en tout point du réseau. Les sites disposent d'un outil d'équivalence, une commune mesure technologique, rendant possible les comparaisons et les mises en commun. En ce sens, le cas de J. steel constitue une illustration paradigmatique du fonctionnement des investissements de forme (1985), une fois développé, par la généralisation - standardisation, le cadre commun qui les rend possibles.

L'établissement de cette base technologique commune a donc facilité l'accumulation et la circulation d'objets intermédiaires et de compétences communes entre les sites. A titre analytique, il est utile, pour comprendre la dynamique cumulative mise en place, d'analyser un certain nombre d'objets et de personnes ayant circulé entre les sites dans ce cadre collectif.

L'élément sans doute le plus original du dispositif mis en place à J. steel, est la circulation d'un site à l'autre des ingénieurs du PET associés aux outils patiemment accumulés et mis au point - la boîte-à-outil-à-produire-des-installations-pci-optimisées.

Ces hommes du 'déplacement horizontal' - selon l'expression d'un exploitant- ont été qualifiés par le déplacement transversal de l'installation du site d'Ashland au site de O., puis du site de O. au site de N. Les savoirs accumulés par les ingénieurs du PET sont donc en grande partie composés de connaissances sur les formes et leurs optimisations ⁽⁶⁹⁵⁾. Ce type de savoir est d'essence comparative, descriptive et s'acquiert par la comparaison des différences et des ressemblances. En particulier, la comparaison des trois premiers sites a favorisé l'extraction des principes de base, des unités de mesures - stables - et des éléments contextuels -variables. Même si le rythme de l'apprentissage a été sévère en début de période, poussant à une rapide routinisation, ce type de compétence s'affine typiquement avec le temps et la diversité des situations rencontrées. Une expertise a donc été acquise sur les principes communs de l'installation modèle, en même temps qu'une manière de voir, un sens visuel affiné, permettant à l'expert de visualiser une installation qui n'existe pas encore et de discriminer rapidement, à l'occasion d'une simple visite, les éléments pertinents de son contexte d'implantation: l'expert a appris aussi bien à négliger certains éléments qui 'sauteraient aux yeux' du profane, qu'à faire sortir de l'indistinction les éléments qui joueront un rôle significatif sur le layout, les réglages de pression ou de séchage... (Collins 1985).

⁶⁹⁵ Nous utilisons le terme de forme ici, en le distinguant d'une approche plus abstraite, de principe, non fondée sur la visualisation, virtuelle -sous forme de plans - ou réelle -sous forme d'installation existante.

Ainsi que nous l'avons déjà noté, les logiciels forment le complément indispensable de cette expertise. Ils incarnent à la fois les règles communes auxquelles sont mesurées l'ensemble des installations et les éléments variables de ces règles (variable d'action, paramètres). Ces outils objectives la commune mesure appliquée à l'ensemble des sites, et représentent une logique reproductible. Ils détachent la mesure de la variabilité individuelle. Les sites circulent dans les fichiers informatiques et y sont formatés.

Il nous semble important de noter que la logique d'amélioration ne s'est pas réduite à ce projet. Le projet considéré a fait parti d'un mouvement plus général d'amélioration' (Kaizen) des différents éléments composant la technologie PCI formant le terreau de l'identité professionnelle des ingénieurs du PET. Un bon exemple est donné par l'objectif d'équirépartition. Les acteurs du PET ont continuellement cherché à améliorer leurs performances en la matière.

“Au moment de l'introduction de PCI, c'était plus ou moins 20% (de taux de marge d'erreur). Actuellement, on arrive à baisser jusqu'à plus ou moins 3% () Bien sûr, le distributeur joue un rôle important, comme je vous l'ai dit tout à l'heure. Mais ce know how de layout des tuyaux est aussi, sinon plus important pour atteindre une telle précision de l'équirépartition. C'est un savoir-faire que l'on a acquis nous (PET) dans le temps. Nous faisons chaque fois un calcul d'optimisation avec l'ordinateur, compte tenu de l'espace utilisable... La valeur de 5% représente l'objectif minimal. A chaque installation nouvelle, () on essaie d'aller au-delà” (696).

Le travail du PET n'est pas tant de parachuter un équipement que d'engager un mouvement continue d'amélioration, de mise en relation des utilisateurs, de transfert des connaissances et de circulation des objets d'un site à l'autre. Ainsi, nous avons évoqué les difficultés rencontrées par les exploitants de O. avec les détritrus. Ils s'en sont sortis à l'aide d'un bricolage local. Le rôle du PET était alors *“de faire connaître l'existence de ce genre d'outil et de l'améliorer si possible” (697)*. L'outil a ainsi été progressivement automatisé. *“A K., la quatrième installation, il n'y avait plus d'opérateur, c'était complètement automatique, toute la régulation se trouvait centralisée en salle de contrôle”*. Les producteurs et les utilisateurs partagent un même sentiment d'amélioration progressive de l'installation accompagné par le PET: *“Si on prend une échelle, par rapport à maintenant, le 1er équipement c'est peut être 50% de performance; entre le site de O et de N. 25 % d'amélioration efficacité, fiabilité; (à) T.(le troisième site), 90% du degré d'achèvement a été atteint” (698)*.

Le PET et ses ingénieurs incarnent cette logique d'amélioration du point de vue de l'espace de qualification de l'entreprise J. Un exploitant définissait ainsi le rôle du PET comme *“acteur de déplacement horizontal des connaissances” (699)*. Cela n'est possible que par l'animation d'un réseau tissé de relations à long terme. C'est sans doute pourquoi chaque site à son équipe d'experts au PET. *L'espace de qualification*, et en particulier l'existence d'ingénieurs centraux de conception et

⁶⁹⁶ Entretien ingénieur du PET, J. steel, Futtsu, Japon, octobre 1995.

⁶⁹⁷ Entretien exploitant, O., J. Steel, Japon, septembre 1996.

⁶⁹⁸ Entretien exploitant, O., J. Steel, Japon, septembre 1996.

⁶⁹⁹ Entretien exploitant, O., J. Steel, Japon, septembre 1996.

d'ingénierie au cœur de l'entreprise J., constitue un élément déterminant de l'inscription du changement et de l'apprentissage technologique dans la durée. Nous avons déjà noté le renversement de perspective intervenu entre la logique d'innovation et la logique d'organisation au moment de la première installation. Tout se passe alors comme si, le changement devenait le support de l'organisation plutôt que l'inverse (Aoki 1988, Thévenot 1996). Cette perspective, selon laquelle l'innovation devient une opportunité de formation et d'apprentissage est clairement rendue par les réflexions que nous a livré un ingénieur du PET :

“L'équipement de PCI est très compact, simple... mais elle contient pas mal de techniques différentes, le génie civil, la mécanique, l'électricité, l'instrumentation, les systèmes de contrôle (et de régulation) etc. Elle est emplie, en particulier, de techniques de contrôle (et de régulation) diverses. Donc on apprend beaucoup, en prenant en charge cette installation. Lorsque les jeunes ou les ingénieurs inexpérimentés arrivent au PET, on (s'efforce) de les faire travailler sur ces équipements, en formant, bien entendu, un binôme avec un ingénieur expérimenté” ⁽⁷⁰⁰⁾.

2.2b) Externalisation du changement et formation de spécialistes en France

La rencontre de la logique d'innovation et d'organisation s'est soldée en France par la mise sur pied d'un projet ad hoc, et la création d'un acteur, le *chef de projet PCI*. Par la 'force des choses', le chef de projet est devenu une sorte de “*M. charbon*”, ainsi que n'ont pas manqué de lui rappeler ses collègues hauts fourneaux dans leurs échanges sur l'opportunité d'augmenter l'injection de charbon. L'objectivation des savoirs acquis est donc demeurée extrêmement faible. Sauf à faire circuler le chef de projet sur l'ensemble des sites considérant l'installation d'un équipement d'injection de charbon, la base sur laquelle les connaissances pouvaient circuler d'un site à l'autre a donc été extrêmement fine.

L'organisation de la carrière du chef de projet entre son arrivée à la Section technique haut fourneau du site de D. en 1979, et son rôle actuel de conseiller auprès de la direction technique du siège, est donc digne d'intérêt. La responsabilité de la section technique, prise en 1979, avait des allures de mission impossible “*la section technique, on (prenait) tous les gens dont on voulait pas ailleurs quoi*”. En juin 1984, le chef de projet PCI s'est vu confier la responsabilité de l'exploitation des hauts fourneaux “*avec comme objectif non pas la fabrication, mais fabrication-entretien, faire une nouvelle unité hf*”. Nous avons évoqué les conditions dans lesquelles cette promotion lui a été offerte. Fin 1987, après la mise en place réussie d'une nouvelle installation sur le gros haut fourneau de D., cet ingénieur s'est vu proposé une nouvelle promotion au poste de chef du Département Fonte de l'usine de D. “*qui comprenait à l'époque les hf, l'agflo, les quais etc () l'approvisionnement des bateaux, des minerais, aussi bien que la cokerie, la préparation des matières*”.

Les succès connus dans la mise en place d'innovations importantes ont été salués par la progression hiérarchique, mobilité ascendante dans des postes de management aux responsabilités

⁷⁰⁰ Entretien, ingénieur du PET, Futtsu, Japon, février 1996.

toujours plus importantes (⁷⁰¹). Pour ce personnage d'une soixantaine d'années, l'identification avec le développement de l'injection de charbon est claire: "*J'ai passé mon temps à prêcher 'mais pourquoi pas 250 kg un jour sur les hauts fourneaux?' (...) J'espère, j'espère voir 250 avant de mourir*". On peut noter le divorce existant entre les récompenses formelles attribuées par l'espace de qualification, et l'expertise technique construite autour de l'injection de charbon. Le chef de projet n'a pas été utilisé comme un expert 'pci' circulant d'un site à l'autre pour 'déplacer horizontalement les connaissances'. Tout se passe comme si seule sa capacité à prendre la responsabilité d'un projet risqué et à le mener à son terme avait été reconnue, indépendamment du contenu de l'apprentissage (Maurice et Alii 1982, Lanciano et Alii 1992).

Faut-il pour autant en déduire que l'expérience acquise n'a été d'aucune utilité à l'usine de D. en particulier et à F. steel en général? Il est certain qu'une bonne partie des changements technologiques intervenus entre les sites, et entre la première et la dernière installation, doivent beaucoup à l'externalisation de l'apprentissage chez les fournisseurs de technologie. Il n'existe pas de PET et de PMD chez F. Steel. Pourtant, informellement, la mobilité hiérarchique de "M. charbon" a servi le développement de cette technologie et de son utilisation à D., et plus récemment, chez F. Steel, avec la mise en place d'un 'projet de branche' 'injection de charbon'. Fort de ses responsabilités, l'ancien chef de projet a pu constituer une série de ressources à long terme, particulièrement sous forme de know how de conduite et d'utilisation optimale des installations d'injection de charbon (⁷⁰²). Responsable d'équipes de plus en plus large, il s'est progressivement trouvé en mesure de partager ses 'convictions' et ses ambitions en matière d'injection de charbon. PCI est progressivement devenu un projet fédérateur pour l'ensemble de l'usine à fonte de D.: "*Le projet 250 kg était un projet extrêmement fédérateur parce que du coup les gens savaient tous où on allait, du plus petit au plus grand, et puis résultat des courses, c'est que chaque fois qu'ils pouvaient monter l'injection de charbon parce que le fourneau l'acceptait, parce que l'installation le pouvait etc, ils le faisaient*"(⁷⁰³). Il s'est progressivement trouvé mieux placé pour négocier des conditions d'investissement prenant mieux en compte le caractère exploratoire de l'installation.

Pci a largement contribué à transformer le Département Fonte de l'usine. Nous avons noté que le Département avait subi, au moment de la première installation d'injection, une série de changements

⁷⁰¹ En France, l'importance du poste est à mettre en relation avec le diplôme comme l'ont bien montré Maurice et Alii (1982). D'après notre enquête, les postes de direction au niveau des usines et du siège de F. steel sont réservés aux détenteurs d'un 'diplôme' de l'une des 'grandes' écoles d'ingénieurs, en particulier l'école centrale et l'école polytechnique. Notre acteur est ingénieur de l'école des Mines de Nancy.

⁷⁰² Etant donné la forme de l'espace d'innovation, les acteurs de D. n'auraient de toute manière pas été en mesure de construire une technologie de façon autonome. Ce pendant, dans le cas de PCI, les 'technologues' considèrent que l'équipement en lui-même est relativement simple. Ainsi, pour l'expert de Pci au PET "cet équipement pci est composé de divers appareils, mais chaque appareil est assez simple. Un plan suffit à le construire. Le véritable know how résidait dans la conduite de cet équipement... la façon de faire sécher le charbon pulvérisé.. comment réagir face à des explosions..". De façon assez intéressante, les acteurs de D. ont progressivement élaborer des know how de réglage et de conduite, des normes de fonctionnement en sécurité, refaisant ainsi le chemin qu'avait suivi les ingénieurs d'Armco quelques 20 ans auparavant.

pour être adapté à la technologie. Parallèlement, le Département a commencé à accueillir un certain nombre d'ingénieurs formés à l'Irsid. Par le biais de ces mobilités géographiques, un pool d'ancien de l'Irsid s'est progressivement formé autour des hauts fourneaux de D., en particulier dans la nouvelle section technique. Ces mobilités d'outils et de personnes ont contribué à développer une capacité technologique importante sur le fonctionnement interne du haut fourneau, de même qu'une capacité accrue d'étude interne et de relation avec l'Irsid. A travers le projet charbon et son développement dans les années 1980, une véritable équipe a été constituée autour de l'ancien chef de projet pci, devenu en 1987, le chef du Département Fonte. PCI et peut être plus encore la volonté affichée d'explorer les limites de la nouvelle fonction de production ont progressivement contribué à mobiliser des capacités de recherche et d'études importantes, lesquelles ont contribué à profondément modifier le Département, le haut fourneau, les compétences à D. et ses relations avec l'Irsid et les autres sites français. Il est cependant à noter une forte hétérogénéité de pratique et d'attention sur le site de D., le hf 4 ayant constitué le principal objet de coopération entre les acteurs.

Si les hommes du PET sont des acteurs de la translation horizontale, les hommes de l'Irsid sont des acteurs du 'déplacement vertical'. Les savoirs accumulés par les chercheurs de l'Irsid sont donc en grande partie composés de connaissances sur les principes, sur la décomposition de problèmes en question sur les phénomènes, sur la traduction des questions industrielles en problème scientifique. Ce type de savoir est d'essence analytique, explicative et s'acquiert par l'élaboration de phénomènes et de lois de comportement indépendantes des conditions singulières d'application. Le déplacement vertical, l'inscription des problèmes du monde industriel vers le monde de la science a favorisé le dégagement de ce type de principes et de lois dégagées du contexte local de D. Plus qu'une capacité à voir, les chercheurs ayant travaillé sur pci ont acquis une capacité à comprendre, à analyser, à se distancier, à décomposer les phénomènes intervenants sur les sites au-delà de leur forme. Ce rapport au réel est décrit par un chercheur:

“Quels que soient les modèles, quels que soient les pilotes..il faut voir après dans la réalité. La réalité, c'est l'association de plusieurs phénomènes, c'est la combustion, mais aussi la gazéification dans le hf. Donc ça, on ne peut pas l'assimiler d'une façon simple pour le hf - soit la tentative japonaise de faire des petits fourneaux expérimentaux, pour essayer de voir ce qui se passe à l'intérieur, soit la tentative qu'on fait nous de voir sur nos hf avec des outils de mesure, et d'inspection et de réflexion, de la matière grise, d'essayer d'expertiser la relation entre ce qu'on voit et ce qui se...ce qui pourrait se passer”.

Dans le processus, une série de logiciels ont été mis au point. Ces logiciels ne sont pas prescriptifs, au sens où ils ne formatent pas le design idéal d'un organe de l'objet technique. Ils ne sont pas inscrits dans l'action sur les choses. Ils n'appartiennent pas à l'univers productif. Ils sont des outils destinés aux acteurs, facilitant l'établissement d'une représentation collective durable et transversale des phénomènes. Les logiciels comme le code Melodif sont donc des outils d'investigation et de compréhension, supportant le travail d'élaboration des phénomènes par les chercheurs en leur permettant de simuler une multitude de conditions imaginées. Melodif ne formate pas le site de D ou les autres et en ce sens certains

⁷⁰³ Entretien, ingénieur section technique, site de D., F. steel, janvier 1996.

exploitants peuvent le qualifier d'inutile: *“Vu des chercheurs, la limite c'est le haut fourneau. Ici c'est l'équipement. C'est ce que j'ai dit à une réunion: 'qu'est ce qui empêche 250kg? -j'ai dit - il faut que le charbon arrive aux tuyères!’*”⁽⁷⁰⁴⁾. Les évolutions récentes du site de D. tendent à montrer que cette inutilité perçue n'est pas absolue, mais dépend de la mise en place d'un environnement métrologique et humain capable de mobiliser et d'utiliser ces outils.

La logique transversale au sein de F. steel est incarnée par L'Irsid, le centre de R&D de la sidérurgie française. La particularité de ce centre, forgé dans la mouvance de la fédération de la sidérurgie regroupant les groupes industriels français du secteur est d'avoir longtemps bénéficié d'une forte autonomie lié à son statut collectif. Un chercheur de l'Irsid nous confiait ainsi qu'il envisageait précisément son travail comme le dégagement de principes et de règles valables pour l'ensemble des sites français *“les installations ont plus de points communs qu'il n'y paraît”*⁽⁷⁰⁵⁾. Historiquement, des chercheurs de l'Irsid ont ainsi été présent lors des essais de U. aussi bien que lors de la mise en place de l'injection à D.

“Donc après - c'est essentiellement quelque chose (une initiative) qui est industriel (-)extrapoler, passer à l'étape suivante. La recherche, elle est intervenue pour appuyer, documenter, mesurer, suivre le process du hf. Donc l'Irsid était dans sa fonction première, au tout début. Chaque fois qu'il se passait quelque chose, le hf avait son thermomètre -si j'ose dire, pour prendre une image médicale- pour ausculter le hf, décrire ce qui s'y passait, proposer des interprétations, qui débouchaient sur des réactions de certains. Après on s'est préoccupé; par la suite, de décomposer ça en problème scientifique de labo..”⁽⁷⁰⁶⁾. A partir du moment où l'injection de charbon concernait plusieurs usines et plusieurs haut fourneaux, l'un des rôles de l'Irsid a consisté à chercher à comprendre le fonctionnement de l'injection de charbon et ses limites. *“pendant cette période, on a suivi. On a suivi. Bon et puis maintenant, on sait très bien que 145 kg ça se fait sans aucun problème. Donc qu'est ce qui s'est passé derrière, on a suivi mais en disant attention, et là on est rentré dans une des missions, ce qui est un des rôles de l'Irsid, en disant, qu'est ce qu'on peut faire pour comprendre, savoir ce qui se passe, comment ça marche, pourquoi ça marche et pourquoi ça marche pas”*⁽⁷⁰⁷⁾.

L'espace de qualification de part son indexation sur le rapport fixé entre un poste et une qualification ne favorise pas l'innovation, et tend à rendre difficile l'intégration du changement dans l'organisation, négligeant en particulier le contenu des apprentissages réalisés (Maurice et Alii 1982, Lanciano et Alii 1992). La création d'un 'chef de projet', spécialisé dans un type de savoir en émergence, constitue une réponse organisationnelle temporaire à cette rigidité, en rupture avec l'organisation productive. Lorsque la responsabilité assumée est élevée, la mobilité ascendante qui récompense l'individu constitue une manière d'intégrer le changement à plus long terme, au moins sur un plan local. Sur un plan plus global, facilitant le transfert latéral des connaissances, l'Irsid assume une fonction fondamentale. L'existence de chercheurs centraux au cœur de l'entreprise F., leur implication étroite dans le suivi et la qualification des phénomènes à l'œuvre sur les sites, marque l'importance de la remontée en généralité dans la formation d'une connaissance commune à long terme.

⁷⁰⁴ Ingénieur section Technique, site de D., janvier 1996.

⁷⁰⁵ Entretien chercheur, Irsid, F. Steel, Maizières les Metz, janvier 1996.

⁷⁰⁶ Entretien ancien responsable division fonte-énergie, siège de F. steel, Paris, janvier 1996.

2.3) Articulation théorie- objets techniques et coordination : logiques d'investissement

a) Trajectoire d'investissement chez J. Steel (1984-1990)

Au sein de l'entreprise J. Steel, 12 hauts fourneaux ont été équipés (tour et broyeur) entre 1984 et 1990, au cours de 11 décisions d'investissement. Parmi ceux-ci, 4 ont été arrêtés (⁷⁰⁸). Nous avons pu obtenir des données détaillées des dimensionnements, des fournisseurs (broyeurs), des dates de mise en service pour 10 d'entre eux (⁷⁰⁹). Cela nous permet donc d'analyser le *rythme* d'investissement, la répartition (ou *dispersion*), la diversité (ou *hétérogénéité*) des objets techniques retenus, l'*optimalité* des capacités retenues.

Le *rythme* des installations a été remarquablement régulier sur la période considérée. A partir d'un simple calcul du délai écoulé entre chaque mise en service (84-90), nous avons mis en évidence une périodicité moyenne de mise en service de 9 mois (8,875). En décomposant le mouvement en deux périodes, l'analyse s'affine. Il apparaît alors que l'investissement s'est décomposé en deux mouvements, une première période d'investissement très rapide, et très régulière (⁷¹⁰), avec une périodicité moyenne légèrement inférieure à 6 mois (5,75), suivie d'une seconde période d'investissements plus espacés dans le temps, en fin de période, avec un délai moyen d'une année entre chaque installation. Deux interprétations viennent à l'esprit concernant cette périodisation. Premièrement, celle-ci peut être liée à l'arrivée d'une crise importante ayant touché la sidérurgie japonaise en 87-88. Deuxièmement, on peut faire l'hypothèse que les sites les sites ayant reçus un premier équipement ont été moins désireux d'obtenir rapidement une seconde installation, du fait du déséquilibre provoquée dans leur balance énergétique. Ce point est confirmé par l'analyse de la dispersion.

Un deuxième fait remarquable tient à la *dispersion* géographique des investissements sur l'ensemble des sites et des hauts fourneaux. Les six premiers investissements qui ont suivi la première installation (1984-88) ont tous été réalisés sur des sites différents, à l'exception d'un seul.

⁷⁰⁷ Entretien chef d'équipe de recherche, Irsid, F. Steel, Maizières les Metz, janvier 1996.

⁷⁰⁸ La crise de surproduction a commencé à toucher sévèrement J. Steel à la fin des années 80. Pour les deux usines arrêtées dont nous avons pu suivre la trace, l'équipement a été réutilisé sur un autre haut fourneau du même site, et dans le second cas, le broyeur a été transféré à une autre usine.

⁷⁰⁹ Pour des raisons de confidentialité, nous ne publions pas ces données, aimablement communiquées par les entreprises, mais seulement les résultats agrégés de leur analyse.

⁷¹⁰ L'écart type global est de 5,4, alors que l'écart type sur la première période (84-87) est de seulement 2,2.

L'investissement a donc été mis en œuvre horizontalement, de manière à démarrer l'injection de charbon 'de front' sur l'ensemble des sites de l'entreprise.

En ce qui concerne la conception des installations, comme le soulignait un ingénieur du PET, ils ont obéi aux mêmes principes de base, "*les principes de base n'ont pas changé*": l'homogénéité des installations est particulièrement forte. L'entreprise injectait une moyenne de 66kg de charbon par tonne de fonte en 1990, alors que tous ses hauts fourneaux étaient équipés, à l'exception de celui de M., déjà évoqué. Cette moyenne rappelle les objectifs visés par la première installation. Il nous semble cependant utile d'analyser d'un peu plus près le détail des choix d'équipements réalisés. Toutes les tours d'injections ont été conçues selon des principes identiques, dont le PET était dépositaire. Mais, pour ce qui concerne les broyeurs, J. steel s'est trouvée dans une situation comparable à celle de l'entreprise française puisque ceux-ci devaient être acquis auprès d'un fournisseur extérieur. L'analyse de la séquence d'investissement en capacité de broyage présente donc un intérêt à la fois analytique et comparatif ⁽⁷¹¹⁾.

Le tableau 1 retrace la séquence d'investissement en capacité de broyage à J. Steel

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Site 1 hf 1	IH											
Site 1 hf 2				TD						R		
Site 2 hf 1			TD									
Site 2 hf 3				TD							R	
Site 3 hf 2									TD			
Site 3 hf 3					TD							
Site 3 hf 4								TD				
Site 4 hf 1				UB								
Site 4 hf4												
Site 5 hf4						R						

Source: d'après données J.steel. Chaque type de broyeur est représenté par un groupe de lettre différent, en fonction de son fournisseur.

La simple expression graphique de la séquence d'investissement met en valeur une période de mise au point relativement longue entre la première réalisation commerciale et la généralisation des investissements. Nous avons largement détaillé les événements intervenus au cours de cette étape cruciale. Deuxièmement, y compris dans le cas des broyeurs, d'origine externe, le constat d'une logique coordinatrice cohérente dans l'espace et le temps est patent. Le résultat s'exprime à travers une forte homogénéité des investissements, allié à une stratégie marginale de diversification, exploration périphérique (les sites considérés comme les plus stratégiques pour l'entreprise sont les sites 1, 2 et 3) mais continue. Les principaux paramètres et principes ont donc été fixés très rapidement, entre la première et la seconde installation, autorisant ensuite la mise en place de calculs d'optimisation relativement précis dans la répartition des investissements - la question technologique étant réglée, restaient les questions relatives à l'optimisation de la séquence dans le temps et l'espace - . Un élément de flexibilité complète cette logique de standardisation forte par l'introduction, à la

⁷¹¹ L'analyse des investissements en capacité de broyage constitue une approximation raisonnable du comportement des entreprises dans la mesure où le broyage représente environ 70% du coût total d'une installation. Cela ne signifie pas que

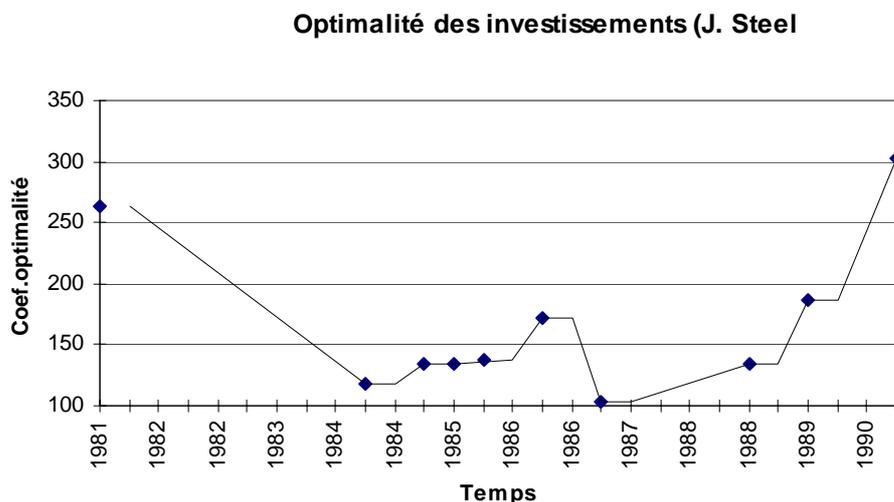
marge, de changements, qui, une fois testés, et qualifiés dans l'entreprise peuvent, éventuellement, devenir à leur tour le standard de référence (cas du broyeur R, introduit d'abord sur le site 5, puis généralisé, après quatre années de qualification ⁷¹²).

En ce qui concerne enfin l'*optimalité* des investissements réalisés, celle-ci a également été forte. Dès la seconde installation, la surcapacité, (estimée à environ 100% dans le cas de la première installation ⁷¹³), a disparu (⁷¹⁴). Le tableau 2 propose une estimation de l'optimalité des investissements réalisés (⁷¹⁵).

Tableau 2: Coefficient d'optimalité pour la séquence d'investissement de J. Steel

	1981	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990		
Optimalité	262,859	118,0068	133,7278	134,0673	137,5327	172,1633	103,7393	133,7278	186,7233	303,1811

Graph 1: Tendance à l'optimalité des investissements (J. Steel)



Source: d'après données J.steel.

Le tableau 2 et le graphique 1 indiquent que le coefficient d'optimalité s'est situé dans une fourchette comprise entre 100 et 140 entre 1984 et 1988 (à l'exception d'un point). Cette tendance stable montre à la fois la progression très rapide entre la première et la seconde installation, l'application systématiques de principes de

nous nous désintéresseront de la question des tours d'injection, lesquels illustrent remarquablement les différentes stratégies de valorisation des savoirs.

⁷¹² La généralisation de R. est évidente si l'on considère les investissements intervenus à partir de 1991. Sur huit ateliers de broyage construit après cette date, huit ont été du type R. Nous y reviendrons dans le chapitre de conclusion, qui traitera des années 90.

⁷¹³ Notre calcul repose sur les hypothèses suivantes: taux de remplacement 1; taux d'injection 65kg/t. Ce calcul s'appuie sur la capacité théorique de l'installation d'injection et la capacité théorique du haut fourneau. Un calcul rapide réalisé à partir de la production de fonte réelle réalisée (taux d'utilisation du hf estimée à 75%) dans la première année d'injection donne une surcapacité encore plus importante, de l'ordre de 150%.

⁷¹⁴ Si l'on reprend les mêmes paramètres, en matière de taux d'utilisation, de taux d'injection, de mise au mille totale d'énergie, la 'surcapacité' chute à 18%. On peut considérer que 18% constitue plutôt une marge de manoeuvre en cas d'amélioration de la conjoncture, puisque cette capacité permettrait de couvrir un taux d'utilisation du haut fourneau de l'ordre de 90%.

bases identiques entre 1984 et 1988, puis un changement rapide de tendance à la fin de la période. Etant donné les hypothèses fortes posées en matière d'homogénéité, la régularité de la relation entre capacité installée et capacité du haut fourneau est remarquable. La moyenne de l'optimalité de l'ensemble des investissements entre 1984 et 1988 se situe à 133 (133,28), soit une surcapacité globale de l'ordre de 33%, pouvant être interprété comme une marge de manœuvre, liée à l'anticipation de fluctuations conjoncturelles.

En ce qui concerne le rapide changement de tendance intervenu en fin de période (⁷¹⁶), il ne s'agit pas d'y lire un éloignement soudain de l'optimisation des investissements, mais un changement radical de politique en matière de niveau d'injection visé. Ce point trouvera une large confirmation au chapitre conclusif de cette thèse.

La fonction de production globale constituée par J. steel à travers sa séquence d'investissement ressemble donc étroitement à la *généralisation* de la fonction de production de la seconde installation. Les principaux arbitrages et objectifs (65-80 kg/tonne de fonte) ont été appliqués systématiquement et accommodés en fonction de la spécificité de chaque haut fourneau. Le design a été standardisé rapidement et raffiné progressivement de façon incrémentale. La fonction de production construite peut donc être comprise comme la généralisation d'un ensemble comprenant le haut fourneau type et une installation d'injection de charbon modèle, fiable et mesurée, permettant d'obtenir des marches bien maîtrisées du haut fourneau, une amélioration de la productivité, de la stabilité, de la qualité de la fonte produite.

b) Pools d'investissements chez F. steel

Au sein de l'entreprise F. Steel, 9 hauts fourneaux ont été équipés (9 tours et seulement 8 broyeurs) entre 1983 et 1990, au cours de 9 décisions d'investissement. Parmi ceux-ci, 2 ont été arrêtés (⁷¹⁷). Comme dans le cas de J. Steel, nous avons analysé les données relatives aux dimensionnements, aux fournisseurs (broyeurs et tours), aux dates de mise en service de l'ensemble de ces hauts fourneaux. Nous en avons tiré des résultats concernant le *rythme*, la *dispersion*, l'*hétérogénéité*, l'*optimalité* des investissements mis en place.

Le *rythme* des installations a été relativement plus irrégulier sur la période considérée, que celui observée chez J. Steel (⁷¹⁸). A partir du calcul des délais écoulés entre les mises en service (83-90), la périodicité moyenne de mise en service des installations est sensiblement la même que chez J. steel, c'est à dire 9 mois (9,125). Comme dans le cas de J. Steel, l'analyse s'affine en décomposant le mouvement en deux périodes. Il apparaît alors que l'investissement s'est décomposé en deux mouvements, une première période

⁷¹⁵ L'hypothèse théorique qui sous tend le tableau deux est que les trois paramètres suivant ont été constants: taux d'injection visé, productivité du haut fourneau, taux d'utilisation du haut fourneau. Cette hypothèse est validée dans la première vague d'investissement (1984-1988) puis invalidée dans la seconde étape (1988-1990).

⁷¹⁶ Un rapide calcul de regression nous a amené à une fonction polynomiale de type $CO=ax^2-bx+c$ avec une coefficient de corrélation $R^2=0,7372$. La forme de la courbe est légèrement incurvée et décroissante ($a<b$) jusqu'en 1986 puis devient croissante ensuite.

⁷¹⁷ La crise de surproduction a commencé à toucher sévèrement F. Steel à la fin des années 70. Le broyeur de l'un des haut fourneau arrêté, sur le site de U. qui a été le précurseur de l'injection de charbon en France a été réutilisé dans une usine voisine.

d'investissements espacés, avec une périodicité moyenne de 16 mois (16,33)⁽⁷¹⁹⁾, suivie d'une seconde période d'investissements accélérés, en fin de période, concentrés en particulier sur l'année 1989, avec un délai moyen de 5 mois (4,8) entre chaque installation. La périodisation est donc strictement inverse au cas de J. Steel. Cela suggère la mise en place d'une première période exploratoire, pendant laquelle les investissements ont été répartis dans le temps du fait de l'incertitude attachée à l'injection de charbon, suivie par une seconde période où, les doutes étant levés, le rythme des investissements s'est rapidement accéléré.

Le second élément clé du comportement d'investissement de F. steel est lié à la *dispersion* géographique des investissements sur l'ensemble des sites et des hauts fourneaux. D'une manière strictement opposée au cas de J. steel, les investissements ont été effectués par grappes, groupés par site. Les trois premiers investissements ont eu lieu à D. Puis L. a commencé une série d'investissements répartis sur 3 années, pour 4 hauts fourneaux (sites P. et R.), enfin, F. a mis en service ses deux hauts fourneaux au même moment. Cette dispersion par paquets indique le poids des logiques locales dans les décisions d'investissements, et la faible coordination centrale des investissements sur l'ensemble de la période, à la fois dans le temps et dans l'espace.

Ce point est d'ailleurs largement confirmé par une analyse de l'*hétérogénéité* des équipements installés. Comme le soulignait un chercheur de l'Irsid, adoptant une vision globale sur les équipements: "*Ah ben, il y avait autant de systèmes que d'usines. Alors là c'est clair, on a jamais eu d'homogénéité des équipements hein*"⁽⁷²⁰⁾. Globalement, il apparaît que la conception des installations a dépendu étroitement de constructions localisées de cahiers des charges et d'offre technologique (fournisseurs). Cette 'localisation' des investissements a donc offert une large prise à la fois aux logiques d'usines, mais aussi au moment d'opter pour l'investissement, tant du point de vue des interventions 'politiques' que du point de vue de l'évolution de l'offre technologique⁽⁷²¹⁾.

Il est possible de distinguer trois grands principes d'installation dans le parc français mis en place entre 1983 et 1990. Le premier s'inscrit dans la succession de la première installation et repose sur le broyage fin avec mesure de sécurité de type Armco, et la distribution mécanique du charbon, tuyère par tuyère selon le procédé Paul Würth. Le second est plus proche de l'installation Armco et repose sur le broyage fin du charbon et sa distribution par l'intermédiaire d'un distributeur 'statique', ou 'pneumatique'. Le troisième système est beaucoup plus original. Il s'agit d'un système mis au point sur le site de P. avec une entreprise locale d'engineering, s'inspirant librement de la technologie britannique d'injection de charbon grenu (grossièrement broyé). En moyenne, l'entreprise F.steel injectait 90 kg/tonne de fonte en 1990 (91,9). Ce taux élevé masquait cependant des situations très contrastées d'un site à l'autre⁽⁷²²⁾. Il n'est pas inutile d'entrer plus avant dans le détail des investissements réalisés. F. a construit ses deux installations au même moment, à l'identique (Paul Würth

⁷¹⁸ La variance du rythme des investissements est de 28,85 pour J. steel et de 58,10 pour F. steel.

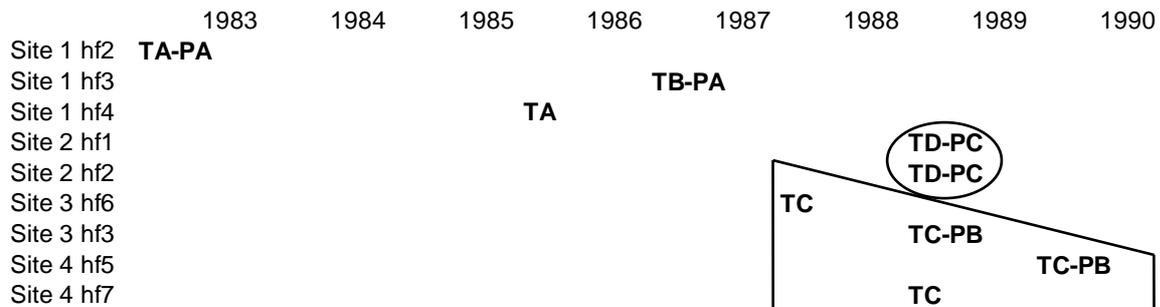
⁷¹⁹ L'écart type sur la période considérée est de 5, 25.

⁷²⁰ Entretien, chef d'équipe de recherche, Irsid, Maizières les Metz, janvier 1996.

⁷²¹ Le choix de la troisième tour de D et des broyeurs de F. nous ont été présentés comme des coups de force de la direction de l'entreprise, qui pour favoriser les relations franco-russes, qui pour des raisons de positionnement stratégique dans le paysage des influences au niveau européen. Nous avons déjà évoqué par ailleurs le cas de la seconde tour de D. Au delà de l'anecdote, l'existence de ces interventions est rendu possible par la non standardisation technologique.

pneumatique). Les quatre tours de R&P ont été construites selon les mêmes principes par la même société (Chovet-Carbinject). A D., les tours du hf 2 et 4 ont suivi les mêmes principes généraux, et ont été commandées au même fournisseur, (Paul Würth, mécanique). Par contre, la tour du hf 3 a été commandée à Klökner et a été conçue selon des principes proches de ceux des tours de F. (injection pneumatique avec strictions). Pour ce qui concerne les broyeurs, nous avons, à titre comparatif, constitué un tableau récapitulatif:

Le tableau 3 retrace la séquence d'investissement en capacité de broyage à F. Steel



Source: d'après données F.steel. TA est la tour du fournisseur A, TB du fournisseur B, etc. PA est le pulvérisateur de type A et ainsi de suite.

L'expression graphique de la séquence d'investissement met en valeur la localisation temporelle et géographique des investissements. A chaque site correspond une installation. Dans le cas de D. (site 1) il n'existe pas même une homogénéité locale des installations malgré les évaluations positives qui ont été portées sur la première installation commerciale du hf 2. La comparaison avec le tableau 1 souligne la faible coordination globale des investissements. La stratégie de diversification s'est effectuée d'un site à l'autre, limitant les apprentissages croisés. Chaque site a donc dû faire l'expérience de son système, avec le risque, comme dans le cas des sites 3 et 4 d'une instabilité forte de la technologie (les sites considérés comme les plus stratégiques sont les sites 1 et 2).

La flexibilité introduite dans chaque décision autorise l'évaluation et la sélection de la 'meilleure technologie' à un moment donné, et l'intégration des améliorations réalisées jusqu'alors. Elle ne facilite pas la circulation interne de changements, une fois le système localement validé.

Les calculs d'optimisation ont donc été caractérisés par leur caractère local et ponctuel. Dans chaque cas, les hypothèses posées et les calculs effectués reposaient sur des anticipations locales. Les sites ayant investi après D. n'ont pas pu reprendre avec précision les éléments de calculs précis établis par son expérience.

En ce qui concerne enfin l'optimalité des investissements réalisés, celle-ci a également été très fluctuante à F.Steel. Certes, sur le site de D., la seconde installation a été l'objet d'un investissement

⁷²² L'usine de D. injectait en moyenne 130 kg contre 80 pour le site de F. et 55 pour les sites P et R. Chaque site s'est fixé des objectifs d'injection différents allant de 100 kg à 150 kg. Si les sites de F. et de D. ont atteint leurs objectifs, par contre, P&R ont eu beaucoup de difficulté à mettre en oeuvre les objectifs affichés.

au plus juste avec un score approchant 80, c'est à dire une capacité installée strictement inférieure à la capacité optimale requise pour réaliser les objectifs fixés. Ce point souligne l'influence de l'optimisation au coup par coup des investissements, et la procédure financière formelle d'évaluation à laquelle répondent les investissements chez J. steel. En effet, les acteurs du site de D. avaient demandé un investissement plus important, et la direction de l'entreprise a autoritairement réduit la capacité de broyage (⁷²³)(⁷²⁴). Cette optimisation comporte des risques, dans la mesure où elle rend difficile l'adaptation à des changements de conjoncture (⁷²⁵). Et en effet, ainsi que nous allons le constater dans la partie consacrée à l'apprentissage, les acteurs ont dû apprendre à utiliser les outils au-delà de leur capacité nominale pour pouvoir continuer leur rationalisation de la fonction de production. Un second point notable concerne la faible surcapacité relative du premier investissement. Ainsi que nous l'avons noté au chapitre 2, la réalisation d'un investissement fortement optimisé dès la première installation repose en partie sur une ruse que nous avons cherché à retraduire dans le tableau 4 et le graphique 2, à savoir que le premier broyeur a été surdimensionné en prévision de son utilisation sur deux hauts fourneaux. Cette astuce a permis de disposer d'une marge de manœuvre très large à court terme, dans la prise en main de la première installation, tout en optimisant l'investissement *a-posteriori* et à long terme. Le tableau 2 propose une estimation de l'optimalité des investissements réalisés (⁷²⁶) (⁷²⁷).

⁷²³ La réduction a été de 30% environ. Si l'on procède au calcul d'optimalité avec un l'investissement demandé par les acteurs, on arrive à un chiffre de 100%.

⁷²⁴ Par souci de réalisme, nous avons procédé différemment pour l'évaluation de l'optimalité des investissements à D. En effet, les séquences d'investissement y ont été particulièrement complexes. Ainsi, le premier investissement a été réalisé dans l'intention d'équiper non pas un, mais deux haut fourneaux. Cela s'est traduit par une installation disposant de deux lignes. En 1986, un investissement est intervenu sur le hf 4, mais il ne comprenait pas de broyeur, puisque le hf 4 et le hf 2 étaient tous deux alimentés par le premier broyeur. Lorsqu'en 1987, une troisième tour a été construite sur le hf 3 de D., un broyeur supplémentaire a été demandée, et obtenu. Le calcul réalisé faisait état d'une prise en compte globale de l'usine. Ainsi pour prendre en compte ces logiques d'investissement au plus près, nous avons rapporté la capacité du premier broyeur aux capacités nécessaires pour injecter 65 kg sur le hf 2 et 3, ce qui était l'intention au moment de la décision. Pour le cas du broyeur 2, nous avons considéré l'ensemble de la capacité broyage (1+2) et l'ensemble des besoins des haut fourneaux, avec un objectif affiché (en 1986) d'injecter 120kg sur l'ensemble. Si nous avions traité ces deux investissements de façon standard, sans tenir compte des données qualitatives dont nous disposons, le premier investissement aurait eu un coefficient d'optimalité de 342 et le second investissement de 159,57. Mais surtout, aucun investissement en broyage n'aurait directement concerné le hf4, pourtant le plus important à la fois en matière de production, et comme nous allons le voir, en matière d'injection de charbon.

⁷²⁵ Encore une fois, la logique astucieuse d'investissement masqué proposé par les acteurs du site de D. porteur d'une vision d'ensemble de l'usine et de ses besoins, s'est heurté à une logique d'optimisation au coup par coup, instrument par instrument, outil par outil.

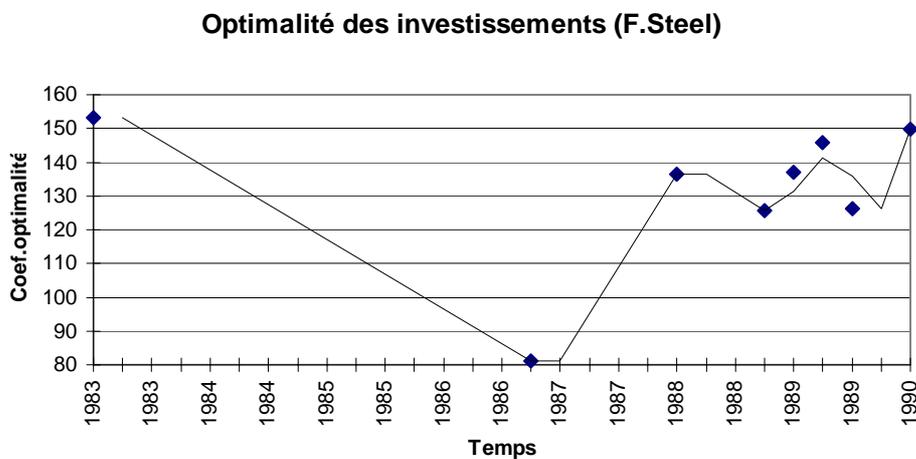
⁷²⁶ Notre calcul repose sur les hypothèses suivantes: taux de remplacement 0,85 (Steiler et Alii 1995, IISI); productivité Site 3et4 =1,6; Site 2.= 2; Site1-2 et 3=2, Site 1-4=2,2 (hypothèses d'après données EBFC). Les objectifs pris en compte ont été les suivants (65, 120, 100, 120, 120, 100, 100). Ces résultats sont issus des interviews et des publications. Dans les cas où nous ne disposons pas de référence, nous avons formé une hypothèse sur la base des résultats atteints dans les deuxième et troisième années d'injection.

⁷²⁷ Etant donné la forte hétérogénéité des investissements et des haut fourneaux, un calcul à taux d'injection constant, à productivité identique et à taux d'utilisation identique aurait été intenable et aurait totalement biaisé les résultats. Ainsi, contrairement à ce qui s'est passé au Japon, dès la seconde installation, les objectifs d'injection ont doublé passant de 60 à 120. Le fondement de ces variations est que l'injection n'a pas été utilisé comme un élément de stabilisation du haut fourneau mais comme un élément décisif de l'économie globale de consommation d'énergie au haut fourneau. Le tableau qui suit s'efforce donc de présenter des résultats prenant en compte cette variabilité. Malgré cet effort d'incorporation de sources structurelles de variation d'un hf à l'autre, les résultats restent très instables comme l'indique le graphique 2.

Tableau 2: Coefficient d'optimalité pour la séquence d'investissement de J. Steel

	1983	1987	1988	1989	1990
Optimalité	153,2558	81,25813	136,5542	136,9055	145,6815
				125,5632	126,3562
					149,9231

Graph 2: Tendance à l'optimalité des investissements (F. Steel)



Le tableau 2 et le graphique 1 indiquent que le coefficient d'optimalité s'est situé dans une fourchette comprise entre 120 et 150 entre 1988 et 1990. Si l'on excepte le second investissement à D., l'ensemble des points se situe sensiblement dans cette fourchette. Celle-ci tend à être légèrement plus élevée que la fourchette repérée chez J. Steel après standardisation, mais l'analyse des moyennes sur les périodes considérées montre une fascinante proximité (⁷²⁸). Cette tendance s'interprète néanmoins différemment dans le cas de F.steel. La stabilité ne tient pas à l'application d'un modèle standardisé. Elle tient à une procédure formelle de décision commune, renouvelée à chaque décision individuelle. Elle est le résultat de la confrontation entre une logique d'investissement optimisatrice à court terme, et l'établissement d'une marge de manœuvre liée au caractère incertain de l'investissement. Rappelons également, dans un souci comparatif, que cette tendance stable a été obtenue au prix de l'incorporation dans les calculs (et donc de l'annulation de l'effet 'ascendant') d'objectifs fluctuant en matière

⁷²⁸ Un calcul de moyenne pour la période stable de généralisation (1984-88) chez J. steel donne $\alpha=133$ et de $\beta=136,83$ chez F. Steel pour la période de généralisation rapide (1988-1990). Les écarts types sur les mêmes périodes sont respectivement de $\sigma=19,4$ pour J.Steel, contre $\sigma=9$ chez F.steel. Contrairement au cas de J.steel, un simple calcul de regression linéaire ne donne pas de résultat significatif. La fonction linéaire la plus proche est cependant intéressante, même si elle n'est pas significative statistiquement, car elle est de la forme $f=ax+b$ avec a proche de 0 et b proche de la moyenne des y sur la période (131,68). La meilleure corrélation est obtenue avec une fonction polynomiale légèrement convexe de type $y=ax^2-bx+c$ avec un coefficient de corrélation $R^2=0,60$.

d'injection de charbon. En d'autres termes, la stabilité n'est pas le fruit d'un apprentissage rapide ayant permis de dégager un modèle optimal d'installation fondé sur un calcul économique précis et informé, mais le fruit du 'non apprentissage' d'un site à l'autre, et de la réduction limitée de l'incertitude liée à l'instabilité technologique. Ainsi, on constate que le premier investissement est tout à fait du même niveau d'optimalité que les suivants (à l'exception notable du second investissement réalisé à D.), et même quasiment égal au dernier.

La fonction de production globale constituée par F. steel à travers sa séquence d'investissement est donc tout à fait différente de celle mise en place au Japon. Chez F.steel en effet, il s'est agi d'utiliser l'injection de charbon comme un élément central de l'économie d'énergie de chaque haut fourneau, une opportunité d'investissement. Chaque cas a donc été particulier, non seulement du point de vue technologique, mais également du point de vue économique, en fonction d'équilibres énergétiques structurels (capacité en coke, présence d'autres formes d'injection) idiosyncrasiques. PCI a été considéré comme l'une des solutions permettant aux responsables des hauts fourneaux de gérer plus aisément les problèmes singuliers rencontrés en matière d'équilibre énergétique et de stabilisation des marches. Du point de vue de l'entreprise, il n'existe donc pas une fonction de production unique, modèle, généralisée à l'ensemble des sites, mais un ensemble de fonctions de productions toutes singulières, avec leurs objectifs, leurs dimensionnements, leurs principes technologiques, leurs courbes d'apprentissage, leurs logiques de rationalisation localisée. Dans ces conditions, il paraît difficile de mettre en évidence une ligne de rationalisation générale des investissements dans le cas français. Cette difficulté est accrue par le fait qu'une part de la rationalisation repose sur des apprentissages réalisés à l'extérieur de l'entreprise.

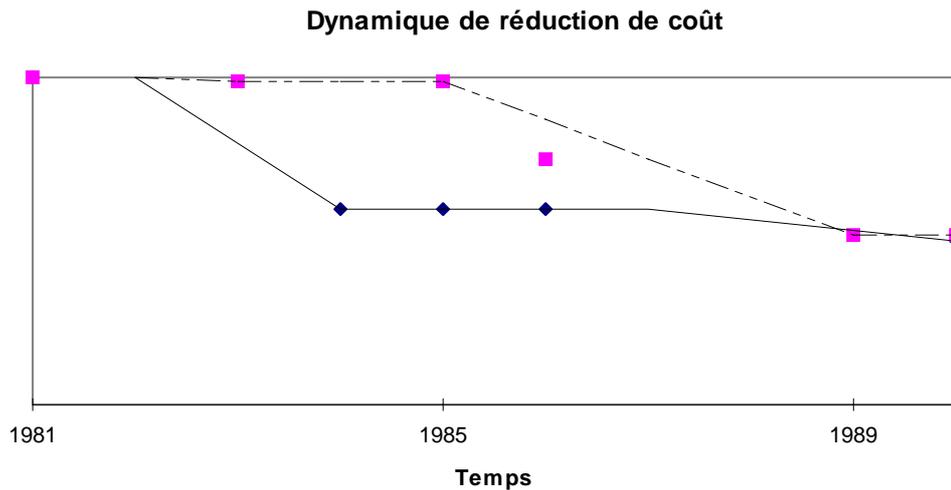
Pour clore le paragraphe relatif à la fonction de production, il paraît nécessaire d'évoquer la question économique des coûts. Précisons en guise d'introduction au sujet qu'il nous a été difficile de réunir des données fiables sur cette question auprès des entreprises, pour des raisons parfaitement compréhensibles de confidentialité ⁽⁷²⁹⁾. Les résultats proposés sur ce point sont donc à prendre avec la prudence qui s'impose, à titre illustratif de tendances probablement proches de la réalité.

Reste que l'intérêt de cette question demeure d'importance. Faute de disposer de données suffisamment précises pour alimenter une analyse économique, les logiques à l'œuvre peuvent fort bien être mises à jour à partir des informations dont nous disposons. Nous avons constaté au moment de la mise en place de l'innovation, les montants très comparables représentés par les premières installations commerciales de D. et de O. En fin de période, les montants des investissements réalisés

⁷²⁹ Lorsque nous avons pu obtenir des informations au sujet des coûts, la comparabilité des données fournies nous a paru extrêmement problématique, sauf à consentir une série d'approximations grossières. Il nous est apparu moins délicat de comparer des données physiques pour lesquels des ratio et indicateurs communs existent au niveau de la profession.

ont été également du même ordre (⁷³⁰). Pourtant, ces résultats ont été obtenus selon des logiques divergentes: une logique d'organisation et d'apprentissage interne chez J. steel, et une logique de marché chez F. steel. Le graphique 3 présente à titre illustratif, une estimation de la forme des chemins de réduction de coûts suivis dans les deux entreprises, selon la logique des transactions et selon la logique de l'organisation.

Graphique 3: tendance estimée de la réduction des coûts dans les deux entreprises (à titre illustratif)



Source: d'après les données approximatives obtenues auprès de J. et F. steel. La courbe supérieure est celle de l'entreprise F et la courbe inférieure celle de l'entreprise J.

La courbe inférieure représente la forme de la fonction estimée de réduction de coût à J. Steel. Conformément à la dynamique de généralisation, on peut lire cette courbe comme un effort important d'amélioration radicale du coût en début de période, permettant à l'ensemble des installations suivantes de bénéficier d'un équipement identique à coût nettement réduit. La continuité technologique se traduit par une cumulativité des économies et des améliorations réalisées. Cette période a été suivie d'une logique d'amélioration incrémentale. Du point de vue de l'organisation dans son ensemble, les bénéfices d'une telle stratégie sont clairs, le plus rapidement l'organisation descend le long de la courbe de coût, plus les économies réalisées sur l'ensemble de la fonction de production sont importantes et proches de l'optimum. L'entreprise a donc intérêt à surinvestir en début de période en espérant un apprentissage rapide.

⁷³⁰ Rappelons le caractère qualitatif des informations sur lesquelles nous nous appuyons et la réserve qui s'impose vis à vis de données 'dures' obtenues au cours d'entretiens qualitatifs, tant que ces données n'ont pas été 'recoupées' par une inscription officielle. Néanmoins, à titres indicatif notons que les estimations qui nous ont été fournies donnaient une réduction de 50% dans le cas de l'installation J. Steel. Ce chiffre est à mettre en relation avec l'investissement à F. estimé à 52% à capacité égale (objectif 65kg/t, dimensionnement équivalent à celui de la première installation). Ces résultats ne tiennent pas compte des phénomènes monétaires, pourtant non négligeables sur la période.

La courbe supérieure représente une approximation de la forme de la fonction de réduction de coût à F. steel (⁷³¹). Chez F. steel, la représentation d'une tendance continue à la baisse des coûts est en fait erronée. La fonction réelle est à n'en pas douter, nettement plus fluctuante et discontinue que celle, estimée et simplifiée que nous présentons ici. Il est néanmoins indéniable que le jeu du marché a favorisé une certaine optimisation des coûts. Ainsi, à chaque investissement, le coût de l'installation et son optimisation ont constitué des critères essentiels de décision. L'équipe de D. se souvient ainsi que malgré son intention d'équiper tous ses hauts fourneaux chez PW, ce qui aurait débouché sur la mise en place d'une technologie homogène et éprouvée sur le site, elle s'est vue dans l'obligation de choisir Klokner, auteur d'une offre mieux placée sur le plan financier. Un autre exemple est donné par le site de F., lequel a pu négocier 'un package' pour l'équipement simultané de ses deux hauts fourneaux. Sur les sites de R&P, le souci de réduire l'investissement a conduit à l'exploration d'une technologie 'maison' d'injection de charbon grenu, réputée plus économe en investissement (⁷³²). A F. steel, il n'existe pas d'injection type, dont on pourrait évaluer le coût moyen et suivre les évolutions. Cela signifie pour l'entreprise, le maintien d'un risque potentiel dans les hypothèses économiques formulées, à chaque investissement. L'instabilité technologique forte conduit à une connaissance approximative des relations entre inputs et outputs, aussi bien en terme économique, qu'en terme technique.

Rappelons pour finir que l'entreprise a joué une stratégie de marché en ce qui concerne l'atelier de broyage. La présence de quatre fournisseurs différents marque l'importance du jeu de la concurrence. Plutôt que de faire jouer cette concurrence à chaque installation, J. steel a préféré la faire jouer sur le moyen terme (cf tableau 1).

L'analyse comparative des séquences d'investissements et de leurs contenus révèle des modes de *diffusion* différents dans le cas français et dans le cas japonais.

2.2) Protection de la propriété intellectuelle et établissement d'une valeur commerciale.

La question de la propriété intellectuelle ne peut s'entendre indépendamment des efforts de représentation, d'enrôlement et de théorisation menés par les acteurs. Bowker en livre un exemple marquant à propos du procès qui opposa Schlumberger et Halliburton (Bowker 1992). L'auteur souligne l'importance de l'emboîtement des niveaux d'actions, et la correspondance entre théorie et base installée: "*What is interesting here is the indication of a double process. In the first process,*

⁷³¹ Nous en avons exclus les investissements relatifs à l'injection de charbon grenu, difficilement comparables.

⁷³² C'est en tout cas ce que clament les acteurs de la British Steel Corporation, isolés dans leur voie technologique d'injection de charbon grenu, malgré les résultats encourageants obtenus. Maldonado, R. et Alii (1985) "Granular coal injection into blast furnaces at the scunthorpe works of the British Steel Corporation" in: *AIME, Ironmaking Proceedings*, op cit. pp. 425-435; Gathergood, D. (1990) "Economics of Fossil Fuel Injection" in: *AIME, Ironmaking Proceedings*, March 1990, pp. 481-487.

Schlumberger was defending their patent by claiming that it gave the correct historical account of the development of electrical logging. In the second process, they were changing the nature of well digging so that electrical logging was the only possible adjunct to the drilling process. Thus they were in a messy way creating the hegemony that they already claimed was the correct account – and their claim that this was the correct account helped them create the hegemony” (Bowker 1992, p. 68). L’auteur souligne qu’en perdant la bataille juridique, son brevet étant dévalorisé, Schlumberger a gagné la bataille économique en s’imposant comme l’entreprise détentrice de l’appareil le mieux adapté aux contextes de l’exploration qu’elle a elle-même contribué à forger, en mettant la géophysique à portée des géologues.

De même que les rapports représentent un élément décisif sur le plan interne, que les articles offrent support essentiel à l’établissement des faits technologiques et industriels, les brevets jouent un rôle considérable dans la mise en place d’un marché et de ce que nous appellerons des ‘development blocks’ ou des territoires, c’est à dire des groupes de producteurs et d’utilisateurs organisés autour d’une alternative technologique.

Les brevets ne sanctionnent pas une innovation mais une invention, un objet technique représentant une méthode ou un produit considérés comme ‘originaux’, dans lesquels l’intervention humaine, la création est clairement identifiée à une personne ou à un groupe de personne en réclamant la paternité. Schématiquement, nous allons considérer qu’il existe un groupe de brevets par alternative technologique. Cet artifice permet de donner un sens opérationnel aux propositions d’Arthur, dans la mesure où la compétition technologique s’inscrit de façon privilégiée dans les brevets.

Aucune des deux entreprises n’a, à notre connaissance, déposé de brevet dans le domaine des injections de charbon pulvérisé (⁷³³). Cette apparente similarité recouvre en réalité deux stratégies tout à fait distinctes de valorisation des connaissances acquises.

J. steel où l’art de se rendre indispensable

La stratégie employée par J. steel éclaire certains aspects importants des ‘robust designs’. Après s’être glissée dans l’espace technologique et avoir adapté la technologie la plus avancée à des hauts fourneaux modernes, J. steel s’est trouvée en position d’affirmer à la fois l’intérêt de l’injection de charbon et la disponibilité d’une technologie performante fondée sur des connaissances scientifiques: l’injection de charbon pulvérisé constituait l’alternative technologique la plus attractive.

⁷³³ Exception faite du système Pacha.

Le second volet de la stratégie tient à la mise en place d'une redoutable barrière à l'entrée: l'acquisition de compétences et de savoir-faire présentés comme l'état de l'art technologique en matière d'injection de charbon, et protégées par avance par une licence exclusive de revente au Japon. De part son contrat d'exclusivité signé avec Armco, J. steel s'est approprié, sur le marché japonais, une avance de 20 ans de recherche et développement, et la seule technologie commercialement éprouvée. Pour J. steel, Armco représentait un point de passage obligé. L'entreprise américaine était détentrice d'un 'monopole technologique'. Si une autre entreprise cherchait à développer cette technologie, elle devrait recommencer le processus de développement sans référence, en mettant en place une nouvelle alternative. J. steel devenait donc le partenaire incontournable de tout haut fourneau japonais moderne et au-delà. A quoi bon déployer des ressources, avec un résultat incertain lié à la complexité de la technologie pci, alors que J. steel, dont la réputation n'était plus à faire, avait déjà effectué le travail et se propose d'en faire bénéficier les autres entreprises japonaises? Voilà exactement le type de réaction que la stratégie de J. steel a cherché à susciter: *“Tout calcul fait, c'est plus intéressant d'acheter du tout fait qui marche que de partir de zéro”* (⁷³⁴). J.steel se trouvait ainsi dans son rôle historique de leader technologique (Lynn 1982, Yonekura 1992).

Pour J. Steel, engagée à long terme dans l'aventure industrielle du développement de PCI, l'acquisition de la licence Armco au Japon s'est inscrite dans une stratégie de valorisation commerciale des savoirs technologiques acquis: *“On a pu baisser réellement le coût de production par tonne de fonte en substituant du charbon au coke. L'installation PCI s'est avérée robuste et facile à entretenir. On a même pensé que cet équipement serait tout à fait vendable... nous avons l'exclusivité de vente sur le Japon”* (⁷³⁵). La négociation essentielle pour J. steel a été menée avec Armco. La forme du contrat retenue, si elle semblait garantir un monopole à J.steel sur le marché japonais, empêchait en même temps cette entreprise de valoriser sa valeur ajoutée à la technologie Armco-J.steel. Ainsi, d'après nos investigations, y compris concernant son apport fondamental sur la question du distributeur, J.steel ne s'est pas trouvé en mesure de protéger son invention sur le marché international.

Une fin de période mouvementée: vers la mise en question des certitudes et des pratiques

Le travail de développement de pci à J. steel devait assurer à l'entreprise un rôle incontournable dans l'avenir de la technologie. De la même façon que la source Armco avait été un point de passage obligé, la canalisation du flux technologique devait faire de J. steel le dépositaire incontesté de la technologie au Japon. Après avoir apporté de multiples aménagements à la technologie entre la première et la seconde installation, le PET semblait prêt à généraliser l'installation modèle dans l'entreprise, et dans tout le pays, fort de sa licence exclusive de la technologie Armco au

⁷³⁴ Entretien Direction section Fonte, Association technique de la sidérurgie, janvier 1997.

⁷³⁵ Entretien, ingénieur du PET, Futtsu, Japon, février 1996.

Japon. Cette forme de valorisation des investissements réalisés donnait aux décisions prises tout leur sens économique, dans la mesure où outre les économies réalisées grâce à la capacité de standardiser efficacement la technologie, J. steel devait tirer profit de la revente des compétences et savoirs accumulés, à l'extérieur de l'entreprise (⁷³⁶).

Il se trouve que les autres acteurs japonais n'ont pas repris les hypothèses de J. steel et ne l'ont pas suivi (⁷³⁷) (⁷³⁸).

Non seulement les entreprises japonaises ont trouvé le moyen de contourner le passage par J. steel, mais, de plus, elles ont pour certaines d'entre elles contesté fortement l'hypothèse selon laquelle cette entreprise J. posséderait la technologie la plus avancée.

Ainsi, une autre série d'événements est venue largement déjouer les plans de J. steel. En 1985, Nkk. atteignait un taux d'injection de plus de 100kg/t (⁷³⁹). En 1986, Nakayama steel injectait des montants de charbon de 121 kg/t (⁷⁴⁰). En Europe, Hoogovens et D. ont publié des articles rapportant des injections de charbon de l'ordre de 130 kg sans réduction du taux de remplacement et sans aucune dégradation de la marche des hauts fourneaux. M. T., chercheur jusque là isolé dans ses recherches sur les limites d'injection s'est trouvé pris dans une situation paradoxale. L'allure que prenaient les développements de PCI lui donnait raison, a-posteriori et le transformait en pionnier. Mais ils minaient en même temps les fondements même de l'intérêt de ses recherches: “ *On a fait pas mal d'expérimentations mais ça coûte cher. A l'époque par exemple en Allemagne, en 85, ils étaient arrivés à la charge de 150 et nous sommes arrivés à ça avec le modèle.*” (⁷⁴¹).

⁷³⁶ Ce point indique la limite de la comparabilité des calculs d'investissements de J. et F. steel, puisqu'ils se sont inscrits dans une logique de retour sur investissement totalement différents.

⁷³⁷ A l'exception déjà noté de N. Steel qui a équipé deux haut fourneaux avec la technologie J. steel mis en service en avril 1984 et février 1985.

⁷³⁸ Ce point renvoie également à un débat. Certains auteurs américains ont en effet dénoncé les connivences industrielles au Japon, épinglées sous le terme Japan Corporation. L'idée, ou plutôt l'opinion qui sous tend cette dénonciation est celle d'un trust industriel japonais bafouant la sacrosainte loi de la concurrence libre. Les entreprises japonaises sont censées, selon cette hypothèse agir toujours de concert, comme une corporation aux intérêts uniques. Un aspect moins trivial du débat tient à l'organisation industrielle japonaise (Baba 1991) où une certaine coopération permet de répartir les tâches et de profiter à l'ensemble de l'industrie. J. steel a été créé à partir de la fusion de deux sociétés, Fuji steel et Japan steel. Un des objectifs affichés était de créer un leader technologique avec une forte capacité de R&D favorisant ensuite la diffusion auprès des autres sociétés. Yonekura (1994) est l'auteur d'un ouvrage retraçant l'histoire de la sidérurgie japonaise. Ce travail, publication d'un PhD réalisé sous la direction de Chandler montre le rôle historique assumé par le leader technologique au Japon, et en particulier l'importance Yawata, société au caractère privé-public dans l'assimilation des technologies étrangères dans la période de l'industrialisation du Japon. Dans une autre perspective, Lynn (1982) a indiqué le rôle du MITI dans la coordination de l'évaluation et du développement technologique dans le cas du BOF. PCI fournit un contre exemple montrant que pour le moins, aucun de ces traits n'est aussi automatique ou aussi anti-compétitif qu'il a souvent été suggéré. L'un de nos interlocuteurs appartenant à l'entreprise de Ko. Steel rappelait cette dépendance de Ko sur le plan technologique (particulièrement forte) et évoquait la volonté affirmée d'autonomie des nouvelles générations d'ingénieurs chez Ko à partir des années 70 (Entretien Ko steel, Tokyo, juin 1996).

⁷³⁹ Kato T. et Al (1986) in: Tetsu to Hagane, 72, n°12, S 870.

⁷⁴⁰ Kawada, T., et Al (1987) in: Tetsu to Hagane, 73, n°12, S 783.

⁷⁴¹ Entretien chef d'équipe de recherche, Futsu, Japon, décembre 1995. Nb, la date est en fait 1986. L'usine de Hamborn en Allemagne a atteint un record de 177kg sur deux semaines en mai 1986.

Deux hypothèses sous tendaient l'univers cosmologique de l'installation modèle mise au point à J. steel. Toutes les deux ont été sérieusement questionnées.

La première hypothèse se trouve au fondement de l'heuristique tracée entre charbon et fuel. Il s'agit du principe de la combustion parfaite et 'stochiométrique' du charbon. Les calculs d'optimisation ont tous été réalisés sur la base d'une combustion parfaite du charbon dans le raceway. Le charbon a été théoriquement confiné à cette zone d'une longueur d'environ 1m50.

"It is believed that it is important for solid-fuel injectants to be consumed before leaving the blast-furnace zone known as the raceway. This belief has arisen as an explanation of problems with soot collection in blast-furnace-gas cleaning plants and raceway blockages encountered during heavy-fuel-oil-injection" (Bortz et Flament, 1983, op cit.). Les calculs d'optimisation de l'injection aussi bien que les évaluations portées sur les 'limites' de l'injection de charbon ont été construits sur cette hypothèse.

Les expériences industrielles menées avec des taux d'injection supérieurs à 100 kg/t de fonte sans qu'aucune dégradation de la marche et de la productivité du haut fourneau ne soit constatée ouvraient une brèche béante dans l'édifice patiemment construit des connaissances chez J. steel. Il ne s'agissait pas d'une controverse scientifique, menée sur la base d'expérimentations toujours discutables, mais d'expériences industrielles attestées dans plusieurs entreprises, dont certaines étaient japonaises. Le charbon n'est pas le fuel. Les calculs d'optimisation fondés sur cette heuristique ne permettent pas d'expliquer les phénomènes d'injection de haut taux de charbon. L'univers de PCI basculait soudain dans un univers inconnu.

La seconde hypothèse concernait la méthodologie utilisée dans les études et recherches menées sur le raceway. Le raceway a été l'objet de modélisation sous forme de maquettes diverses. Le premier prototype utilisé par les chercheurs était une chambre vide (⁷⁴²). Le raceway était représenté comme un espace vide dans lequel le mélange charbon air se consumait plus ou moins aisément en fonction de la taille des particules et de qualité des charbons (matières volatiles, cendres).

Une large controverse est née sur la représentativité de ces modèles et sur la validité des résultats obtenus à l'aide de ce qui fut appelé les 'vacants chambers'. Le milieu des années 1980 a vu fleurir une nouvelle série de 'modèles chauds', comprenant cette fois un lit de coke, 'similaire' à celui des foyers de hauts fourneaux. Cette fois, le raceway était une 'chambre pleine' de coke dans laquelle

⁷⁴² L'appareil était constitué d'une conduite par laquelle le vent chaud était soufflé, et dans laquelle était implantée une lance d'injection par laquelle arrivait le charbon pulvérisé et d'une chambre, un receptacle orné d'instruments (Camera vidéo, échantillonneur de gaz et de poussière, et thermocouple).

les effets conjugués du vent chaud et de la température créaient un foyer ⁽⁷⁴³⁾. M. T. fut l'artisan du développement des recherches sur les 'raceway models' à lit de coke chez J. steel ⁽⁷⁴⁴⁾.

A la fin des années 80, J. steel prenait acte d'une nouvelle ère du développement technologique de pci: "High PCI". Les recherches du début des années 80 étaient sévèrement critiquées au profit des modèles à lit de coke et de tentatives de modélisations du raceway. Un rapport datant de 1989 établit clairement la rupture intervenue dans les bases cognitives de l'entreprise:

"Many of the past pulverized coal combustion studies are concerned with vacant chamber combustion experiments. Since the combustibility of pulverized coal is inferior to that of oil in vacant chamber combustion, there is a possibility that the combustibility of pulverized coal was incorrectly regarded as being poor under raceway conditions as well. In recent years, the combustion experiments of pulverized coal have come to be performed in the presence of coke and reports have been published that indicate that the combustibility of pulverized coal under raceway conditions is better than expected" ⁽⁷⁴⁵⁾

Le même rapport met clairement en avant le passage d'un monde connu à un monde inconnu - *"Upper limits of pulverized coal injection rate and pulverized coal particle size are not yet known."* - et la nécessité d'établir les bases de la nouvelle technologie pci: *"Optimum pulverized coal injection methods and optimum burden distribution patterns with pulverized coal injection are now investigated on a trial-and-error basis. It is thus imperative to clarify the combustion characteristics of pulverized coal in the raceway of the blast furnace and the upper limits of pulverized coal injection rate and pulverized coal particle size and to develop optimum pulverized coal injection techniques."* (ibid.).

Pour J. steel, le développement de pci au-delà des prévisions du début des années 80 a pris une allure dramatique. Etant donné l'assise cognitive de leur technologie, les événements intervenus suggéraient non seulement de prendre acte que les limites d'injection du charbon étaient plus élevées que prévues, mais elles supposaient une rupture technologique radicale. Pci n'était plus le même. Le nouveau pci en voie d'émergence nécessitait de façon impérative de nouvelles recherches, l'établissement de nouvelles connaissances sur le fonctionnement du raceway, mais aussi de nouvelles techniques de chargement du haut fourneau, de nouvelles méthodes d'injection de pci, de nouvelles investigations sur la taille optimale des particules: puisque pci a changé, il est devenu indispensable d'explorer sa nouvelle cosmologie afin d'en optimiser la technologie et les pratiques ⁽⁷⁴⁶⁾. Un sentiment et une rhétorique du 'retard' ont commencé à se développer et à accompagner la construction de cette rupture technologique à J. steel, particulièrement en référence à Kobe steel: un

⁷⁴³ Au Japon, la première entreprise à avoir publié des résultats d'expériences avec ce nouvel appareil expérimental est, point intéressant dans la bataille pour le leadership technologique, Ko. Steel, dès 1982, c'est à dire avant même d'avoir lancé sa première installation d'injection de charbon. Kanayama, Y. et Alii (1982), in: Tetsu to Hagane, 68, n°11, S 763.

⁷⁴⁴ M. T. décrivait son appareil de la manière suivante: "Ca faisait environ 2 m de diamètre, 5 m de haut. On met le coke jusqu'à 5 tonne. La température de vent peut atteindre 1300 degrés. Donc non seulement on pouvait mettre du coke, mais on pouvait envoyer du charbon. Il y avait une tuyère de 80 mm de diamètre. C'est la moitié (une échelle 1/2) par rapport à une tuyère standard."

⁷⁴⁵ Rapport J. steel sur la haute injection, avril 1989.

⁷⁴⁶ Bien que nous n'ayons pas pu en obtenir de confirmation, tout porte à croire que J. steel est précisément à l'origine du terme "high pci" et de la différenciation entre pci et high pci. La première apparition historique de ce terme dans les

acteur se souvient des discussions relatives à l'orientation de l'entreprise dans la direction du high pci *“Tout le monde était relativement d'accord, puisque NSC avait pris conscience qu'il était un peu en retard sur pci. Donc si on injecte pci, on peut baisser d'autant le prix de revient. Finalement, cette relation était assez évidente, et il y a eu cette conscience d'être un peu en retard. Donc finalement, tout le monde était relativement d'accord sur la direction générale”* (⁷⁴⁷). Nous interprétons cette rhétorique relativement à la bataille pour le leadership technologique au Japon (⁷⁴⁸).

De la même manière qu'un énoncé ne tient que si des lecteurs l'utilisent, un brevet ou toute autre forme de propriété intellectuelle n'acquiert sa valeur que dans l'interaction avec des utilisateurs. Une multitude de brevets sont ainsi déposés sans jamais acquérir de valeur commerciale : on retrouve la distinction proposée par Schumpeter entre invention et innovation. La convention instituée sur les frontières technologiques prend son sens en fonction de la dynamique de production et de la dynamique d'adoption, lorsqu'un intérêt commercial est en jeu (Bowker 1992, Misa 1992). Pour acquérir sa valeur, un brevet doit s'incorporer comme élément d'un objet technique, lequel objet technique doit être adopté et incorporé dans des usages.

L'exemple de J. steel suffirait à convaincre les plus sceptiques sur la question. J. steel s'est trouvé dans l'impossibilité de valoriser la licence chèrement acquise auprès d'Armco. A l'exception d'une petite entreprise, N. steel, J. steel n'a pas vendu d'installation au Japon.

Dès 1982, une petite entreprise, Godo, faisait volé en éclat le caractère incontournable de la technologie Armco en créant sa propre technologie d'injection de charbon, et en lançant avec succès une installation commerciale d'injection de charbon sur un petit haut fourneau situé à Osaka (⁷⁴⁹). Toutes les grandes entreprises japonaises ('big five') à l'exception de NKK ont développé leur propre technologie PCI 'in-house'. Kawasaki. et Sumitomo. ont créé des technologies d'injection ex nihilo, lançant des opérations commerciales respectivement en octobre 1984 et en janvier 1986 (⁷⁵⁰).

documents que nous avons pu consulter figure sur le rapport consacré par J. steel à ce sujet et paru en 1989. Le terme a ensuite été généralisé.

⁷⁴⁷ Entretien general manager de la recherche division Fonte, Futtsu, décembre 1995.

⁷⁴⁸ En d'autres termes, le retard n'est pas interprété ici comme un retard objectif par rapport à un développement technologique de type paradigme technologique objectif, mais comme une représentation subjective, un sentiment partagé d'écart entre un objectif de leadership incontournable et une situation où d'autres sociétés semblent se trouver en mesure de contester ce leadership ou même de le briguer.

⁷⁴⁹ Cette installation est restée unique. Mais elle injectait régulièrement 60 kg de charbon à la tonne de fonte (Gathergood, 1988, IISI).

⁷⁵⁰ D'après nos interlocuteur, il y a eu une certaine concurrence entre les entreprises pour l'acquisition des licences américaines. "Il n'y avait que deux sources de brevet, Armco et Petrocarb. Ils (K et S steel) sont partis en retard" (Entretien Ko steel, juin 1986). Donc, J. steel, parti le premier a choisi Armco. Ko. Steel, qui suivait de près, a choisi Petrocarb. Il ne restait plus aux autres entreprises qu'à développer leurs propres technologies. Un autre point intéressant est évidemment la situation européenne. Il existait également des brevets en Europe, mais d'après l'ingénieur de Ko., les sociétés européennes, à l'inverse des sociétés américaines ne vendent pas de licence (Know how), mais préfèrent vendre des équipements. "contrairement aux sociétés américaines, les entreprises européennes ne revendent pas l'exclusivité, le droit de revendre la

Kawasaki. a vendu une licence à Nakayama steel qui en a équipé deux hauts fourneaux moyens lancés en octobre 1985 et en décembre 1986.

Mais le premier concurrent sérieux de J. steel à lancer une injection commerciale de charbon a été Kobe steel. Kobe steel était structurellement intéressé à l'injection de charbon car il se fournissait en coke à l'extérieur. En 1981, Kobe Steel s'est associé pour sa part à un partenaire américain, Petrocarb, pour développer conjointement une technologie moderne et commerciale d'injection ⁽⁷⁵¹⁾. *“Il n’y avait que deux sources de brevets. Nous sommes partis en retard (par rapport à J.steel) () il existait une autre source européenne, mais contrairement aux entreprises américaines, les entreprises européennes ne revendaient pas l’exclusivité, le droit de revente”* ⁽⁷⁵²⁾. Petrocarb était propriétaire de brevets relatifs à l'injection de charbon datant des années 1960 (distribution et contrôle des débits). Kobe Steel possédait une expertise dans le secteur de la préparation du charbon et un Département Central d'ingénierie extrêmement important, au point de justifier la création d'une entreprise, Kobelco spécialisé dans les équipements industriels. Petrocarb avait équipé un fourneau de National steel aux Etats Unis et de Stanton en Grande Bretagne, mais ces expériences se sont soldées par des échecs ⁽⁷⁵³⁾. Dans cette filiation technologique, les deux partenaires ont développé une technologie moderne d'injection, adaptée aux exigences des hauts fourneaux des années 1980. La première installation commerciale a été mise à feu en avril 1983. C'est ainsi avec cette entreprise que le fer a été croisé en 1985, sur le marché important représenté par la seule grande entreprise n'ayant pas développé son propre système, NKK L'une des raisons invoquées pour expliquer la décision de NKK d'acquérir un équipement dans son ensemble tient 'au retard qu'aurait pris NKK en matière de R/D dans le domaine des injections de charbon ⁽⁷⁵⁴⁾. Cette bataille importante sur le marché japonais a été perdue par J. steel.

Kobe steel a obtenu des brevets pour les développements réalisés ⁽⁷⁵⁵⁾. Kobe steel a finalement racheté l'entreprise Petrocarbo au milieu des années 1980, récupérant ainsi sa mise financière. Mais l'un des éléments essentiels de cette bataille tient aux représentations développées par Kobe .steel en matière d'injection de charbon. Ayant dans un premier temps emboîté le pas aux hypothèses de J.steel sur l'optimisation autour de 60 kg/t, Kobe a rapidement emboîté le pas de la vague européenne ayant ouvert la voie à des injections élevées (high pci). Kobe est ainsi devenu à la fin des années 1980 le

technologie. Nous étions obligé d'acheter les équipements mais compte tenu des coûts de transport etc ça revenait vraiment trop trop cher” (Entretien Ko., Tokyo, juin 1996).

⁷⁵¹ Un interlocuteur de Kobe steel estimait que les offres de Armco et de Petrocarb étaient équivalentes sur le plan technique et économique. L'avantage d'Armco résidait dans son expérience industrielle. Mais pour Kobe. Choisir Armco revenait à passer par la licence de J. steel, c'est à dire retomber dans la 'dépendance' technologique. Or Ko “avait l'intention de revendre cette technologie”, en particulier à l'étranger. Entretien manager Technology Administration department, Kobe. Steel, Tokyo, juin 1996.

⁷⁵² Ibid.

⁷⁵³ Dans le cas de Stanton, il a été conclut après coup que l'échec était lié au broyage trop grossier du charbon et au coût trop élevé du charbon. Entretien chef de Département, site de D. janvier 1996 et chef d'équipe de recherche Irsid, janvier 1996.

⁷⁵⁴ Entretien Manager, Technology Administration Department, Kobe steel, Tokyo, juin 1996.

champion japonais en matière de performance d'injection de charbon. Au début des années 1990, ses performances dépassaient celles des meilleurs européens, avec le franchissement symbolique de la frontière des 200 kg à la tonne de fonte.

Deux autres grandes entreprises japonaises se sont lancées dans l'injection de charbon pulvérisé, Kawasaki et Sumitomo. Toutes deux ont rejeté l'offre de J. steel pour lui préférer un développement interne de la technologie. Toutes deux sont également réputées pour l'importance de leur section ingénierie.

Armco a utilisé les développements mis en place par J. steel dans ses démarches commerciales autour du monde. En Europe, Hoogovens a ainsi bénéficié d'un transfert de technologie ayant incorporé une partie des innovations mises en place à O. En Corée, Posco est entrée en relation directe avec J.steel pour le transfert de la technologie Armco, de même qu'à Taïwan, China steel.

Si l'effet incitatif de l'article de J. steel a probablement comblé ses espérances, il n'en va pas de même des frontières technologiques tracées par l'entreprise pour tenter de s'approprier le monopole du marché japonais. Les grandes entreprises sidérurgiques japonaises n'ont pas accepté le caractère incontournable de J.steel, et se sont employés à contourner la propriété intellectuelle acquise par cette entreprise ('inventing around'). Cela les a amenés à défaire les hypothèses fondatrices de l'édifice stratégique ayant donné le jour à l'espace d'innovation de J. steel: Armco n'était plus un point de passage obligé, la technologie d'injection de charbon n'était pas suffisamment complexe pour ne pas être développée *in house*, J. steel ne possédait pas l'état de l'art technologique en la matière et en particulier, elle ne maîtrisait pas les savoirs d'utilisation de cette technologie.

Entreprise F. steel et externalisation

La stratégie adoptée par F. steel à l'égard des frontières technologiques de la propriété intellectuelle a été simple: l'entreprise a résolument opté pour l'externalisation de la question et le recours au marché, alors même qu'elle disposait d'une propriété intellectuelle sur l'injection de charbon par le biais de l'Irsid, obtenue par le pionnier français des injections dans les années 1960. Il est intéressant de souligner que l'Irsid possédait une série de brevets relatifs à l'injection de charbon pulvérisés, brevets ayant été obtenu lors des expériences pionnières réalisées dans les années 1960, expériences auxquelles nombre de brevets que nous avons pu consulter se référaient, sous la forme de document ('foreign reference'). Dans son rapport avec Armco, l'entreprise a clairement manifesté son intention de payer l'installation, plutôt que les savoirs de production qui les accompagnaient. Les acteurs de D. n'ont jamais eu l'intention de devenir producteur de technologie, ou d'inscrire leur

⁷⁵⁵ US Patent 448837, décembre 1984.

valeur ajoutée sur le marché. Ils se sont ainsi placés dans une perspective d'utilisateur, prêt à acquérir des biens possédant dont les attributs pourraient être co-définis avec des fournisseurs externes. La flexibilité résultant d'un tel choix est patente, puisque l'entreprise ne s'est trouvée liée à aucune alternative particulière, se trouvant ainsi en mesure, à chaque investissement d'acquérir la technologie la plus avancée au meilleur prix.

La question qui s'est posée aux acteurs de D. était alors: comment contourner la technologie Armco? Nous avons noté la réponse apportée à ce dilemme, reposant sur une alliance établie entre utilisateur et producteur de technologie, tous deux également intéressés à développer une alternative technologique. Paul Würth et Arbed avaient obtenu un brevet pour leurs premières expérimentations. Le co-développement d'une technologie à D. a débouché sur le dépôt d'une nouvelle série de brevets de la part de Paul Würth.

Multiplications des pôles d'apprentissage locaux

L'usine de F. contrairement à D., disposait d'une cokerie suffisamment importante pour satisfaire ses besoins. Mais un autre élément significatif mérite d'être souligné. D. a réussi à maîtriser la conduite de ses hauts fourneaux, dans des conditions assez comparables à celles des hauts fourneaux japonais, dont ils se sont énormément inspirés: "*ils réalisaient des marches excellentes en marche tout coke à F., excellentes...*" (⁷⁵⁶). En avril 1980, F. a mis en route des marches tout coke sur ses hauts fourneaux. Les résultats obtenus ont été considérés comme excellents, puisque des marches très stables ont été obtenues avec des mises au mille allant jusqu'à 439 kg de coke (⁷⁵⁷). Au début des années 80, les acteurs de F. ont montré que les injections aux hauts fourneaux n'étaient pas une nécessité, ni du point de vue du fonctionnement technique, ni du point de vue du fonctionnement économique (⁷⁵⁸)(⁷⁵⁹). Pour F., l'injection, et a fortiori l'injection de charbon n'a pas constitué un point de passage obligé: "*Nos collègues de F. n'ont pas eu les mêmes problèmes parce que eux..l'usine a été construite avec une capacité de cokerie adaptée, ils ont pu se caler sur une marche sans injection, sur*

⁷⁵⁶ L'usine de F. a dès le départ bénéficié d'une assistance technique de la part de Nk. Ses relations avec les entreprises sidérurgiques japonaises ont été extrêmement développées sur toute la période.

⁷⁵⁷ Le record de mise au mille de coke faisant référence dans la première moitié des années 1980 était de 354kg/tpi réalisé sur le haut fourneau 3 de F. de l'entreprise japonaise Nk. Steel, avec une injection de fuel de 42kg/tpi (Kajikawa, S et Alii (1983) in: Camp-ISIJ, Vol 23, pp. 738-745). La mise au mille totale était donc 396kg/tpi. Le record de mise au mille de coke a tenu jusqu'au record de l'usine française de D. de 143kg/tpi de charbon avec 313kg de coke à la tonne de fonte en juin 1985.

⁷⁵⁸ L'usine de F. est devenue le leader français en matière de marche sans injection. Leur réputation dans ce domaine est devenue internationale. Les résultats ont été communiqués et publiés: Capelani, R. et Alii (1980) "La réduction dans le haut fourneau et la recherche des très basses mises au mille" in: Congrès HF80, Arles, juin 1980; Thirion, C., et Alii (1981) in: Revue de Métallurgie, Vol 78, n°11, pp. 857-868. Les auteurs établissent un fait industriel: les marches tout coke ne déstabilisent pas les haut fourneaux. Ils montrent même que dans le cas de F., le passage de l'injection de fuel à la marche 'tout coke' s'est accompagnée d'une amélioration de l'efficacité du haut fourneau.

⁷⁵⁹ Nous avons noté l'influence décisive de la présence à D. de C. dans la reprise du dossier. Dans cette perspective, notons aussi que le frère ennemi de C., M. était à l'époque, l'un des patrons de F. Ce personnage, polytechnicien comme C. n'était pas favorable au développement des techniques d'injection de charbon.

laquelle ils sont restés d'ailleurs pendant presque 15 ans. Ils ont du injecter en 74-76 ensuite, ils sont passés en marche sans injection, ça a duré 12 ans..” (760).

Au début des années 1980, la référence française en matière de haut fourneau était plutôt F. que D. Les acteurs de F., têt équipés des Sections Techniques ‘à la japonaise’ (761) ont réussi à tisser une série de liens étroits avec des chercheurs de l’Irsid, et à mettre en place des programmes de recherche et de développement conjoint en matière de haut fourneau (762). F. a ainsi équipé ses hauts fourneaux de systèmes d’instrumentation et de systèmes informatiques permettant de mieux contrôler le fonctionnement interne du haut fourneau et la régularité des marches. Parallèlement, un outil informatique (modèle CLEF) destiné à faciliter la conduite des hauts fourneaux était mis au point sur la base du modèle du haut fourneau de l’Irsid (modèle RIST) et des mesures réalisées à l’aide de la nouvelle instrumentation (763).

Une série de changements intervenus sur le site de F. en matière de niveau de production (764) et d’équipement a résulté en une situation excédentaire en matière de gaz de cokerie. Or, à l’époque, les acteurs du site de F. ont considéré leur usine comme une entité autarcique pour laquelle un équilibre avant tout local devait être recherché: *“The dual characteristics of F. which is simultaneously an integrated and isolated plant leads for the time being to the need of producing all its coke and of consuming all its gas production in the plant itself.”* (765). La décision a donc été prise en 1982 de mettre en place des marches avec injection de gaz de cokerie. Les opérations ont débuté en juillet 1983 sur le hf 2 de F. et ont débouché sur un succès dans la maîtrise de ce type de pratiques à F. La décision a donc été prise en 1984 de généraliser cette pratique à l’ensemble du site. Le second hf a donc été équipé d’une installation mise en œuvre début 1985 (766).

⁷⁶⁰ Entretien responsable des hf, Site de D., janvier 1996. L’exagération du temps (12 ans de marche sans injection contre 3 en réalité marque l’écart entre les philosophies suivies sur l’un et l’autre site).

⁷⁶¹ F. était le premier site à mettre en place ce type d’équipe de recherche interne sur les sites, selon le modèle japonais. L’un des pionniers des section technique à F., qui venait de l’Irsid, se souvient de cette période: “j’ai commencé à la Section technique des hauts fourneaux, c’étaient les premières d’ailleurs équipes disons qui avaient... de recherche interne au site, les premières équipes qui d’ailleurs étaient copiées sur les japonais, et c’est là donc qu’ont été formées les premières équipes de ce type là...” (Chef de Département Fonte, site de D., janvier 1996). Le créateur des Section Technique à D. se souvient aussi de la philosophie qui sous-tendait ce nouvel acteur de l’usine française, et dispensé par les consultants japonais: *“vis à vis de l’organisation, il faut aussi pas mélanger, il faut des gens qui aient le temps de faire davantage de process, de réfléchir au process...de travailler ensemble avec les exploitants bien sur, mais eux, les exploitants sont pris trop par le court terme, et il faut...ils n’ont pas toujours le temps d’approfondir. C’était presque l’aboutissement, enfin c’était la méthode japonaise quoi la Section technique.”* (Premier responsable des Section technique à D., janvier 1996)

⁷⁶² Bien que nous n’en ayons pas de trace directes, il est probable que l’origine massivement Lorraine des ingénieurs de F. a joué un rôle important dans la mise en place de ces collaborations.

⁷⁶³ Un second travail important a consisté à développer une philosophie du chargement et progressivement un modèle informatique de la distribution de la charge. Bouget, J. et Alii (1985) “Improvement of the charging practice of F. blast furnaces” in: *AIME. Ironmaking Proceedings*, Detroit 1985, pp. 553-563. NB: cette publication est intervenue au même moment que la publication de Grafeuille et Alii (1985) dans la même revue sur les pratiques d’injection à D. A noter aussi, un article du site de M. de J. steel relatant la mise au point d’un modèle informatique de distribution de la charge (Okuno, Y. et Alii, (1985) op cit. pp. 543-552.

⁷⁶⁴ La conjoncture n’était pas bonne pour la sidérurgie française en 1982. L’un des haut fourneaux de F. a du être temporairement arrêté. Durant les années 1981, le hf 1 de D a été progressivement arrêté et démolit. L’incertitude sur le nombre de haut fourneaux qui seraient en activité dans les années à venir a pesé à D. tout au long de la période considérée.

⁷⁶⁵ Bouget et Alii, op cit. p.560.

⁷⁶⁶ Guili, M. et Alii (1986) op cit.

En 1984-85, alors que D. commençait à investir dans l'injection de charbon, F. injectait de la vapeur d'eau et du gaz de cokerie. Une première étude sur le charbon a alors été entreprise à F. Des essais ont été réalisés avec des mélanges charbon-vapeur d'eau (slurry) qui présentaient l'avantage de pouvoir être injecter comme du fuel, déjà connu sur le site, et de ne pas présenter les mêmes risques d'explosion et les mêmes difficultés de manipulation que le charbon pulvérisé. Cette expérience s'est soldé par un double échec, puisque les calculs de taux de remplacement montraient que l'injection de charbon pulvérisé était beaucoup plus performante sur le plan technico-économique, et d'autre part, le succès éclatant de D. a montré que les craintes concernant la manipulation du charbon n'était pas fondée.

D'autres études ont suivi, en particulier, des essais d'injection ont été réalisés sur une tuyère, et en 1987, F. a commencé à monter un dossier documenté sur l'implantation de l'injection de charbon aux deux hauts fourneaux de l'entreprise. Nos interlocuteurs ont attribué ce 'revirement' à un contexte ayant évolué *“le contexte avait changé avec en particulier des hauts fourneaux qui produisaient un petit peu plus () donc l'équilibre coke avait changé et finalement, donc il y avait besoin effectivement de charbon à Fos”* ⁽⁷⁶⁷⁾⁽⁷⁶⁸⁾.

Malgré l'expérience acquise avant 1987 sur le site de D., et le rôle actif joué par un ingénieur ayant pu suivre et étudié avec l'Irsid le démarrage de l'injection sur le hf 2, les acteurs de F. ont largement rouvert les questions posées par la technologie d'injection pour adapter les installations au contexte local de F. Un chercheur en antenne sur le site soulignait la réouverture des questions et la minutie de la sélection *“quel système ils allaient utiliser, où est ce qu'ils allaient acheter, enfin quel type de broyage, quel type d'injection ()...ils avaient fait, je vous dis, ils avaient monté des dossiers techniques sur les performances, ils se renseignaient sur les types, enfin sur chaque.. donc sur les performances, sur les coûts, sur les problèmes qu'il peut y avoir en utilisation etc..”* ⁽⁷⁶⁹⁾.

Le processus a donc ressemblé à celui mis en œuvre dans le cadre de l'espace d'innovation de D. au moment de la mise en place de la première installation: les acteurs ont construit une demande et une offre de technologie. Le temps de mise en place entre le début de la constitution du dossier et la mise à feu de l'installation a été comparable à celle de la première installation commerciale de D. Les performances industrielles obtenus ont permis à l'installation d'être lancée un peu plus rapidement, d'être référencée sur une série plus large de faits industriels, d'essayer un peu moins de critiques et de scepticisme, de viser un taux d'injection de l'ordre de 100-120kg. Comme à D., le processus d'innovation a abouti à la mise en place d'une installation hybride, composée en fonction de

⁷⁶⁷ Entretien, ancien chef de Département Fonte de F., site de D., janvier 1996.

⁷⁶⁸ Pour un chercheur de l'Irsid, le changement de situation est lié au ralentissement de l'activité de la cokerie.

⁷⁶⁹ Entretien chercheur Irsid, janvier 1996.

références et de spécifications spécifiques à F. et à son processus d'exploration de la technologie pci. Cette hybridation est bien rendue par les propos du chef de Département de l'époque déjà cité précédemment

“A ce moment là, on est allé voir un peu partout.. bien entendu, on a choisi délibérément, enfin on a quand même, effectivement on s'est quand même extrêmement inspiré de D., ça c'est clair. On a donc décidé dès le départ de faire une injection de charbon pulvérisé, c'est à dire fin, comme ça marchait à l'Armco et comme ça s'est développé à D. Donc ça c'était décidé. Au point de vue ensuite, disons de la technologie, parce que, hein, une fois qu'on a dit ça, disons qu'après c'était la technologie, et il fallait trouver un constructeur d'installation capable de.. enfin.. en lequel on ait confiance, et qui ait quand même des références. Alors comme D. avait développé plusieurs systèmes, donc on avait quand même une idée effectivement, disons des technologies, en plus effectivement, on a également eu des contacts avec Sidmar, Sidmar donc à Gent, qui a développé aussi, donc avant nous et avant Fos, l'injection de charbon, et on a donc pris comme fournisseur essentiel pour l'injection Paul Würth, qui était le fournisseur de Sidmar, et bon, ses hauts fourneaux marchaient bien, sachant qu'il y a aussi une installation à D.”.

L'un des points illustratifs de la flexibilité des choix technologiques - et donc du caractère instable des boîtes noires technologiques formées à D. - est le cas de broyeurs. Le choix des broyeurs semble avoir constitué l'un des points de débat entre les différents protagonistes. L'usine de F. semble s'être déclarée favorable à l'adoption de broyeurs à meules, dits verticaux, du même type que ceux installés à Sidmar. Pourtant, les broyeurs retenus ont finalement été horizontaux, à boulet, du même type que ceux de D. *“et puis par contre pour le broyage, on a pris aussi, donc le pulvérisé, mais alors là on a gardé le principe de D.”.* La solution retenue a été vécue comme un coup politique 'venu d'en haut':

“il y avait une solution un peu différente, qui était la solution Sidmar, qui sont des broyeurs à meule, qui sont beaucoup plus ramassés, plus bas, beaucoup plus souples, mais là nous avons eu des impératifs politiques de la part de F. lui-même qui nous a, dans les fournisseurs il y avait donc des fournisseurs soviétiques pour la partie broyage, à l'époque en vertu disons de relations privilégiées entre le groupe et l'URSS de l'époque, il y a eu un oukaz 'vous prenez russe'! Et alors on a pris russe...”.

Pendant plusieurs années ensuite, F. a eu la particularité d'injecter à la fois du charbon pulvérisé et du gaz de cokerie. Puis à partir de 1992, les hauts fourneaux de F. ont injecté du charbon pulvérisé (⁷⁷⁰).

Le second pôle local de développement technologique de PCI est également tout à fait singulier. En contradiction avec les hypothèses formées sur les échecs technologiques rencontrés dans les années 1950 et 1960 dans le domaine de l'injection de charbon, lesquelles ont abouti à la conclusion largement partagée que les expériences réussies avaient reposé sur un broyage très fin du charbon (⁷⁷¹)(⁷⁷²), l'usine de P. a mis en chantier la création de sa propre technologie d'injection,

⁷⁷⁰ Entretien Steiler, JM et Alii (1995) “Development of Coal Injection in the Blast Furnace at F. steel” in: IISI, op cit. pp.15-32.

⁷⁷¹ Un chercheur se souvient des conclusions de l'équipe chargée de la recherche sur le charbon, et du point essentiel représenté par la granulométrie “je me souviens de leurs conclusions en particulier qui consistaient à dire "ben oui ça marche un peu mieux en Angleterre" -d'ailleurs je crois que par la suite ils ont d'ailleurs abandonné aussi- oui ils ont abandonné, c'est sûr- "parce que ils le broient plus fin", donc la question de la granulométrie, et il y avait effectivement un broyage plutôt grossier, dans le cas de L. (essai français)”

⁷⁷² En 1988, d'après l'étude de Gathergood (1988), seule l'entreprise de British Steel Corporation injectait du charbon grenu avec une consigne identique à celle retenue à P (90% inférieure à 2mm). Toutes les autres sociétés ont opté pour le charbon

fondée sur une injection de charbon grenu (90% < 2 mm), c'est à dire un broyage souvent qualifié de 'grossier'. Une fois encore, l'ensemble des questions technologiques ont été rouvertes, une nouvelle technologie élaborée, et l'engagement a été fortement marqué par une série de contingences 'locales'.

Des discussions ont pris place en 1986, entre la direction de l'entreprise et le site de P. Le site a manifesté son souhait de mettre en place une série d'installations d'injection de charbon, anticipant une très bonne rentabilité du projet, étant donné sa sous-capacité en coke. Pourtant, en 1986 et 1987, ces projets ont été rejetés par la direction. Les motifs invoqués semblent avoir été liés à la mauvaise conjoncture économique et la mobilisation prioritaire des investissements sur d'autres cibles et en particulier sur des installations permettant de ne pas perdre de part de marché (procédés aval de mise en forme des produits). Devant cette situation, une autre forme d'engagement a été trouvée, que le chef de projet de l'époque résume en ces termes: *"En 1987, alors que la situation financière des entreprises ne permettait toujours pas de dégager les crédits nécessaires, l'équipe du service technique des hauts fourneaux de P. a été chargée de concevoir, dans le cadre d'une démarche participative avec l'ensemble des services de l'usine de P. un nouveau procédé d'injection de charbon encore plus compétitif que ceux qui étaient offerts par les équipementiers. Ainsi, un dispositif industriel original d'injection de charbon a été imaginé"* (773). On reconnaît là les termes d'une problématisation ayant ouvert un nouvel espace d'innovation. Puisque les équipements d'injection de charbon pulvérisé proposés sur le marché représentaient un coût trop élevé dans le contexte de l'usine de P., le chef de projet a donc pris en charge un projet d'innovation complet incluant la définition d'une technologie ad hoc respectant un objectif de minimisation du coût d'investissement et de fonctionnement.

En 1985, les ingénieurs de British Steel ont publié un article (paru dans le même numéro de l'AIME que celui de Grafeuille et Al), présentant un fait industriel plus qu'inattendu dans le monde des hauts fourneaux: ils avaient réussi à mettre au point une installation d'injection de charbon grenu, et cette installation produisait des résultats tout à fait comparables à ceux obtenus avec PCI, tant en terme de niveau d'injection (70 kg annoncés), qu'en terme de taux de remplacement (estimé à 0.94) (774) avec un coût d'investissement nettement moindre. Une granulométrie plus grossière permettait, d'après les auteurs de gagner sur les coûts d'investissements de l'installation (réduction des coûts liés aux aspects sécurité et difficulté de manutention du charbon), mais aussi sur les coûts de fonctionnement (coûts de broyage inférieur).

pulvérisé. Au Japon, la consigne Armco (80% inférieur à 75 microns) a été respecté à la lettre par toutes les entreprises sauf K (50% inférieur à 44 microns). En Europe, la granulométrie a été plus variables autour de cette tendance, la valeur maximale retenue étant (90% inférieur à 200 microns). Dans le reste du monde, toutes les entreprises ont respecté la consigne Armco à la lettre. 28 sociétés et 53 haut fourneaux ont été recensées dans cette étude. 1 société et 3 haut fourneaux représentaient l'option grenu.

⁷⁷³ Flamion, D. (1990) "Injection de charbon grenu à P & R" in: Revue de Métallurgie, mai 1990, pp. 433-438.

⁷⁷⁴ Maldonado, R. (1985) "Granular Coal Injection into the Blast Furnaces at the Scunthorpe Works of the British Steel Corporation" in: AIME, Ironmaking Proceedings, op cit. pp. 425-435. BSC a développé son système d'injection au début des années 1980, en association avec une société d'ingénierie, Simon-Macawber.

“en Angleterre aussi, il y a eu un développement à Scunthorpe, et Scunthorpe, curieusement, alors que nous, on disait, ‘pour que ça marche il faut du pulvérisé’, curieusement Scunthorpe est reparti avec du charbon granulé, c’est à dire du charbon grossier. Broyé quand même, mais enfin beaucoup plus grossièrement. Alors ça c’était quand même une surprise, on s’est posé des questions, c’était quand même pas évident parce que bien entendu je pense qu’il y a beaucoup de gens qui avaient expliqué pourquoi ça marchait pas en granulé et puis pof, ça marche {rires}, surprise! quand même.. et donc comme les investissements sont moins lourds, parce que les investissements de broyage c’est quand même lourd, donc L. a bâti une installation un peu originale, un peu par les moyens du bord, l’objectif étant d’éviter des investissements....”⁽⁷⁷⁵⁾.

Un système inspiré de la technologie britannique a donc été mis au point sur un pilote local, installé sur l’un des hauts fourneaux de D. De l’arrivée du charbon à son injection dans le haut fourneau, la technologie a été conçue par une équipe locale. L’apprentissage a été largement idiosyncrasique, la plupart des choix stabilisés par D. ayant été révisé. Les coûts d’investissements annoncés et les résultats obtenus dans les essais ont permis au chef de projet de convaincre la direction d’allouer une série de crédits et d’équiper 4 hauts fourneaux de P&R, en 1988, 1989 et 1990. Une société, “Carbinject” a été créée pour commercialiser le procédé baptisé PACHA, en association avec une société d’ingénierie. Un article a été publié en 1990 pour faire part du succès de l’opération.

Malgré les succès britanniques, et les investissements français, bien des doutes continuent à subsister dans les esprits concernant cette voie technologique:

“j’ai des doutes sur la combustion de charbon. Quand même, des lois de la physique qui disent que ça brûle mieux quand c’est fin que quand c’est gros et je dirais, c’était pas le problème dans la plage où on était. On a peut-être fait trop de résistance là dessus, à l’époque, mais c’est la technologie qui est insuffisante, c’est pas le concept, la technologie qui a été inspirée des anglais, mais qui malheureusement ne fonctionne pas aussi bien que les trucs anglais.”⁽⁷⁷⁶⁾.

La localisation de l’espace d’innovation a été importante. Récemment pourtant une série d’acteurs externes sont intervenus pour réviser le système technique, identifier les sources essentielles de dysfonctionnement et proposer des solutions. La plupart de ces acteurs externes manifestent leur désaccord avec les options technologiques retenues:

“Ils ont pour, quelques millions de francs, ils ont fait une démonstration qui a réussi à convaincre leur direction de l’époque () qu’on pouvait faire du charbon autrement que les autres, c’est à dire que les gens de D., et pour beaucoup moins cher en terme d’investissement, et je dirais, 15 ans après on s’en mord encore les doigts. Parce que au début, ça a marchouillé à peu près, mais c’était des points de fonctionnement à 60-80 kg de charbon, et on a étendu sur plusieurs hf, c’était l’expérience maison, mais euh, l’expérience a montré que c’était pas fiable” (siège F. steel) ou encore “c’était le système Pacha, Pacha ça voulait dire P. Charbon, les mauvaises langues disent “ça voulait dire, pas de charbon” {rire} parce que bon c’était quand même un système un peu tordu, au lieu de faire du charbon pulvérisé, on faisait du charbon grenu, avec un système qui mécaniquement était très compliqué, c’est à dire beaucoup d’élévateurs, de bandes, etc... euh, ça produisait pas, c’était tout le temps en panne, il y avait des frais d’entretien absolument monstrueux, et puis en plus aussi, un système d’injection particulier, avec des extracteurs, non plus alvéolaires, mais des vis sans fin, un peu particulier, très limite, enfin qui pose toujours des problèmes.” (Irsid).

Destin collectif de l’alternative F.steel-Paul Würth

⁷⁷⁵ Entretien chef de Département site de D., ancien responsable Département Fonte de P&R.

⁷⁷⁶ Entretien siège de F. steel, janvier 1996.

Dans une certaine mesure, le fait industriel annoncé par F.steel ouvrait la voie au développement d'alternatives technologiques ne passant pas exclusivement par Armco. Nous ne disposons pas de données qui nous permettraient de définir avec précision l'influence de cette première expérience commerciale basée sur une technologie non affiliée à Armco. Il est très probable que les alternatives ayant donné lieu à des installations dans la première moitié des années 1980 n'ait été qu'indirectement influencé par les résultats obtenus à D. Or, à part Paul Würth et Armco, deux autres sociétés d'ingénierie ont développé des systèmes d'injection dans ces années cruciales. Klökner, une société allemande, s'est, d'après nos interlocuteurs appuyés sur son patrimoine dans le domaine du transport pneumatique pour développer un système d'injection lui permettant de valoriser celui-ci. McCawber, une petite société d'ingénierie britannique a développé, sur la demande spécifique de British Steel, un système d'injection grenu unique en son genre. Si l'on excepte Kuttner, qui s'est associé à Paul Würth dans la seconde moitié des années 1980 pour développer un système d'injection statique, aucun nouvel entrant n'est apparu après 1985.

Paul Würth a rapidement dominé le marché européen et est aujourd'hui le principal fournisseur mondial d'installation d'injection au haut fourneau, un appareil ayant même été acquis par le japonais NKK à la fin des années 1990.

Fonctions de production

Le cas de la sidérurgie est particulièrement intéressant du point de vue de la rationalisation et de sa mise en œuvre, du fait que les investissements y sont élevés et durables. Une erreur coûte chère, mais de plus, elle déséquilibre durablement la fonction de production, et peut se trouver à l'origine d'un 'désavantage' compétitif. Commentant un exemple d'erreur d'investissement un acteur soulignait ainsi: *"15 ans après on s'en mord encore les doigts! () ça nous a fait perdre beaucoup d'années en terme de développement technique donc, on a encore des dossiers d'investissement qu'on ne peut pas traiter pour rattraper des trucs qui ont été fait il y a 10-15 ans. Pendant ces 10 ans, on a perdu le bénéfice qu'on aurait pu avoir si on avait eu un truc qui.."* (777). La mise en place de procédures et de capacités de décision et d'anticipation à long terme forme donc un élément essentiel de la performance des entreprises dans ce secteur. Ces difficultés sont encore renforcées par le fait que le nombre d'investissements est relativement limité, singulièrement dans le cas des hauts fourneaux, et par conséquent, la dynamique d'apprentissage doit s'appuyer sur un petit nombre de cas (à peine une dizaine dans le cas de J et F. steel) pour bénéficier d'effet d'économie d'échelle.

Chez J. steel, après une exploration large et minutieuse menée dans le cadre de l'espace d'innovation, la rationalisation de l'innovation a pris la forme d'une rapide amélioration de la technologie existante, suivie par une rapide stabilisation des arbitrages et des principes d'une

installation modèle, susceptible d'être utilisée par une multitude de sites. D'après les évaluations très documentées de J. steel, l'installation type dont le PET était dépositaire en 1983 constituait le sommet de l'état de l'art de l'époque. Il ne restait donc à J. steel qu'à généraliser cette installation, en reproduisant une série d'équipements et d'outils de réglage et de mesure semblables sur les sites de l'entreprise et au-delà. J. steel offre véritablement un cas d'école de ce type de rationalisation.

Chez F. steel, après une exploration ad-hoc dans le cadre de l'espace d'innovation, la rationalisation de l'innovation a pris la forme d'une rapide exploration des limites de l'utilisation et des potentialités économiques et techniques de l'injection de charbon. La démonstration a permis aux managers des sites de F.steel de compter l'injection de charbon parmi les technologies attrayantes susceptibles de fournir une solution à leur déséquilibres énergétiques éventuels, et de favoriser la marche stable et efficace des hauts fourneaux. Chaque usine a en quelque sorte rouvert un espace d'innovation localisé au moment où cela lui a paru opportun, contribuant à une situation globale très diversifiée, où une multitude de systèmes ont coexisté.

⁷⁷⁷ Entretien direction technique, siège de F.steel, janvier 1996

Conclusion

Il peut paraître étonnant, voir contestable de traiter de la question de la standardisation à partir de l'exemple de PCI, puisque cette technologie, devenue dominante (lock-in) n'est pas standardisée (dominant design) pour autant. Cela permettait à un expert de dire qu'après 15 années de développement, PCI était toujours l'objet de développements 'maison', mais n'est "pas encore stabilisé": "chacun a sa petite idée".

Deux des meilleurs spécialistes mondiaux des injections au haut fourneau s'efforçant de faire le bilan des connaissances acquises sur PCI en 1990, après dix années de développement rapide constataient: "*There are not only extremely contradictory opinions concerning the factors limiting the PCI rates but apparently also the experimental evidence and the practical experiences gained on different furnaces are equally divergent*" (⁷⁷⁸).

Pourtant, nous avançons que cet 'échec' ou "demi succès" de la standardisation permet à l'inverse de mettre en lumière une série d'éléments qui auraient été invisibles si le succès avait été complet. La question de la standardisation c'est J. steel qui essaie de fidéliser F. steel au point de devenir son seul et unique fournisseur. Le cas PCI nous montre comment, dans le cas de la sidérurgie, une entreprise peut devenir productrice ou utilisatrice de technologie.

L'analyse détaillée des efforts déployés par J. steel nous révèlent les mécanismes par lesquels une innovation d'abord localisée peut faire l'objet d'une standardisation technologique, lorsque son producteur réussit à en faire un élément incontournable d'un espace technologique. Les entreprises japonaises se sont historiquement illustrées par leur virtuosité dans le domaine.

1) Logique de re-production d'une fonction de production homogène

Les représentations des utilisateurs de l'espace d'innovation ont mis en avant les points communs entre ceux-ci. Ainsi, la définition de l'innovation a été inscrite autant que possible dans le cadre des réseaux existants. Le charbon a été autant que possible glissé à la place jadis occupée par le fuel. Le choix d'un haut fourneau représentatif a permis d'élaborer une technologie dont les principaux éléments devaient être aisément transférables.

Le processus d'investissement innovatif s'est efforcé de mettre en place une logique d'accumulation, d'irréversibilisation permettant la reproduction de la technologie.

La prise en main de l'installation, puis l'engagement à long terme des acteurs se sont appuyés d'emblée sur la prise en considération d'un collectif d'utilisateurs intéressés, faisant valoir leur commun accord.

2) optimisation fondée sur l'établissement d'une frontière entre objet technique et environnement

L'autonomisation de l'objet technique a été optimale. Elle a reposé sur le tracé rapide d'une frontière entre éléments communs et éléments variables d'une installation à l'autre. Les éléments communs ont été prioritairement incorporés dans l'objet technique. Les éléments variables ont été pris en charge par des objets complémentaires et par les compétences humaines accumulées dans la section centrale d'ingénierie.

D'installation en installation, les compétences humaines impliquées dans la production et dans l'utilisation de l'installation ont été simplifiées par l'amélioration progressive des outils.

3) circulation

Dans un tel univers marqué par l'homogénéité, les connaissances produites en un point du réseau homologique possèdent une validité sur l'ensemble du réseau. Il en va de même des outils et des personnes, qui qualifiées en un point acquièrent alors une qualification à validité générale au sein de ce marché interne.

Que nous apprend Pci sur la standardisation et ses mécanismes?

Une manière d'aborder la question consiste à se demander pourquoi J. steel a échoué, et n'est pas devenue, malgré les moyens déployés, l'avantage du premier actant (first mover advantage), les apprentissages réalisés, l'auteur d'un 'robust design'.

J. steel n'a pas réussi à imposer une technologie incontournable d'injection de charbon pulvérisé. J. steel a réussi à tracer les frontières d'un espace technologique dominé, en inscrivant son innovation dans la continuité de la technologie Armco-Babcock. Elle a réussi à optimiser le design de son innovation pour en faire un bien susceptible de circuler largement autour du monde. Mais J. steel

⁷⁷⁸ Poos, A & Ponghis, N. (1990) "Potentials and problems of high coal injection rates" in: AIME Ironmaking Conference Proceedings, pp. 443-453.

n'a pas pu contrôler le contournement de ce patrimoine par d'autres entreprises, et le développement d'une multitude d'alternatives et d'expériences industrielles qui sont entrées en concurrence avec le monde qu'elle essayait de faire partager à d'autres acteurs. Malgré l'adoption massive des injections de charbon pulvérisé, aucun design singulier ne s'est trouvé en mesure de s'imposer.

Cela contredit radicalement la thèse d'Arthur. Même si l'on peut comprendre le travail de l'auteur en mettant en avant la domination du charbon pulvérisé sur le charbon grenu, le fuel et le gaz, indépendamment des designs et des variantes particulières, cette thèse demeure insatisfaisante. Comme l'ont montré fort justement Foray et Grübler, celle-ci repose sur une organisation de l'espace technologique autour de la notion de distance. Lorsqu'une technologie est trop distante, les effets de réseaux et les rendements croissants d'adoption ne peuvent jouer que marginalement. Lorsque la distance est faible, différentes variantes d'une même technologie peuvent bénéficier des mêmes rétroactions positives, donnant ainsi lieu au déploiement d'une trajectoire. Ce point de vue est arbitraire et ignore, comme nous l'avons montré, la capacité de l'innovation à ouvrir de nouvelles perspectives technologiques. A titre illustratif, notons que PCI a bénéficié de certaines inventions élaborées dans le cadre de l'injection de fuel, et de l'injection de gaz. Les brevets déposés dans le cadre de l'injection de charbon grenu se réfèrent abondamment à ceux de l'injection de charbon pulvérisé. A l'inverse, les brevets de l'alternative Armco et de l'alternative Würth s'organisent méticuleusement autour de références distinctes, les unes centrées sur un patrimoine américain, et les autres sur un patrimoine européen, permettant de les différencier. De façon plus générale, les brevets déposés associent des corpus de référence largement hybrides du point de vue technologique et très distincts les uns des autres.

L'une des hypothèses avancées concerne la simplicité technologique de PCI, laquelle aurait permis à une multitude de firmes d'entrer dans la course à la production "on est pas dans la standardisation car PCI est techniquement simple" ⁽⁷⁷⁹⁾. Malgré l'ambiguïté du terme 'simplicité technique', il est possible d'appréhender PCI sous cet angle. Le BOF aurait constitué une technique complexe, difficilement imitable, et l'injection de charbon constituerait une technologie simple, requérant des développements de R&D minimales. La possibilité de contourner une alternative tiendrait donc à la simplicité de l'objet technique. Si K. steel et Paul Würth ne s'était pas trouvé en mesure de mettre au point rapidement des objets techniques alternatifs, J.steel se serait trouvé en position monopolistique. A l'inverse, J.steel a compté sur l'accumulation de savoirs technologiques exceptionnels pour asseoir sa stratégie de standardisation. Elle s'est auto-proclamée héritière du patrimoine technologique mondial en matière d'injection de haut fourneau, et a relégué rapidement la technologie Armco dans le passé.

La seule interprétation de cette thèse qui ne soit pas triviale - c'est à dire ramenant la complexité technique à l'état des savoirs techniques- consiste à poser que Voest-Alpine aurait acquis une telle avance technologique sur ses concurrents, qu'il aurait été difficile à ceux-ci de réaliser un objet technique identique ou comparable. Le travail historique de Lynn (1982) réfute cette hypothèse. Par ailleurs, du point de vue de la trajectoire technologique, J.steel semblait bien avoir acquis une base de savoir très distinctive au début des années 1980 en capitalisant les développements d'Armco et sa propre élaboration.

Les mondes de J. steel et de F. steel sont entrés en tension dans la représentation que chacune de ces entreprises s'est efforcée de promouvoir à travers ses articles. L'expérience industrielle de D. a contribué à relativiser la validité des savoirs de J. steel. Dans le monde des hauts fournistes, les savoirs pratiques et les observations empiriques faites sur des installations commerciales sont demeurées une référence incontournable.

La standardisation représente donc une 'stratégie' de stabilisation et de domestication des forces naturelles à grande échelle, tout à fait intéressante de part la régularité des succès obtenus. Le premier avantage de la standardisation n'est peut être pas d'éliminer les risques d'isolement technologique - le cas de British Steel semble indiquer que cette situation peut être très vivable- mais plutôt de limiter le risque d'échecs de l'investissement. Le travail de standardisation et d'autonomisation de l'objet technique réalisé par les premiers acteurs peut alors bénéficier à leurs successeurs qui peuvent les mobiliser aisément sans avoir à rouvrir l'ensemble des questions et des arbitrages sur les conditions de production et d'utilisation de la technologie.

La standardisation ouvre, outre la possibilité souvent soulignée de bénéficier cumulativement d'améliorations réalisées localement (increasing returns) pour l'ensemble de ses adopteurs, l'opportunité de construire un véritable cadre d'action collectif commun facilitant les échanges, les comparaisons, les circulations d'objets et de personnes, et de manière plus générale, optimise les investissements de forme. Peu ou prou, les technologies russes et chinoises ont souffert de ne pas appartenir à un monde commun du haut fourneau avec les japonais et les européens, et leur offre technologique n'a pas été prise au sérieux. Cela permet de saisir éclairée pourquoi des acteurs 'rationnels' adoptent volontiers des comportements coopératifs en matière de publications dans l'industrie. La standardisation suppose un investissement important et une compétence forte pour effectuer la remontée sur les conditions de production. L'entreprise japonaise J. steel, a acquis au prix fort la capacité à produire par elle-même la technologie sans aide extérieure, et la capacité juridique de la revendre. Cet engagement de départ liait l'entreprise à un design standardisé, et à un certain nombre de choix technologiques.

⁷⁷⁹ Entretien Direction Fonte, ATS, janvier 1997.

Par contraste, la flexibilité technologique maintenue par une généralisation non standardisatrice présente également certains avantages. Comme il a souvent été dit, cette 'stratégie' permet d'explorer un spectre plus large de technologies, au concret, et de limiter le risque global d'erreur dans la sélection d'une technologie. Cependant, en favorisant une exploration large, il devient difficile d'accéder à une certaine cumulativité, qui forme souvent la base du succès ou de l'échec. Le risque d'échec est donc globalement plus élevé. L'un des avantages que procure la non standardisation est sans doute la capacité d'évolution et de réaction rapide liée à une irréversibilisation moindre.

Que nous apprend le cas pci sur la standardisation au sens industriel du terme? Si F.steel ne possède pas une technologie standard, néanmoins, bénéficie t-elle des effets de la standardisation globale de pci, par l'intermédiaire du marché. L'une des options les plus raisonnables consiste par exemple à considérer que pci, gci, com, slurry, cog ont formé une série de technologies en compétition. La concurrence entre gci et pci est particulièrement pertinente car elle limite les effets liés strictement à la fluctuation des prix relatifs. Deux éléments nous semblent essentiels. Premièrement, la connaissance, partagée par la communauté des hauts fournisseurs, que le charbon grenu n'est pas injectable, et pas combustible. Cette connaissance a continué à être partagée sur toute la période. Deuxièmement, les échecs rencontrés dans les premières étapes en injection de charbon grenu et les succès rencontrés en charbon pulvérisés. Ces épreuves ont fortement structuré les représentations collectives. Path dependence au sens où ces petits événements ont permis à Armco de prendre une longueur technologique d'avance en stabilisant une technologie commerciale et brevetée. Cependant, à partir de 1984-5, la supériorité de l'injection du pulvérisé n'était plus assurée: le charbon grenu était moins coûteux. A partir de 1985, une entreprise avait démontré que l'injection de grenu était possible et économique. Pourtant, les adoptions ont continué à se faire massivement en faveur du pulvérisé, malgré l'attrait économique du grenu. Montre le rôle essentiel des fondements cognitifs et des représentations partagées. Montre le poids des investissements consentis.

En 1988, F. steel a construit son propre système gdi, après avoir été leader en matière d'injection de charbon pulvérisé. Cela indique que la forme de la généralisation est fondamentale dans le maintien d' options technologiques.

Au Japon, même si J. steel n'a pas réussi son pari sur le plan commercial, la diversité des technologies est nettement moins forte qu'en Europe, ou même en France.

On constate que la standardisation consiste, non pas simplement à cristalliser un design ('freeze a design' Freeman, C. 1994), mais à dessiner le tracé d'une frontière entre ce qui est commun et ce qui ne l'est pas, entre ce qui peut être reproduit et ce qui doit rester flexible. Du côté du

reproductible, la boîte noire, les questions réglées, les réponses prêtes. Du côté du local, du contexte, l'expertise nécessaire à l'utilisation, à l'application du modèle. La question centrale de la standardisation pourrait bien être, non pas 'when to freeze' (David 1987) mais 'what to freeze'. De même, la standardisation n'a de validité longue que si le design standardisé évolue incrémentalement pour intégrer les évolutions locales et les capitaliser. En ce sens, la standardisation renvoie à un mode d'apprentissage lié à un mode de coordination 'central'. Parce qu'il ne constitue pas un exemple de production de masse, le cas PCI montre avec une évidence singulière ce qui vaut, y compris pour les objets techniques apparemment les plus standardisés, les plus fermés: l'établissement d'une frontière entre ce qui est rigidifié et ce qui est laissé flexible, ouvert à l'influence du contexte d'inscription de l'objet technique (Akrich 1987). Cet arbitrage définit les modalités et l'étendue du poly-usage.

Les effets bénéfiques de la standardisation sur l'apprentissage ont été largement soulignés dans la littérature économique, à travers le concept d'increasing returns. Cela vaut bien entendu pour les améliorations conduisant à un coût réduit de l'installation. Nous avons évoqué en détail le travail réalisé par le groupe de réflexion ad hoc créé pour satisfaire les exigences de réduction de coût des utilisateurs potentiels. Un phénomène très commenté concerne les améliorations réalisées au fil du temps et incorporées dans le design de l'objet technique. La mise en commun d'un modèle similaire facilite l'élaboration et le partage d'expériences locales. L'exemple du crible réalisé à O. pour faire face au problème de la qualité du charbon est très parlant. Son intégration progressive dans le design commun a bénéficié à l'ensemble des sites de l'entreprise.

Au-delà des aspects purement matériels de l'échange, il est utile de noter que la standardisation favorise la mise en place d'une commune mesure entre les sites qui peuvent ainsi plus facilement échanger des données, comparer des situations, anticiper des problèmes ... L'incorporation progressive d'amélioration renforce la robustesse du design retenu en le prolongeant dans l'avenir. La robustesse peut ainsi être comprise comme la capacité à trouver une efficacité dans différents contextes, à résister à différentes conditions, à différentes mises à l'épreuve. Comme le soulignait un acteur, le point ultime de cette standardisation est la production d'une boîte noire dont les acteurs n'ont plus à se soucier 'le fourneau, il marche!'

Malgré la forte rationalisation de l'investissement, cependant, cette mise en boîte n'a pas réellement pu aller à son terme. Les hypothèses forgées se sont révélées plus fragiles que prévues, les utilisateurs extérieurs n'ont pas reconnu le caractère incontournable de la technologie possédée par J. steel, les connaissances fondatrices se sont transformées en sable mouvant.

CONCLUSION

“FA Hayeck (1945, p.523) once wrote that ‘economic problems arise always and only in consequence of change’. Our argument is the converse : as change diminishes, economic problem recede. Specifically, as learning takes place within a stable environment, transaction costs diminish.”
(Langlois et Robertson 1995, p.29⁷⁸⁰)

I Innovation et diffusion technologique dans le cas des hauts fourneaux à injection

Au terme de cette recherche, nous pensons avoir montré que le développement technologique, s'il suit bien une logique cyclique conformément aux théories récentes de la standardisation, et aux travaux pionniers réalisés dans les sciences de gestion par des auteurs comme Abernathy et Utterback, repose sur des fondements cognitifs qu'il est essentiel de comprendre et d'étudier. Le changement technique est ainsi à la fois source essentielle de croissance et de prospérité, et facteur de perturbation à l'origine des principaux problèmes économiques, selon le mot de Hayeck. L'apprentissage constitue dès lors le principal vecteur de régulation et de stabilisation de nouveaux cadres, de nouvelles ressources, de nouvelles configuration facilitant la production et l'échange entre acteurs économiques (Langlois et Robertson 1995). C'est ainsi les phénomènes cognitifs soutenant l'apprentissage industriel que cette thèse s'est efforcé d'identifier et de comprendre.

Au niveau de la firme, l'innovation s'analyse ainsi comme un investissement destiné à produire les ressources et les cadres, tout particulièrement les connaissances et les compétences, nécessaires à la maîtrise de nouvelles voies technologiques. C'est à ce niveau micro-économique de la création technologique qu'est générée la variété technologique. Au niveau industriel, la convergence technologique repose sur l'élaboration d'un cadre cognitif collectif permettant la coordination inter-firme et l'accumulation de connaissances collectives. A ce niveau méso-économique, la généralisation des connaissances déclenche les mécanismes de sélection technologique et l'émergence d'une technologie dominante. Cette structuration de l'apprentissage industriel autour de savoirs communs ouvre la voie à d'importants rendements croissants. Comment des firmes individuelles génèrent t-elles les connaissances nécessaires à la maîtrise de nouvelles voies technologiques? Comment les connaissances ainsi créées sont elles transformées en savoirs communs, en base de connaissance technologiques formant une ressource pour l'industrie dans son ensemble ? Quels sont les mécanismes de coordination impliqués dans la formation de ces savoirs communs et dans leurs approfondissements ?

1) Une théorie cyclique du développement technologique

L'étude de l'espace technologique des injections au haut fourneau (partie 1) nous a permis de confirmer la pertinence du concept de trajectoire technologique et des théories cycliques du développement technologique (Abernathy 1978, David 1992, Utterback et Suarez 1993, Foray 1996). Les pratiques d'injection d'hydrocarbures au haut fourneau sont progressivement devenues dans la

⁷⁸⁰ Langlois, R., Robertson, P. (1995) *Firms, Markets and Economic Change. A Dynamic Theory of Business*

période d'après guerre l'une des techniques clés, un élément caractéristique des grands hauts fourneaux modernes. Après une période exploratoire pendant laquelle différentes voies technologiques ont fait l'objet d'investigations et se sont trouvées à l'origine du développement d'objets techniques aux caractéristiques diversifiées, ouvrant différents possibles – création de variété technologique -, une compétition s'est ouverte entre différentes alternatives, sur la base de la mise en place d'irréversibilités. L'injection de fuel, rapidement disponible, bénéficiant d'un 'sponsorship' de la part des grands groupes pétroliers et de prix relatifs favorables, objet d'importants investissements en R/D, a fini par devenir une ressource essentielle et même un investissement incontournable pour les hauts fourneaux, évinçant progressivement l'ensemble de ses concurrents. Dans ces conditions, conformément à la thèse d'Arthur, la dynamique d'adoption a stimulé le développement technologique, et fait évoluer les conditions de la profitabilité des investissements au fil du temps via les rendements croissants.

Pourtant, le cas des injections invite également à nuancer l'approche proposée par Arthur (Arthur 1989) et à s'interroger sur les conditions, et en particulier les conditions cognitives et institutionnelles dans lesquelles les rendements croissants peuvent prendre place. La formation d'irréversibilités, centrale dans le modèle, demande à être éclaircie. Si l'innovation consiste bien en un effort destiné à créer les ressources et les conditions d'une accumulation, la stabilisation et la fiabilisation demeure le plus souvent relative et imparfaite. L'univers de la production demeure menacé d'instabilité, et la domestication repose sur des connaissances et compétences approximatives et imparfaites, soumises à des changements intervenant dans l'environnement. L'activité de maintenance indique bien que, y compris, dans l'univers stabilisé de la production, les firmes ne peuvent compter que sur une fiabilité relative : des ruptures et imprévus, des instabilités continuent à se manifester y compris dans les domaines technologiques les mieux maîtrisés. L'injection de fuel s'est ainsi trouvée disqualifiée par le jeu de la crise pétrolière, rappelant aux hauts fourneaux que les investissements cumulatifs qu'ils avaient consentis reposaient sur la formulation et le contrôle étroit d'une série d'hypothèses balisant l'univers dans lequel la technologie trouvait son efficacité. Au-delà du simple jeu des prix relatifs, cet épisode indique la fragilité toujours importante des irréversibilités constituées: celles-ci paraissent s'imposer naturellement et semblent incontournables aux agents économiques lorsque leurs effets sont efficaces, mais les capitaux et réseaux accumulés peuvent aussi bien connaître une obsolescence rapide lorsqu'un grain de sable vient gripper les rouages de leur déploiement. Cette rupture permet également de mettre en évidence un phénomène fondamental : la maîtrise acquise par les firmes repose sur la construction de connaissances et d'hypothèses fondatrices sur les états de l'économie et de la nature, connaissances dont le domaine de validité est nécessairement limité.

Dans le cas qui nous intéresse, la technologie d'injection de fuel et son développement ont été basés sur des anticipations de la part des entreprises sidérurgiques en matière de prix relatifs des matières, extrêmement favorables au fuel. Soulignons qu'en la matière, il ne s'agissait pas d'intuitions mal informées. Au contraire de véritables études ont été menées pour alimenter les anticipations à la fois sur les réserves des principales énergies, sur les perspectives d'évolution des prix relatifs. La guerre intervenue au Proche-Orient a invalidé ces hypothèses posées au développement de la technologie, et précipité la chute de l'adoption et même de l'usage de l'injection de fuel : certains équipements en parfait état de fonctionnement ont dû être abandonnés. Des cas similaires de réversibilisation rapide ont été rapportés par Akrich (Akrich 1987, 1989), Callon (Callon 1980⁷⁸¹) Gibbons et Alii (1979⁷⁸²), et Latour (1992⁷⁸³), cas dans lesquels les hypothèses invalidées ont pu être indifféremment d'ordre technique –lié à une mauvaise anticipation du comportement de la nature et de ses forces - ou économique – lié à une mauvaise anticipation ou au changement soudain des conditions d'approvisionnement, des conditions de marché, des conditions de production du nouveau produit ou procédé-. Il faut y ajouter le cas de changement institutionnels brutaux comme celui de la réglementation intervenue sur les CFC (Lanciano et Alii 1995⁷⁸⁴) ou celui de la réglementation sur la pollution de l'air ('clean Air Act') menaçant directement la filière fonte et les cokeries (ce volume). Les cas de réversibilisation présentés dans la littérature interviennent le plus souvent dans les premières étapes du développement technologique, mais ne s'y limitent pas. L'obsolescence rapide de la technologie déjà largement diffusée de l'injection de fuel ressorti du même phénomène. Il s'agit des deux facettes d'un même phénomène.

Cela nous amène à mettre en avant le concept de "lock-out" ou de "dé-standardisation" comme complément indispensable à la standardisation ou "lock-in". Il nous semble utile, en effet, d'associer les mécanismes de réversibilisation aux mécanismes d'irréversibilisation. Il nous semble tout aussi indispensable de concevoir les conditions de la non-cumulativité technologique et l'obsolescence (Frankel 1955), que celles de l'accumulation et de la continuité.

Il est exact que dans le cas des hauts fourneaux à injection, les irréversibilités créées par l'injection de fuel ne se sont pas totalement dissoutes. Dans une certaine mesure, l'injection de charbon s'est appuyée sur les ressources constituées : ainsi que l'ont souligné Nelson et Winter, l'innovation s'appuie sur des ressources existantes. Dans le même temps, l'innovation est toujours

⁷⁸¹ Callon, M. (1980) "The State and Technical Innovation : a case study of the electrical vehicle in France" in : Research Policy, Vol. 9, pp. 358-376.

⁷⁸² Gibbons, M., Littler, D. (1979) "The Development of an innovation : The Case of Porvair" in: Research Policy, Vol. 8, pp. 2-25.

⁷⁸³ Latour, B. (1992) *Aramis ou l'amour des techniques*. La Découverte.

⁷⁸⁴ Lanciano-Morandat, C. (1995) "Réflexions autour d'une table ronde : les conditions et les répercussions de l'interdiction mondiale des CFC" in : Lanciano, C. et Alii (eds) *La Chimie dans la société : son rôle, son image*. L'Harmattan.

porteuse de nouveauté inédite. Ainsi, il est tout aussi indéniable que le développement des injections de charbon ne peut se déduire linéairement comme la suite de l'injection de fuel. La perte de leadership de J. steel, pourtant bien campé en position de leader technologique japonais et même mondial dans la période d'injection de fuel, peut s'analyser comme l'échec de la stratégie de J firm destinée à inscrire l'injection de charbon dans la continuité de l'injection de fuel.

L'ensemble de cette approche démontre l'instabilité et l'incertitude caractéristique de l'environnement des firmes. Celles-ci développent d'importants investissements, et s'efforcent de produire les connaissances et les compétences leur permettant de limiter et de réduire cette instabilité, de façon construire un univers prévisible et calculable dans lequel l'accumulation devient possible. A un niveau méso-économique, la robustesse des irréversibilités forgées conditionne la mise en place d'effets de rendements croissants arthuriens.

2) Des processus d'apprentissage variable d'une firme à l'autre aboutissant à des connaissances spécifiques et fragmentées

La mise en relation de l'approche quantitative de la première partie et de l'approche qualitative développée dans la seconde et troisième partie de la thèse permet de proposer une lecture de ces phénomènes de réversibilisation – irréversibilisation, en relation à leurs fondements micro-économiques, étroitement liés aux stratégies des firmes et en particulier des firmes innovantes. Le concept de *distance technologique*, avancé par Foray et Grübler en complément de leur concept d'*espace morphologique* ouvre une piste intéressante (Foray et Grübler 1990). La question de savoir comment s'établissent les *distances technologiques* entre différentes alternatives amènent alors à remonter aux conditions micro-économiques de la création technologique, au sein des firmes innovantes, et finalement aux processus et aux modèles d'apprentissage de ces firmes.

Nous montrons dans cette thèse que chaque firme génère des zones de connaissance et de compétence spécifiques et fragmentaires, en fonction de sa stratégie et des contraintes pratiques auxquelles elle est confrontée. Cette variabilité interfirme représente une source essentielle de la variété technologique. L'arbitrage entre discontinuité/ continuité technologique découle des comportements d'apprentissage des firmes.

Le cas PCI met en scène deux entreprises confrontées à un problème de substitution de l'injection de charbon à l'injection de fuel. Il offre donc un terrain d'observation des stratégies de création/réutilisation des connaissances et ressources d'une technologie à l'autre. J. steel s'est efforcé de constituer une technologie d'injection de charbon reposant en bonne part sur les connaissances et les ressources accumulées dans la mise en œuvre de l'injection de fuel.

Si les irréversibilités créées par l'injection de fuel ne se sont pas totalement dissoutes, cela tient précisément au fait que certaines entreprises comme J. steel ont mis en œuvre des stratégies de mobilisation et de valorisation destinées à faire vivre ce patrimoine. A l'inverse, l'obsolescence de ces ressources est directement liée aux stratégies déployées par certaines firmes comme F. steel pour créer une technologie en rupture avec les réseaux et ressources existants. Ainsi, les réversibilités ou les irréversibilités ne peuvent s'analyser uniquement en terme de contraintes macro-économiques mais dépendent largement de l'activité déployée par les firmes pour maîtriser cet environnement et en retourner les opportunités et les contraintes à leur avantage : les firmes participent activement à la consolidation de ces irréversibilités et réversibilités globales.

Ce cas illustre également les fondements de la création de variété technologique et de son corollaire, l'établissement de distance technologique entre différentes alternatives d'une même technologie. Au moment crucial précédent l'adoption massive de la technologie, et représentant une fenêtre temporelle étroite (David 1987), les alternatives de J. steel et de F. steel – Paul Wurth se sont trouvées disponibles. Elles ont donc servi de support à la compétition technologique à travers leur mise en concurrence. La distance a tenu fondamentalement aux différences entre les hypothèses fondatrices des créations technologiques, et aux bases de connaissances divergentes constituées. Au niveau méso-économique, au moment de la standardisation et de l'adoption massive, la cumulativité et la convergence technologique ont dépendu de la mise en compatibilité de ces hypothèses et connaissances.

La firme J et la firme F ont développé des apprentissages contrastés. Au delà des dimensions stratégique et pratique déjà soulignées, ces apprentissages ont été organisés selon deux modèles différents. Dans la firme J., les connaissances et compétences générées se sont articulées autour des relations entre le Département central d'ingénierie et les sites utilisateurs. Cela a permis à J. firm de produire et de reproduire la technologie et de standardiser rapidement une installation type de façon à descendre rapidement le long de la courbe d'expérience. Dans la firme F., les connaissances et compétences ont été produites dans l'interaction entre des expérimentations locales menées sur les sites utilisateurs et le laboratoire central de R&D chargé de dégager les règles et les principes communs à ces diverses expériences. Ce modèle a abouti à une circulation transversale de savoir opérationnels plus limité que dans le cas de J. steel. Cela s'est traduit par des montées en cadence plus longues et laborieuses. Mais, ce modèle s'est révélé plus adaptable lors de changements importants de contextes.

Les théories de la diffusion tendent à négliger également les de la *disponibilité technologique*, dont l'analyse du cas des hauts fourneaux à injection révèle toute l'importance. Il s'agit en fait de reconnaître l'importance de la maîtrise pratique de la technologie pour les entreprises. En stabilisant la maîtrise d'une technologie, la firme innovante la rend disponible à l'ensemble de l'industrie. Un investissement classique devient possible lorsque la maîtrise technologique acquise par la firme innovante permet de reproduire le nouveau produit ou procédé de façon prévisible et stable, en obtenant les performances escomptés. En d'autres termes, l'investissement classique est rendu possible par un investissement innovatif préalable qui rend la technologie 'disponible' à d'autres firmes que la firme innovante.

La *disponibilité* représente une condition indispensable au développement technologique, dans la mesure où le mouvement d'apprentissage généré par la dynamique d'adoption ne peut jouer que sur une solution technologique *adoptable*, et donc, *stabilisée* par une firme innovante, et mise à *disposition* d'autres firmes. C'est en ce sens que nous comprenons l'idée de technologie vivante : les rendements croissants ne peuvent exercer leurs effets que sur des technologies disponibles. En retour, la poignée de technologies effectivement disponibles au moment propice contribue de façon déterminante à orienter les développements technologiques futurs, et à valider les connaissances et hypothèses dont elles sont porteuses (Lock in David 1985). A l'image d'un bateau sans voile, l'injection de charbon n'a pas pu bénéficier du vent de l'adoption dans les années 50-60, et n'a pas dépassé les frontières des firmes pionnières qui l'ont élaborée, du fait qu'aucune *première installation industrielle performante* n'avait été démontrée sur un *haut fourneau légitime*. La disponibilité correspond donc très mal au terme de petit événement, qui semble le reléguer au statut d'aléas : il s'agit selon cette thèse, du résultat même du processus d'innovation tel que nous proposons de le définir, processus relevant non pas du hasard mais de la décision stratégique d'une firme innovante (*The innovative choice* Amendola et Gaffard 1988), et impliquant un investissement innovatif, activité économique de première importance, repérée déjà par Schumpeter comme le moteur du développement économique, à l'origine de la stabilisation de voie technologique et économique nouvelle.

Il ne s'agit pas pour autant de présenter la *disponibilité* comme la condition nécessaire et suffisante de la diffusion. Pour circuler, l'innovation échappe à la firme innovante et à sa seule stratégie (Arthur 1989, Latour 1989). Les conditions favorables ou défavorables à la diffusion d'une innovation sont complexes et variées.

3) Des connaissances fragmentées des firmes aux connaissances généralisées de l'industrie : le rôle pivot des associations techniques et professionnelles dans la généralisation.

Dans cette thèse, nous nous sommes attachés plus particulièrement au rôle de la constitution de connaissances communes circulant entre les différents acteurs économiques, et favorisant la coordination de leurs investissements et la convergence technologique. Dans le cas des hauts fourneaux à injection, cette orientation nous a amené à mettre en exergue le rôle du cadre institutionnel et organisationnel de production, d'accumulation, et de transmission des connaissances, et tout particulièrement le rôle des associations techniques et professionnelles et des journaux spécialisés qu'elles animent.

Les publications (Hicks 1994) et les associations professionnelles et sociétés savantes ont constitué des lieux d'échange et d'organisation des savoirs (Lynn et McLeod 1988). Les revues publiées et les colloques organisés par ces associations ont joué le rôle d'interface entre les pratiques industrielles et les savoirs théoriques souvent organisés en disciplines, et fréquemment portés par des chercheurs académiques. Cette rationalisation collective, prenant la forme d'une théorisation s'est trouvée étroitement articulée à la formation d'une base installée, c'est à dire, dans un premier temps, aux technologies stabilisées par une poignée de firmes innovantes. Des rapports de force entre théories concurrentes ont vu le jour sur la base des connaissances et des visions du monde incorporées dans ces premières installations – chez J et F steel notamment. Leur analyse ne se limite pourtant pas à un simple jeu de pouvoir, mais implique un rapport pratique au monde. Un jeu d'interaction entre pratiques industrielles et théorisation technologique de ces pratiques a trouvé place, favorisant, au delà des controverses, la mise à l'épreuve et l'élection progressive d'un axe théorie- base installée considéré comme efficace, c'est à dire permettant aux agents économiques de maîtriser en pratique la production et la reproduction de l'investissement et de ses effets attendus. On se trouve ainsi en mesure de mieux comprendre l'influence de la mise en compétition directe : dans les courses automobiles, le succès remporté par l'automobile à pétrole et ses effets sur la diffusion peuvent ainsi être compris, au delà de l'effet marketing, comme la validation d'hypothèses et de visions technologiques sous jacentes, portées par les premiers entrepreneurs ayant exploré cette technologie (Abernathy 1978).

Il est apparu clairement que les savoirs disponibles sur les alternatives technologiques n'étaient pas unifiés mais morcelés, parcellaires et variables d'une entreprise à l'autre. Les comparaisons des performances sont intervenues essentiellement dans des réseaux de proximité existants, ainsi que l'ont souligné les modèles de percolation (David 1992, Foray et David 1994, Dalle 1995). Ces phénomènes locaux ont néanmoins été complétés par des phénomènes de généralisation, la constitution de savoir unifiés et rationalisés à un niveau inter-firme, par l'intermédiaire des associations professionnelles. La nomination et l'élection d'experts reconnus dans le champs technique, invités à fournir des visions globales de l'espace technologique' dans le cadre des publications et des colloques a eu un effet considérable de guidage, de classement des phénomènes

observés, d'évaluation des alternatives existantes, de jugement des performances techniques et économiques des différentes alternatives existantes, fortement prescriptives vis à vis de la formation des anticipations des agents économiques. La généralisation construit ainsi les conditions et le cadre cognitif à partir desquels la convergence technologique et l'accumulation peuvent être déclenchés, débouchant sur des rendements croissants.

Du point de vue stratégique, on peut se demander pourquoi les firmes publient t-elles des articles relatant leur expérience, et fournissant potentiellement des informations valables à des concurrents potentiels, sans contrepartie en matière de propriété intellectuelle (Arrow 1962)? Allen, dans son travail sur *l'invention collective* en Grande Bretagne, a évoqué ce paradoxe (Allen 1983). On peut avancer avec cet auteur, que la logique de club sous-jacente à ces comportements repose sur l'importance des bénéfices retirés de la participation à la dynamique collective d'apprentissage. Il en découle logiquement que le comportement coopératif de la firme innovante –publication en particulier ici- dépend de ses anticipations relativement aux gains à espérer d'une exploitation solitaire de son avantage technologique, ou aux gains qu'elle peut tirer de sa participation à la dynamique collective. En coopérant, la firme innovante peut espérer éclairer ses propres pratiques, promouvoir sa vision du monde et favoriser l'adoption de sa technologie, être repéré comme un leader technologique (légitimité), éviter l'isolement technologique face à une univers caractérisé par des investissements lourds et situation d'incertitude forte, profiter des avancées générées par d'autres investissements qui suppose une forte proximité technologique.

Le cas des injection de charbon fourni un ensemble d'éléments explicite du parti tiré par les entreprises de ces stratégies coopérative, des publications disponibles, mais aussi des relations établies dans le cadre des associations professionnelles dans la formation d'une décision d'investissement, et au delà dans la formation d'hypothèses et de certitudes, dans la mobilisation de ressources favorables à la mise en œuvre de l'investissement innovatif. Ainsi, la controverse née entre un groupe d'entreprise japonaises et un groupe d'entreprise européennes dont J et F steel ont été les principaux protagonistes, illustre le caractère organisé et conflictuel de l'apprentissage inter-firme.

L'histoire du développement économique n'apparaît dès lors plus comme un enchaînement linéaire de causes et d'effets fondé sur les seules décisions, mais comme un ensemble d'intersections se cristallisant par endroits à certains moments en faveur d'un certain type d'accumulation. Si l'obsolescence de la technologie d'injection de fuel est passée par le marché et la flambée du prix relatif de cet injectant, nous proposons de comprendre l'ensemble de cet épisode à un niveau plus micro-économique, dont le prix relatif n'est qu'un signe, devant être interprété comme l'échec d'une série d'acteurs économiques à stabiliser durablement une solution technique et son environnement - un vaste ensemble incluant les champs de pétrole, les rapports entre producteurs pétroliers, les hauts

fourneaux et leurs besoins, les alternatives au fuel, la fonte - pour rendre stable, prédictible, et calculable ses matières, son fonctionnement et ses produits. Il faut y ajouter l'échec d'entreprises qui à l'instar de J. steel, se sont efforcées de continuer à faire vivre ce capital accumulé en développant une technologie d'injection de charbon dans la continuité de l'injection de fuel en s'appuyant sur les ressources constituées aux étapes précédentes.

II Réflexion sur les Fondements micro et mésoéconomiques du développement technologique : modèles d'apprentissages de la firme, compétence, et stratégie d'innovation.

1) Vers un modèle du développement analytique intégrant formation et diffusion de connaissances

La firme innovante transforme les zones d'incertitude liées aux évolutions macro-économiques en voie technologique, jouant par là même un rôle crucial dans le développement technologique et son orientation. Il est donc important de saisir les mécanismes par lesquels la firme procède à cette transformation, à cette domestication. C'est en particulier aux mécanismes de création et d'accumulation de connaissance que nous nous sommes attachés.

L'un des enjeux majeurs du développement technologique est de stabiliser des voies technologique et économiques nouvelles autorisant l'accumulation de richesse (Première partie). Le fonctionnement détaillé de ce mécanisme s'articule autour de deux types de phénomènes : les phénomènes de création technologique (Partie 2) et les phénomènes de généralisation technologique (Partie 3). Il s'agit d'analyser les modalités d'action par lesquels les agents économiques se trouvent en mesure de faire basculer une voie technologique nouvelles dans le patrimoine commun des techniques stables, identifiées, et prévisibles à partir de quoi les investissements peuvent se déclencher. On procède, ce faisant, à un changement de perspective, à une incursion exploratoire dans le vif des constructions, dans la micro-économie des dynamiques. On propose au lecteur de pénétrer dans la rationalité émergente des acteurs, dont les 'trajectoires technologiques' ne prennent en compte que le résultat institué.

Notre option a consisté à considérer, dans la ligne des travaux d'Amendola et Gaffard (Amendola et Gaffard 1988, Stiglitz 1987, Cohen et Levinthal 1989) l'innovation comme un processus d'apprentissage. Nous nous sommes penché en priorité sur la formation et la propagation de connaissances en relation étroite avec les ressources capables de les transformer en action.

Pourquoi donc s'intéresser au contenu des processus d'innovation, dans leur dimension dynamique, plutôt qu'à leur résultat une fois institué? L'argument principal que nous avançons est que c'est au cœur de ces processus d'innovation que se forment, que se font et se défont les bases de

l'accumulation. Comprendre les processus d'innovation consiste à se situer au cœur du changement économique, et finalement aux sources des mécanismes de développement économique.

Si l'on adopte l'idée que la réalité des phénomènes d'innovation est foisonnante et incertaine, se pose alors la question du point de vue épistémologique pertinent, des outils et des méthodes adaptées à cet objet difficile à saisir. Nous nous sommes donc efforcés de repérer et dans une moindre mesure de construire, un outillage conceptuel permettant d'observer les phénomènes de l'innovation technologique en 'train de se faire', c'est à dire partant de la conceptualisation des processus en tant que tel, indépendamment de leurs résultats considérés comme toujours incertains.

Le modèle conceptuel que nous avons proposé articule une double respiration, une double dynamique: la création technologique et la généralisation. L'innovation ne porte ses fruits que lorsque création et généralisation sont correctement articulés. La création suppose une contraction, elle ne peut éclore que dans un espace très localisé et spécifié -*l'espace d'innovation*-: il n'est de création que locale. La généralisation suppose à l'inverse un mouvement d'extension, d'expansion, de décontextualisation, d'institutionnalisation de la technologie.

Nous avons montré que le processus de création technologique peut être analysé à partir de deux aspects essentiels, la construction d'un *espace d'innovation* et *l'investissement innovatif* qui s'y déroule. Trois moments analytiques lui confèrent sa forme et son orientation: la formulation collective d'un problème - *problématisation* - la formation d'un accord et d'un engagement réciproque des acteurs de l'innovation et des acteurs de contexte - *engagement*- et les modalités de matérialisation progressive de l'objet technique au sein de son premier contexte de production - *mise en projet*.

Le processus de généralisation peut être analysé à partir de l'étude de trois moments structurant: la définition de l'objet technique et de son usage par les utilisateurs - *appropriation* -, l'inscription de représentations abstraites, de théories de la technologie correspondant à l'objet technique et définissant ses attributs et ses qualités au sein de divers contextes - *inscription*-, la mise en place de dispositifs institués et d'outils collectifs d'orientation des investissements et d'accumulation de connaissances liés à l'élaboration d'une théorie collective en étroite correspondance avec la base installée - *irréversibilisation*-.

La généralisation dans divers contextes est toujours une *appropriation* (Eyraud et Alii 1989), au sens où l'innovation est en quelque sorte recrée, instrumentalisée dans chaque contexte d'usage. Elle est aussi une théorisation, un apprentissage collectif, au sens où l'innovation est l'objet d'un classement, d'une attribution de qualité et d'une position et de distances au sein de l'espace d'innovation, une référence partagée contraignant les décisions et les apprentissages des acteurs.

L'analyse comparative de deux processus d'innovation et de généralisation nous a permis de construire ce cadre conceptuel et d'en tester la validité à partir de deux dynamiques fortement contrastées. La *standardisation* devient alors une modalité parmi d'autres de la généralisation. Elle se caractérise par une forte convergence technologique déclenchant la création d'une forte asymétrie de compétence entre des concepteurs- producteurs et des utilisateurs et une logique d'accumulation fondée sur l'approfondissement de la division du travail.

2) *L'innovation comme processus d'apprentissage industriel*

Au delà du cadre analytique développé en propre dans cette thèse, afin de rendre compte du développement de la technologie d'injection de charbon aux hauts fourneaux, il est possible de proposer quelques éléments de réflexion théorique concernant la dynamique industrielle en relation avec la mise en œuvre d'apprentissage collectif de nouvelles technologies.

Les questions des frontières de la firme (Coase 1937) et de l'organisation de l'industrie fondée sur la complémentarité des compétences ('capabilities' Richardson 1972) se posent de manière tout à fait différente selon le traitement réservé au changement (Langlois, Robertson 1995).

Suivant Schumpeter, nous avons considéré l'innovation comme le vecteur essentiel du changement économique. Bousculant les bases de connaissances et les compétences conférant un avantage compétitif, l'innovation contribue à structurer un jeu stratégique autour l'appropriation et de la division des savoirs. A ce titre, l'innovation constitue le processus d'investissement fondamental sous tendant l'apprentissage des agents économiques et la dynamique industrielle.

2.1) L'innovation comme processus d'apprentissage et de maîtrise de voies technologique et économique nouvelles

Lorsque l'on s'intéresse au changement économique, une modalité d'analyse offerte consiste à accorder la priorité aux processus économiques qui sous-tendent le changement, et en particulier aux apprentissages mis en œuvre par les agents économiques.

Dans cette perspective, cette thèse propose de considérer l'innovation comme le mécanisme essentiel de domestication de voies technologiques et économiques nouvelles pour les firmes. Face à un environnement en partie inconnu, évolutif, instable et imprévisible, la firme innovante explore un

nouveau territoire, de nouvelles voies, provoquant leur passage dans l'univers connu, stable, prévisible, répétitif, maîtrisé. En ce sens, l'innovation est source à la fois de changement et de stabilité, d'irréversibilité : c'est le sens que nous donnons à l'expression de Schumpeter 'destruction créatrice'.

L'importance de ce mécanisme dépasse les frontières de la firme innovante, et se trouve au fondement du développement technologique et de la structuration de l'industrie : les firmes 'imitatrices' en viennent à identifier la nouvelle technologie comme une ressource sur laquelle elles peuvent compter sans avoir nécessairement besoin de la maîtriser dans sa totalité, ni d'en maîtriser les connaissances constitutives (Kogut et Zander 1992⁷⁸⁵). L'innovation se situe donc à la source dynamique des options technologiques ouvertes aux firmes : elle constitue l'un des mécanismes essentiels de création de variété dans l'économie. Cette économie de savoir et d'investissement agit comme un multiplicateur fondé sur la division des savoirs, permet de proposer un principe explicatif de la spécialisation industrielle : il n'est pas utile à une firme non spécialiste de maîtriser les savoirs liés à la conception et à la production des automobiles pour utiliser celles-ci dans sa fonction de production.

La différenciation entre producteurs et utilisateurs de technologie repose sur ce principe de spécification/spécialisation des 'capacités' des firmes (Teece et Pisano 1994⁷⁸⁶). Lorsque l'activité innovante trouve les conditions de sa réussite, elle autorise, par le jeu des rendements croissants, la mise en place d'investissements au sens classique d'acquisition d'un objet sur le marché, et déclenche l'organisation de l'industrie autour de l'approfondissement de la division des savoirs et du travail, identifié par Hayek (1937⁷⁸⁷) comme "*The central problem of economics as a social science*" (Hayek, 1937 p. 49). En ce sens l'innovation constitue le processus par excellence d'adaptation des modalités de coordination industrielle au changement.

2.2) Pour une théorie de la diffusion fondée sur l'innovation

Des modèles de diffusion sans innovation

Cette thèse invite dès lors à compléter et à nuancer les théories anciennes et modernes de la diffusion technologique. Celles-ci, au delà de leurs différences, ont en commun de s'être posé en priorité la question des conditions favorables à la sélection par le marché de la 'meilleure technologie'

⁷⁸⁵ Kogut, B., Zander, U. (1992) "Knowledge of the Firm, Combinative Capabilities, and the Replication of Technology" in : Organization Science, Vol. 3, n°3, pp. 383-397.

⁷⁸⁶ Teece, D., Pisano, G. (1994) "The Dynamic Capabilities of Firms : an Introduction" in : Industrial and Corporate change, Vol 3, n°3, pp. 537-556.

⁷⁸⁷ Hayek, F. (1937) "Economics and Knowledge" in: Economica, February 1937, pp. 33-54.

(‘know what’ Loasby 1998⁷⁸⁸): quelle est la meilleure technologie, quels sont les mécanismes favorables ou défavorables à sa sélection (market failure). La diffusion dépend dès lors essentiellement de la dynamique d’adoption, c’est à dire des décisions d’investissements d’agents économiques individuels pris dans un jeu de choix binaires (0= n’adopte pas 1= adopte) à n modalités (n étant le nombre d’alternatives existantes en t , t étant le moment de la prise de décision). Indépendamment de la sophistication des modèles, ceux-ci partagent l’idée d’un choix de nature binaire, conditionné par l’état du monde sur lequel la firme ne possède, à la limite, pas de pouvoir d’action. Le principe même de l’innovation tel que nous proposons de la concevoir en est par conséquent exclu.

Ainsi, pour Mansfield (Mansfield 1961), le moteur de la diffusion réside dans la valeur intrinsèque de la technologie. La ‘profitabilité’ intrinsèquement supérieure de la technologie étudiée explique sa diffusion: la technologie du VHS est adoptée parce qu’elle est meilleure que les autres. Le modèle d’Arthur permet d’assouplir cette position et de relâcher l’hypothèse de supériorité intrinsèque de la technologie (Foray 1989), fortement critiquée par les spécialistes du changement technique (Gold et Alii 1984). Pour Arthur, la profitabilité n’est pas donnée par la qualité intrinsèque de la technologie diffusée, mais dépend directement du nombre de ses adopteurs (Arthur 1989): si le VHS est adopté, c’est sous la dictature des petits événements intervenus en début de diffusion, lesquels ont ensuite orienté les comportements d’adoption de masse rendant ce standard incontournable. Dans les deux cas, il est frappant de constater que la décision s’impose de façon contraignante et exogène à la firme, soit via la profitabilité intrinsèque de la technologie, soit sous l’effet conjugué de la loi des grands nombres et de petits événements. Dans le second cas, la standardisation correspond alors au paroxysme de la trajectoire, au "lock -in", moment où les irréversibilités constituées par l’approfondissement d’une voie technologique singulière sont telles que les choix des adopteurs deviennent strictement déterminés. Il en découle une vision linéaire, naturellement cumulative et irréversible rendue par le concept de ‘lock-in’: les agents économiques se trouveraient impuissant à maîtriser le cours d’un développement technologique qui s’impose à eux.

Dans cette vision des choses, et indépendamment de la sophistication des modèles, la firme est soumise aux états du monde, et ne possède pas la capacité de faire évoluer les options technologiques entre lesquels elle est amenée à choisir: le choix innovatif n’est pas intégré dans les modèles de diffusion (Foray et Le Bas 1986, Amendola et Gaffard 1988). Du même coup, la nature expérimentale de la dynamique industrielle, pourtant située par Marshall au cœur de son édifice théorique (Loasby 1999⁷⁸⁹), disparaît. Dans cette thèse, nous avançons que l’innovation, comme mécanisme de stabilisation de voies technologiques nouvelles, se situe à la source de la nature exploratoire de la

⁷⁸⁸ Loasby, B. (1998) “The Organisation of capabilities” in : Journal of Economic Behavior & organization, Vol. 35, pp. 139-160.

dynamique industrielle, et, lorsqu'elle se diffuse, au fondement de l'apprentissage industriel. Cela nous amène tout naturellement à proposer un effort de théorisation de la diffusion intégrant le processus d'innovation.

2.3) Propositions pour une théorisation de la diffusion intégrant l'innovation

“Forms of organization should not be judged, as later became the fashion, only by their implications for allocative efficiency, but primarily by their effectiveness in aiding the growth and use of knowledge (Marshall 1920, p.138)” (Loasby 1999, p.70)

Les deux mouvements de l'apprentissage industriel : différenciation et intégration des compétences des firmes.

Ainsi que l'ont souligné les travaux récents sur la diffusion, mobilisant des modèles de percolation, une théorie de la diffusion doit s'articuler étroitement à une représentation du milieu, du territoire dans lequel cette diffusion prend place (David 1992, David et Foray 1994⁷⁹⁰, Dalle 1995). Une théorie de la diffusion nous semble devoir être intégrée dans une théorie plus large, de l'organisation dynamique de l'industrie (Richardson 1990⁷⁹¹). A ce titre, il s'agit de prendre en considération deux mouvements complémentaires sur lesquels se fondent l'apprentissage industriel : l'approfondissement de la division des savoirs et des compétences ('effet Smith') et l'intégration de ces savoirs autour de références collectives ('effet Marshall') liée au besoin de coordination des activités (Richardson 1990, Carlton et Klamer 1983, Piore 1991⁷⁹²).

L'innovation, conçue ici comme le mécanisme essentiel de l'exploration de nouvelles voies technologiques et économiques, se trouve situé, de ce point de vue à la source de ce double mouvement. Le processus d'innovation permet à la firme innovante une accumulation primitive de ressources, et en particulier de compétences distinctives nécessaires à la maîtrise et à la stabilisation d'une nouvelle voie. En soit, le processus d'innovation constitue une première étape de différenciation de la firme innovante vis à vis des autres firmes. Dans le même mouvement, l'innovation se traduit, sous condition de réussite et de diffusion, par la production d'externalités positives au niveau de

⁷⁸⁹ Loasby, B. (1999) "Industrial Districts as Knowledge Communities" in : Bellet, M., L'Harmet, C. (eds) *Industry, Space, and Competition*. Edward Elgar Pub.

⁷⁹⁰ David, P., Foray, D. (1994) Percolation Structures, Markov Random Fields and the Economic of EDI Standards Diffusion. In : Pogorel, G. (1994) *Global Telecommunications Strategies and Technological Change*. Elsevier.

⁷⁹¹ Richardson, G. (1990) *Information and Investment*. Oxford UP 2d ed.

⁷⁹² Carlton, D., Klamer, J. (1983) "The Need for Coordination Among Firms, with Special Reference to network Industries" in : *The University of Chicago Law Review*, Vol. 50, pp. 446-465 ; Piore, M. (1991) "Nouvelles remarques sur les trajectoires technologiques" in : Boyer et Alii (eds) *Les figures de l'irréversibilité en économie* EHESS, pp.137-149.

l'industrie dans son ensemble, ayant une forte influence sur la coordination inter- firmes (Arthur 1989, Carlton et Klamer 1983).

La variété et la compétition technologique, ainsi que l'ont souligné Metcalfe et Miles (1994), ne peut provenir que des firmes : ce ne sont pas les technologies qui entrent en compétition mais les firmes porteuses de ces différentes alternatives technologiques. Au niveau de l'organisation industrielle, la *diversité technologique* est donc étroitement liée à la capacité des firmes de déclencher des investissements innovatifs. Cette dimension paraît d'autant plus essentielle, que comme l'a noté Loasby (1999) commentant le travail de Marshall, au niveau global, la compétition technologique dépend de l'engagement de plusieurs firmes dans le processus d'*exploration* “*since no one knows what the production function is, or could become, it is desirable that there should be many different experiments (Marshall 1920, p. 662)*” (Loasby 1999, p.73).

D'un autre côté, et parallèlement, la diffusion d'une innovation particulière et l'*exploitation* d'externalités positives pour l'industrie dépend de la décision de certaines firmes d'adopter celle-ci (Arthur 1988, Foray 1989, 1996). C'est ainsi à ce niveau méso-économique, dans les interactions entre les firmes vis à vis des innovations technologiques, que se structurent la différenciation et la coordination des compétences. C'est également à ce niveau stratégique, plutôt qu'en fonction de la phase du cycle de vie du produit, que nous proposons de rendre compte des deux types d'apprentissages liés à l'exploration -économie de diversité (scope)-, et à l'exploitation – économie d'allocation - technologique.

Cette tension, apparemment contradictoire entre la création interne et l'externalisation de l'innovation, invite à reconnaître à la firme une capacité stratégique fondamentale à arbitrer entre différentes modalités non binaires d'investissement (Langlois, Robertson 1995, Allouche, Pogorel 1995 ⁷⁹³) : “*businessmen did not have the necessary knowledge to be optimizers, but they decided for themselves what new idea to try, and what to keep. Each could also benefit from the experiments of others (...) those who cannot afford to venture on costly experiments themselves may, if they will, read the record of every important new departure that is made in their business in any part of the world*” (Loasby 1999, p. 73). En conséquence, il paraît indispensable d'intégrer dans l'analyse de la diffusion technologique et de l'apprentissage industriel, les stratégies développées par les firmes vis à vis de l'innovation, soit qu'elles décident d'explorer de nouvelles voies, soit qu'elles préfèrent à l'inverse bénéficier des explorations effectuées par d'autres.

Modalités d'investissement des firmes et type d'apprentissage industriel

⁷⁹³ Allouche, J., Pogorel, G. (eds) (1995) *Technology Management and Corporate Strategies : A Tricontinental Perspective*. North-Holland.

Il est possible dans ce cas, de reconnaître à la firme sa capacité innovatrice, et une place centrale dans la dynamique industrielle, tout en proposant une explication de la diffusion d'une technologie, et d'évolution de l'espace technologique. Ceux-ci découlent des stratégies d'investissement des firmes, résultant d'un calcul rationnel prenant en compte d'une part la dimension incertaines de l'exploration d'un environnement de nature instable, et d'autre part la question des compétences nécessaires et disponibles à l'exploration d'une voie nouvelle ('know how' Loasby 1998). La 'décision d'adoption' implique en conséquence l'articulation de plusieurs décisions : sur la voie technologique à suivre, mais aussi sur les compétences disponibles en interne et en externe pour mettre en œuvre cette orientation en pratique, et sur les modalités pratiques de mise en œuvre de l'investissement (forme de l'engagement scellé et instrumentation), dont l'acquisition d'un objet prêt à l'emploi sur le marché ne constitue qu'un cas limite. Dans cette perspective, la stratégie du 'make or buy' s'inscrit en référence aux compétences des firmes, à leurs limites, et à leurs évolutions (Langlois et Robertson 1995).

Dans cette thèse, nous avons proposé de considérer que toute firme se trouve confrontée à un choix non binaire que nous proposons de réunir, à titre de synthèse, en quatre modalités d'investissement en fonction de l'arbitrage interne/externe réalisé :

- la possibilité d'adopter une technologie existante sans la modifier – *acquisition* -
- la possibilité de reproduire une technologie existante sans l'acquérir – *imitation* –
- la possibilité d'adopter une technologie existante en la transformant – *transformation* -
- la possibilité de créer une nouvelle technologie – *création technologique* -

Il serait bien entendu possible d'ajouter à ces quatre modalités, une série de configurations hybrides combinant l'adoption de technologie existante et la création partielle de technologie, ou la combinaison d'imitation et de création technologique, mais leur intégration dans l'analyse ne nous paraît pas de nature à enrichir fondamentalement le modèle de base.

De manière à rendre le schéma d'analyse plus pertinent, il nous a semblé utile de distinguer différents types de savoirs impliqués dans les investissements, de manière à pouvoir préciser plus clairement, le type de ressources maintenues en interne et le type de ressources externes mobilisées, et par conséquent, la nature des complémentarités et des concurrences engendrées par investissements.

La prise en considération du rapport pratique au monde supposé par la mise en œuvre d'un investissement innovatif nous a amené à distinguer schématiquement trois types principaux de connaissance et de compétence impliquées dans les processus d'innovation.

Les savoirs de conception correspondent aux capacités à mettre en œuvre pour définir les caractéristiques techniques et économiques de la solution technique. Notre définition est proche de celle donnée par Nelson et Winter (Nelson et Winter p. 247) à propos des savoirs de R&D, c'est à dire des connaissances et hypothèses relatives aux lois de la nature, des techniques et des marchés. Il s'agit à la fois d'une capacité à formuler des *anticipations* "the power of forecasting the broad movements of production and consumption, of seeing where there is an opportunity of supplying a new commodity that will meet real wants" (Loasby 1999, p.74), à formuler un problème spécifique à la firme - *problématiser*- et à *élaborer une solution technique spécifique* prise en charge par l'investissement.

Les savoirs de production technologique consistent en capacité à matérialiser le design et les plans en objet technique concret, fonctionnant de manière fiable et répétitive, et réalisant les performances prévues sur le papier par les concepteurs.

Les savoirs d'utilisation forment les capacités nécessaires à la mise en fonctionnement répétitive, stable, fiable et prévisible de l'objet technique dans un environnement productif donné.

Sans pour autant que le recoupement soit total, notons que cette typologie n'est pas totalement disjointe de celle proposée par Smith autour de la distinction effectuée entre ouvriers, 'fabricants de machine', et 'philosophes et hommes de spéculation' (Smith 1776). Ces catégories se retrouvent pour une large part réunis dans la division fonctionnelle de la firme individuelle en Département de R&D, Département d'ingénierie, et Département de production.

On se trouve ainsi en mesure de caractériser chacune des différentes modalités d'investissements en fonction du type de savoir prioritairement mobilisé, et corrélativement, en fonction du type d'économie de connaissance sur lequel il repose (tableau 1).

Ainsi, l'*acquisition* d'une solution technique prête à l'emploi permet à la firme de se concentrer sur la mobilisation et l'approfondissement de savoirs d'utilisation, associée à une implication généralement minimale des savoirs de conception, limités à la veille technologique (awareness), et de production, cantonnés à l'accompagnement de la montée en cadence.

L'*imitation* d'une solution technique génère une économie de savoirs de conception, associée à une forte réduction de l'instabilité caractéristique de la création technologique. L'existence d''heuristiques' facilite l'accumulation primitive de connaissances utiles à la domestication d'une voie technologique.

La *transformation* ou l'amélioration d'une solution technique existante repose sur une économie partielle des trois types de savoirs, favorable à la mise en œuvre d'une création technologique sur d'autres caractéristiques ou sur certains éléments précis de l'objet technique.

Du point de vue de la dynamique industrielle, chaque modalité d'investissement se traduit par des effets différenciés en matière de coordination et de différenciation (tableau 1).

La *création technologique* est à la source de l'accumulation par la firme innovante, de compétences et de connaissances distinctives. En ce sens, la création technologique est la source essentielle de *diversité technologique*, et partant de compétition technologique. Dans le même temps, ainsi que nous le soutenons dans cette thèse, le processus de création technologique accroît le nombre des options technologiques stabilisées disponibles à l'industrie, et constitue le matériaux de base à partir duquel les connaissances communes et les bases de connaissances partagées peuvent être élaborées.

L'*acquisition* d'une solution technique a pour effet de renforcer la spécialisation industrielle autour de l'approfondissement des connaissances de production de technologie par le fournisseur et de l'approfondissement des connaissances d'utilisation par l'acquéreur. Cette spécialisation croisée s'accompagne de la création d'interdépendances entre les deux types d'entreprises, soutenu par l'élargissement de la base installée, favorables à la formation de références communes et de rendements croissants d'adoption ('learning by doing' Arrow 1962, 'learning by using' Rosenberg 1982, 'learning by interacting' Lundvall 1988). Ces interdépendances, peuvent, sous certaines conditions, inciter à l'optimisation d'un design et de ressources standardisées partagées par l'industrie dans son ensemble.

L'*imitation* se traduit par l'accumulation de savoirs de production et d'utilisation distinctifs. Ce type de différenciation par les procédés de fabrication accroît la mise en compétition par les prix d'options technologiques similaires, limitant le risque d'investissement et l'étendue de l'exploration requise. Elle tend à renforcer la spécialisation industrielle entre concepteurs et producteurs de technologie, mais laisse la porte ouverte pour la firme imitatrice, à un investissement innovatif futur. L'imitation favorise l'approfondissement et l'optimisation de voies technologiques balisées. L'élargissement de la base installée, contenu dans une forte proximité technologique se traduit par la mise en place d'interdépendances. Ces interdépendances, en fonction de leur nature, peuvent inciter à la production de technologie et de ressources génériques, compatibles avec l'orientation du marché vers la modularité.

Tableau 1 : *Modalités d'investissement de la firme et dynamique industrielle*

Modalités d'investissement	Type de savoir et économie	Fonctions de l'organisation concernées	Effet Smith : spécialisation	Effet Marshall : Coordination
Création	- de conception - de production - d'utilisation	- R&D - Ingénierie - Production	Accumulation distinctive de compétences et de connaissances	Création de diversité, stabilisation d'options technologiques nouvelles
Transformation	- de conception - de production - d'utilisation	- R&D - Ingénierie - Production	Accumulation distinctive de compétences et de connaissances	Création de diversité, stabilisation d'options technologiques nouvelles
Imitation	Economie de savoir de conception	- R&D - Ingénierie - Production	Approfondissement de la division des savoirs entre concepteurs et producteurs, savoir communs de conception, permettant de limiter le risque et de préserver les possibilités de création technologiques futures	Base installée à forte proximité technologique favorable à la formation d'interdépendances, de ressources technologiques génériques, de combinaisons modulaires et flexibles.
Acquisition	Economie de savoir de conception et de production	- Ingénierie - Production	Spécialisation industrielle par approfondissement 'irréversible' de la division des savoirs entre producteurs et utilisateurs	Base installée favorable à la formation d'interdépendances, de références communes, de rendements croissants. Standardisation

Limites organisationnelles et cognitives à la diversité technologique

Si l'on accepte de réintégrer le choix innovatif dans l'analyse du processus de création et de diffusion de l'innovation, on se trouve en mesure de proposer une vision de l'économie fondée sur le changement, par le biais d'une profusion de créations technologiques issues de différentes firmes.

L'une des questions qui se pose dès lors est de comprendre les limites organisationnelles, institutionnelles et cognitives à la diversité technologique. Une manière d'aborder cette question consiste à se demander pourquoi toutes les firmes ne sont pas productrices d'innovations technologiques leur permettant de répondre de manière spécifique à leurs besoins.

L'intégration d'une théorie de la firme innovante dans l'analyse de la diffusion amène dès lors à poser une question : pourquoi une firme possédant la capacité de créer sa propre technologie fait-elle le choix d'adopter une technologie élaborée par une autre firme ?

Si l'on accepte la thèse proposée ici selon laquelle l'innovation agit en faisant basculer un univers exploratoire et instable dans le domaine rassurant, fiable, maîtrisé, reproductible propice à l'optimisation de la production et de l'investissement productif et au calcul économique, le phénomène épinglé sous le terme 'imitation' est éclairé sous un nouvel angle. La firme innovante crée des ressources, qui sous certaines conditions, deviennent disponibles à un ensemble de firmes : le terme *technologie générique*, proposé par la théorie évolutionniste pointe ce phénomène (Zuscovitch 1985). L'investissement innovatif mis en œuvre par la firme innovante produit des externalités positives pour l'industrie. Ces ressources technologiques collectives ne sont pas, généralement, le fruit d'une seule firme innovante, mais bien, ainsi qu'il a été depuis longtemps remarqué, le résultat d'une dynamique formée d'une multitude d'innovation souvent mises en œuvre par différentes firmes, et qui, sous certaines conditions et dans certaines combinaisons, deviennent cumulatives (Zuscovitch 1984).

Cela amène donc à penser ensemble les interactions entre niveaux micro-économiques et méso-économiques du développement technologique en rapport aux complémentarités et aux relations entre firmes (Richardson 1972, Teece 1996). Ainsi que l'a souligné Baba (1989⁷⁹⁴), il semble utile de mettre en relation une analyse de la firme, en tant qu'unité élémentaire de décision avec l'espace industriel des relations inter-firmes dans lequel cette entreprise se situe. Le processus de diffusion et de compétition technologique constitue ainsi un processus collectif d'apprentissage constellé d'une multitude de décisions d'investissement d'imitation, d'acquisitions, de transformation, ou

⁷⁹⁴ Baba, Y. (1989) "The Dynamics of continuous innovation in scale-intensive industries" in : Strategic Management Journal, Vol. 10, pp. 89-100.

d'innovation, à l'origine de la formation, au plan méso-économique, d'une série de ressources collectives dites '*génériques*'.

Du point de vue analytique, l'économie réalisée dans l'opération est liée à l'extension des capacités d'action de la firme 'adoptrice' fondée sur le fait que l'utilisation d'un objet technique peut être maîtrisé, sans que la firme utilisatrice soit en mesure de le concevoir et de le produire. C'est seulement lorsque la voie technologique a été stabilisée, fiabilisée, et balisée par le jeu de l'investissement innovatif qu'une telle économie, fondée l'approfondissement de la division des savoirs entre producteurs et utilisateurs de technologie, supportant un "apprentissage par répétition" (Foray 1996), peut prendre place. Une fois considérée comme stabilisée et connue, une technologie peut- être mobilisée pour être utilisée comme une base de départ (building block) pour d'autres développements.

Il ne s'agit pas simplement d'explorer mais de maîtriser, c'est à dire de produire les connaissances et les ressources capables de domestiquer activement les forces naturelles et économiques au fondement de la solution technique. L'entreprise produisant un briquet simplifie le rapport au monde du fumeur en limitant l'apprentissage nécessaire à l'allumage d'un feu – apprentissage requérant du temps et des compétences - en lui proposant un objet technique fondé sur des lois naturelles et des matériaux suffisamment maîtrisés pour que l'utilisation en soit quasi parfaitement prévisible : le briquet ne lui saute pas à la figure lorsqu'il l'allume, de même qu'il lui rend le service qu'il attend de façon répétitive. Nelson et Winter font un constat assez proche (Nelson et Winter 1982) lorsqu'ils notent qu'un automobiliste n'a pas besoin de maîtriser l'ensemble des lois scientifiques impliquées lorsqu'il dépasse un autre véhicule. L'automobiliste n'a pas besoin de savoir comment sa voiture est conçue et produite, et encore moins de posséder les connaissances et les ressources, ou de maîtriser les lois naturelles qui lui permettraient de concevoir lui même un tel véhicule de façon performante.

Le fait que l'innovation suppose un rapport pratique au monde frappé d'une forte incertitude et d'une forte instabilité, permet de comprendre pourquoi il peut se révéler tout à fait rationnel de la part d'une firme B d'adopter la technologie stabilisée par la firme A, plutôt que de s'engager, sur la seule base de l'information acquise sur la 'meilleure voie technologique', y compris si cette information est pertinente et parfaite, dans la conception et la production d'un nouvel objet technique supposant l'exploration et la stabilisation voie technologique et économique peu balisée. Cela tient, ainsi que l'a montré Callon (Callon 1994), à la variété et la multiplicité des formes de savoir complémentaires nécessaires à la création d'une nouvelle technologie.

L'existence et la construction de cette "asymétrie de compétence", croissante avec la diffusion et l'approfondissement de la division des savoirs et du travail industriel ne se confond pas strictement

avec les 'asymétries d'information' - décroissantes avec la diffusion (Mansfield 1961) : un utilisateur peut fort bien maîtriser mieux que le producteurs les connaissances liées à l'acquisition et à l'usage d'un objet technique. L'adoption d'une technologie ne se résume pourtant pas à l'acquisition d'un bien sur le marché. Il permet à la firme adoptrice d'étendre sa capacité d'action sur le monde, laquelle est fondamentalement limitée par sa compétence interne ('know how' Loasby 1998), démultipliant par là même l'utilisation possible de ses compétences internes.

3) Limites de l'analyse et pistes de recherche futures.

L'une des limites importantes de notre travail tient à l'établissement de sa validité sur la base de deux études de cas approfondies. Cette limite est inhérente à la méthodologie retenue, de type qualitatif. L'approfondissement de processus singulier se fait nécessairement au détriment du nombre de cas pris en compte, et rend les conclusions plus dépendantes des conditions particulières du cas étudié.

Cela se traduit ainsi par la focalisation sur un modèle de l'innovation que l'on pourrait qualifier de 'classique', positionné centralement au sein de l'entreprise et autour des relations entre sa fonction de R/D et ses usines de production. Or une série de travaux récents (Cohendet et Alii 1991, 1992, Foray 1995, Arora et Gambardella 1994⁷⁹⁵) se sont précisément fait les avocats de l'émergence d'un nouveau paradigme de l'innovation. L'une des pistes évoquées met ainsi en avant l'idée que les dynamiques d'innovation incorporent des connaissances de plus en plus abstraites issues directement de la recherche scientifique. Ces positions font écho à la mise en évidence du rôle crucial des relations tissées entre acteurs industriels et acteurs de la recherche publique (Freeman 1994). La mise en place de nouvelles médiations, permettant d'assurer une incorporation et une valorisation plus directe, plus organisée, plus systématique de savoir de types scientifiques favoriserait l'émergence d'un nouveau modèle d'innovation plus continu, plus incrémental que le modèle 'classique', localisé au sein de la firme, sur lequel repose notre analyse. Il est certain que l'existence même de ce qu'il est convenu d'appeler des 'start-up' œuvrant dans des secteurs d'activité en émergence, et souvent qualifiés de technologies génériques comme le logiciel ou les biotechnologies, et ayant trouvé un mode d'existence fréquemment sans produit interroge directement la validité du modèle classique (Casper 1998⁷⁹⁶). Est-il possible de rendre justice de ces phénomènes récents à partir des outils proposés au fil de cette thèse?

⁷⁹⁵ Arora, A. et Gambardella, A. (1994) "The changing technology of technological change: general and abstract knowledge and the division of innovative labor": in: *Research Policy*, Vol 23, pp.523-532. Foray, D. (1995) "Les brevets dans la nouvelle économie de l'innovation" in: Baslé, M. Dufourt, D., Héraud, JA., Perrin J. (eds) *Changements institutionnels et changements technologiques. Evaluation, droits de propriété intellectuelle, système national d'innovation*. CNRS, pp. 125-151.

⁷⁹⁶ Casper, S. (1998) "National Institutional Framework and High-Technology Innovation in Germany: the Case of Biotechnology" in: *Working Paper*, WZB, septembre 1998

Plusieurs pistes de recherche et d'approfondissement peuvent ainsi être évoquées en relation avec les points problématiques et les limites de cette recherche.

Celle-ci a nous a permis d'identifier un certains nombre de mécanismes important intervenant dans la formation et la diffusion des connaissances technologiques. En particulier, nous avons pu souligner le rôle fondamental des modèles d'apprentissages dont les firmes sont porteuses dans l'orientation des zones de connaissances générées par les firmes. Au niveau méso-économique de l'espace inter-firme, nous avons montré le rôle éminent du cadre institutionnel fourni par les associations techniques et professionnelles dans la généralisation des connaissances. Ces mécanismes nous semblent devoir être étudié sur la base d'expérience étendue, tout particulièrement dans les nouveaux secteurs technologiques en émergence tels que les biotechnologies, et les nouvelles technologies de l'information et de la communication.

Nous avons pu, dans la comparaison de J et de F steel, mettre en évidence deux modèles d'apprentissage distincts, l'un fondé sur l'articulation étroite et horizontale entre producteurs de la technologie et les utilisateurs, l'autre sur une articulation plus verticale entre une variété d'utilisations et les modélisateurs chargés d'en définir les principes. Nous avons pu constater que le second, confronté à une évolution imprévue de la technologie, semblait mieux à même de s'adapter en changeant radicalement de point de référence. A l'inverse, le premier modèle, porté par la firme japonaise, s'est révélé terriblement efficace pour avancer rapidement vers l'exploitation industrielle des avoirs acquis, mais a entraîné d'énormes difficultés lorsque ses fondements se sont trouvés invalidés, la firme J. ayant péniblement tenté de changer de trajectoire. Au regard de la littérature existante, on peut s'interroger dès lors, sur le caractère général de ces modèles : en quoi les expériences de F.et de J steel sont t-elles représentatives d'un modèle d'apprentissage à la française et à la japonaise, et liés des modèles nationaux d'innovation ? Des recherches complémentaires portant sur d'autres cas détaillés sont nécessaires pour répondre de manière systématique à cette question. D'autre part, on peut s'interroger sur l'évolution dans le temps de ces modèles. Sous l'effet de la mondialisation, les modèles sont ils amenés à converger ou à s'hybrider? Vers quels modèles d'apprentissage ?

D'autre part, nous avons souligné la place analytique à accorder aux mécanismes de généralisation dans les analyses du développement technologique. Les quelques réflexions menées ici doivent de ce point de vue plus être considérées comme une première étape exploratoire que comme une véritable réponse à cette question. Le phénomène est à la fois essentiel, et généralement mal identifié dans la littérature existante. Il est ainsi sous-jacent à la plupart des modèles de diffusion, et en particulier aux modèles fondés sur les rendements croissants. Les mécanismes de généralisation

forment les conditions déterminantes autorisant les rendements croissants et plus généralement l'accumulation collective de connaissances au niveau industriel. Etant donné l'enjeu représenté, il semble crucial de recenser la variété des mécanismes de généralisation existant. Cela facilitera d'autant la construction d'un cadre théorique permettant d'en rendre compte de façon plus informée que ce qu'il nous a été permis de réaliser dans le cadre de cette thèse. De plus, une mise en relation plus systématique des mécanismes de généralisation et des effets concrets sur les stratégies micro-économiques de décision d'investissement mériterait également la mise en œuvre de recherches importantes.

De façon général, l'étude de différents secteurs, et en particulier de nouveaux secteurs en émergence devrait offrir des perspectives stimulantes pour la réflexion. Les dynamique de construction de connaissances sont elles semblables à celles observées dans le cas de la sidérurgie, ou fondamentalement différentes ? Les entreprises demeurent elles le lieu essentiel de création technologique dans ces secteurs ? Dans ces domaines récents, les institutions intermédiaires, associations techniques et professionnelles, ont t-elles également émergé ? Occupent t-elles une place aussi centrale dans l'élaboration de savoirs communs que dans le cas de la sidérurgie ?

Bibliographie

- Abernathy, W. (1978) *The Productivity Dilemma. Roadblock to Innovation in the Automobile Industry*. John Hopkins UP.
- Abernathy, W. et Utterback, J. (1978) "Patterns of Industrial Innovation" in: Technology Review, Vol 80, n°7, June 1978, pp.40-47.
- Abernathy, W, Clark KB (1985) "mapping the winds of creative destruction" in: Research Policy, Vol 14, pp. 3-22.
- Akerlof, G. (1970) "The market for lemons: Qualitative uncertainty and the market mechanism" in: Quarterly Journal of Economics, Vol 84, August 1970, pp. 488-500;
- Akrich, M. (1987) "Comment décrire les objets techniques?" in: Techniques et Cultures, n°9, pp. 49-64.
- Akrich, M. (1989) "La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques" in: Anthropologie et Sociétés, Vol 13, n° 2, pp. 31-54.
- Akrich, M. (1992) "The De-Description of Technical Objects" in: Bijker, W., Law, J. (eds) *Shaping Technology/ Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press, pp. 205-224.
- Akrich, M. (1993) "Les objets techniques et leurs utilisateurs. De la conception à l'action." In: Conein, B.; Dodier, N.; Thévenot, L. (eds) *Les objets dans l'action: de la maison au laboratoire*. EHESS. Pp.35-57.
- Akrich, M. (1995) "User's representations: practices, methods and sociology" in: Rip, A, Misa, T. Schot, J. (eds) : *Managing Technology in Society*. Cambridge UP.
- Akrich, M., Callon, M. Latour, B. (1988) "A quoi tient le succès des innovations" in: Annales des Mines, juin et septembre 1988, pp.4-17 et 14-29.
- Allen (1983) "Collective invention" in: Journal of Economic Behavior and Organization, Vol 4, pp. 1-24.
- Amendola, M. et Gaffard, JL (1988) *The Innovative Choice*. Blackwell.
- Amable, B. (1992) "Effets nationaux d'apprentissage, spécialisation internationale et trajectoires de croissance" in: Foray, D., Freeman, C. (eds) *Technologie et richesse des nations*. Economica. Pp. 213-231.

- Anderson, P., Tushman, M. (1990) "Technological Discontinuities and Dominant Design: A cyclical model of Technological Change" in: Administrative Science Quarterly, Vol 35, December 1990, pp. 604-633.
- Antonelli, C. (1992) "La dynamique des interrelations technologiques; le cas des technologies d'information et de communication" in: Foray et Freeman (eds) *Technologie et richesse des nations*, pp. 323-341.
- Antonelli C. (1994) "Localised technological change and the evolution of standards as economic institutions" in: Information Economics and Policy, Vol 6, pp. 195-216.
- Aoki, M., Rosenberg, N. (1989) "The Japanese Firm as an Innovating Institution" in: Shiraishi, T., Tsuru, S. (eds) *Economic Institutions in a Dynamic Society: Search for a new Frontier*. Mc Millan. P. 137-155.
- Arrow, K. (1962) "Economic Welfare and the Allocation of Resources to Invention" in: Nelson, R. (ed) *The Rate and Direction of Inventive Activity*, NBER.
- Arrow, K. (1962) "The Economic Implications of Learning by Doing" in: Review of Economic Studies, Vol 29, n°2, pp.155-173.
- Arrow, K., Fisher, A (1974) "Environmental preservation, uncertainty and irreversibility" in: Quarterly Journal of Economics, May 1974, pp. 312-319.
- Arora, A. , Gambardella, A. (1994) "The changing technology of technological change: general and abstract knowledge and the division of innovative labor" in: *Research Policy*, Vol 23, pp. 523-532.
- Arthur W.B. (1988) "Competing Technologies: an overview " in: Dosi et Alii (eds) *Technical Change and Economic Theory*. Pinter, pp. 590-607.
- Arthur B. (1989) "Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events" in The Economic Journal, Vol 99, March 1989, pp. 116-131.
- Atkinson, A. et Stiglitz, J. (1969) "A new View of technological Change" in: The Economic Journal, Vol 79, pp. 573-578.
- Baier, V., March, J., Saetren, H. (1988) "Implementation and Ambiguity" in: March, J. *Decisions and Organizations*, op cit. pp. 150-164.
- Baldwin, R. et Krugman, P. (1988) "Market Access and International Competition: a Simulation Study of 16k Random Access Memories" in: Feenstra, R. (1988) *Empirical Methods for International Trade*. MIT Press.
- Becker, H. (1960) "Notes on the Concept of Commitment" in: American Journal of Sociology, Vol 66, pp. 32-40.

- Béret, P. (1997) "Les recherches sur l'investissement immatériel. Un bilan d'étape" Working Paper, Lest-CNRS, 05/97.
- Berg S. (1989) "The production of Compatibility: Technical Standards as Collective Goods" in: Kyklos, Vol 42, Fasc 3, pp. 361-383.
- Besen, S. et Raskin, L. (1991) "An Introduction to the Law and Economics of Intellectual Property" in: Journal of Economic Perspectives, Vol 5, n°1, Winter 1991, pp. 3-28;
- Bijker, W., Hughes, T., Pinch, T. (eds) *The Social Construction of Technological Systems*. MIT Press.
- Bijker, W., Law, J. (1992) *Shaping Technology/ Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press.
- Boisard, P. Letablier, M.T (1987) "Le camembert: normand ou normé. Deux modèles de production dans l'industrie fromagère" in: 'Entreprises et Produits', Cahiers du CEE, n°30, p.v à 29 .
- Bourdieu (1980) *Le sens pratique*. Ed de Minuit.
- Boyer, R., Chavance, B., Godard, O. (dir) *Les figures de l'irréversibilité en économie*. EHESS.
- Boyer, R. (1992) "La révolution des modèles. Introduction" in: Foray, D., Freeman, C. (eds) *Technologie et richesse des nations. Economica*. Pp. 103-119.
- Buchanan, J. (1965) "An economic theory of clubs" in: Economica, Vol 32, n°1, pp. 1-14.
- Callon, M. (1980) "Struggles and negotiations to define what is problematic and what is not. The socio-logic of translation" in: Knorr, K., Whitley, R. *The Social Process of Scientific Investigation*. Reidel Publ. P. 204
- Callon, M. (1980) "The State and technical innovation: a case study of the electrical vehicle in France" in: Research Policy, Vol 9, pp. 358-376.
- Callon, M. (1986) "Eléments pour une sociologie de la traduction. La domestication des coquilles St Jacques et des marins pêcheurs de la baie de St Brieuc" in: L'Année Sociologique, pp. 171-208.
- Callon, M. (1991) "Réseaux technico-économiques et irréversibilités" in: Boyer, R. et Al. (eds) op cit. pp. 195-230.
- Callon, M. (1992) "Sociologie des sciences et économie du changement technique: l'irrésistible montée des réseaux technico-économiques" in: Coll. CSI, *Ces réseaux que la raison ignore*. L'Harmattan. Pp. 53-78.

- Callon, M. (1992) "Variété et irréversibilité dans les réseaux de conception et d'adoption des techniques" in: Foray, D. & Freeman C. (eds) *Technologie et richesse des nations*. Economica. Pp. 275-324.
- Callon, M. (1994) "Is Science a Public Good?" in: Science, Technology and Human Values, Vol 19, n°4, pp. 395-424.
- Callon, M. et Latour, B. (1981) "Unscrewing the big Leviathan: how actors macro-structure reality and how sociologists help them to do so" in: Knorr-Cetina, K., Cicourel, A. (eds) *Advances in Social Theory and Methodology: Toward an Integration of Micro and Macro Sociologies*. Routledge. Pp. 277-303.;
- Callon, M. Law, J. (1989) "On the Construction of Sociotechnical Networks: Content and Context Revisited" in: Knowledge and Society: Studies in the Sociology of Science Past and Present, Vol. 8, Pages 57-83. -
- Callon, M., Courtial, JP, Penan, H. (1993) *La scientométrie*. PUF
- Callon M., Laredo P. et Mustar P. (1995) *La Gestion stratégique de la recherche et de la technologie*. Economica
- Cambrosio, A. Keating, P. (1988) "Going Monoclonal : Art, Science and Magic in the Day to Day Use of Hybridoma Technology" in : Social Problems, Vol 35, n°3, pp. 244-259.
- Carlsson, B., Jacobsson, S. (1992) "Systèmes technologiques et performances économiques: la diffusion de l'automatisation en Suède" in: Foray et Freeman, op cit. pp.80-99.
- Carlsson, B., (ed) (1995) *Technological Systems and Economic Performance: the Case of Factory Automation*. Kluwer. Pp. 21-56.
- Carlton D., Klamer J. (1983) "The need for Coordination Among Firms, with special reference to Network industries" in : The university of Chicago Law Review, Vol 50, pp. 446-465.
- Charue, F. & Midler, C. (1992) "Mutations industrielles et apprentissage collectif" in : Terssac, G., Dubois, P. (Dir.) *Les nouvelles rationalisations de la production*. Cépaduès Ed. pp. 187-225.
- Chiarmonte, F. Dosi, G. (1992) "Les microfondements de la compétitivité et leurs conséquences macro-économiques" in: Foray, D., Freeman, C. (eds) *Technologies et richesse des nations*. Economica. P. 121-161.
- Cohen, W., Levinthal, D. (1989) "Innovation and Learning: the Two Faces of R&D" in: The Economic Journal, Vol 99, pp. 569-596.
- Cohen, W, Nelson, R., Walsh, J. (1996) "A First Look at the Results of the 1994 Carnegie Mellon Survey of Industrial R&D in the United States" presented at: International

- Workshop on Appropriability and Technological Opportunity in a Global Economy, NISTEP, Tokyo, February 1996.
- Cohendet, P. et Llerena, P. (1989) "Flexibilités, risque et incertitude dans la théorie de la firme: un survey" in: Cohendet et Llerena (eds) *Flexibilité, information et décision*. Economica. Pp. 7-71.
- Cohendet, P. Llerena, P. (1990) "Nature de l'information, évaluation et organisation de l'entreprise" in: *Revue d'Economie Industrielle*, n°51, 1er trimestre, pp. 141-165.
- Cohendet, P., Ledoux, MJ, Zuscovitch, E. (1991) "The evolution of new materials: a new dynamic for growth" in: OECD, *Technology and Productivity: the Challenges for Economic Policy*. OCDE, Paris.
- Cohendet, P., Heraud, JA, Zuscovitch, E. (1992) "Apprentissage technologique, réseaux économiques et appropriabilités des innovations" in: Foray et Freeman (eds) *Technologie et richesse des nations*. Op cit. pp. 61-78.
- Collins, H. (1985) *Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice*. Sage.
- Corbin, J. et Strauss, A. (1993) "The Articulation of Work through Interaction" in: *The Sociological Quarterly*, Vol 34, N°1, pp. 71-83.
- Cowan R. (1991) "Technological variety and competition: issues of diffusion and intervention" in: OECD (ed) (1991) *Technology and Productivity: The Challenge for Economic Policy*. OCDE, pp.509-521.
- Cowan R. (1991) "Tortoises and Hares: Choice among Technologies of unknown merit" in: *The Economic Journal*, Vol 101, July 1991, pp. 801-814.
- D'Iribarne, A. (1990) "La gestion de l'organisation et des ressources humaines comme facteur stratégique de la production et de la diffusion de l'innovation" in: *Revue d'Economie Industrielle*, n°51, 1er trimestre, pp. 166-183.
- Dagupta, P. David, P. (1994) "Towards a new economics of science" in: *Research Policy*, Vol 23, pp. 487-521.
- Dahmén, E. (1989) "'Development Blocks' in Industrial Economics" in: Carlsson, B. (ed) *Industrial Dynamics*. Kluwer.
- Dalle, JM.(1995) "Dynamiques d'adoption, coordination et diversité: la diffusion des standards technologiques" in: *Revue économique*, Vol 46, n°4, juillet 1995, pp. 1081-1098.
- Dasgupta et David (1994) "The New Economics of Science" in: *Research Policy*, Vol 25,
- David P.A. (1985) "Clio and the economics of QWERTY" in: *American Economic Review*, Vol 75, n°3, pp.332-337.

- David, P. (1986) “La moissonneuse et le robot” in: Salomon, Schméder (eds) op cit.pp.109-130. Les modèles dits bayésiens représentent une forme hybride.
- David, P. (1987) “Some new standards for the economics of standardization in the information age” in: Dasgupta, P., Stoneman, P. (eds) *Economic Policy and Technology Performance*. Cambridge UP., pp. 206-239.
- David, P. (1994) “Why are institutions ‘the carriers of history’?: Path dependence and the evolution of conventions, organizations and institutions” in: Structural Change and economic Dynamics, Vol 5, n°2, pp. 205-220.
- David, P., Mowery, D., Steinmuller, W. (1994) “Analyzing the Economic Payoffs from Basic Research” in: Mowery, D. (1994) *Science and Technology Policy in Interdependent Economies*. Kluwer. pp. 57-78.
- David, P. et Foray, D. (1996) “Information Distribution and the Growth of Economically Valuable Knowledge: A Rationale for Technological Infrastructures Policies” in: Teubal et Al. (eds) *Technological Infrastructure Policy. An International Perspective*. Kluwer. pp. 87-116;
- David, P. Rothwell G.(1996) “Standardization, Diversity, and Learning: a Model for the Nuclear Power Industry” in: International Journal of Industrial Organization, p. 186
- De Terssac, G. (1992) *L'autonomie dans le travail*. Octarès.
- De Terssac, G., Reynaud, JD (1992) “L'organisation du travail et les régulations sociales” in: De Terssac, G, Dubois, P. (eds) *Les nouvelles rationalisations de la production*. Op cit., pp. 169-185.
- Dodier, N. (1990) “Représenter ses actions. Le cas des inspecteurs et des médecins du travail” in: Pharo, P., Quéré, L. (eds) *Les formes de l'action*. EHESS, pp. 115-148.
- Dodier, N. (1993) “Les arènes des habiletés techniques” in: Conein, B. Dodier, N., Thévenot, L. (eds) *Les objets dans l'action. De la maison au laboratoire*. EHESS,pp. 115-140.
- Doeringer, P, Piore, M. (1971) *Internal Markets and Manpower Analysis*. DC Heat & Co.
- Doeringer, P. (1986) “Intenal Labor Markets and Non-competing Groups” in : American Economic Review, Vol.76, n°2, pp. 48-52.
- Dosi, G. (1982) “Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change” in: Research Policy, Vol 11, n°3, pp. 147-162
- Dosi, G. (1988) “Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation” in: Journal of Economic Literature, Vol 26, pp. 1120-1171.

- Dosi, G., Teece, D., Winter, S. (1990) “Les frontières des entreprises: vers une théorie de la cohérence de la grande entreprise” in: Revue d’Economie Industrielle, n°51, 1er trimestre 1990, pp. 238-254.
- Dourille, E. (1981) *La sidérurgie dans le monde depuis 1952*. Notes et Etudes Documentaires. Documentation Française.
- Eymard-Duvernay, F. (1987) “Les entreprises et leurs modèles” in: ‘Entreprises et Produits’, Cahiers du CEE, n°30, p.v -1 .
- Eymard-Duvernay, F. (1989) “Conventions de qualité et formes de coordination” in: Revue Economique, Vol 40, n°2, pp.329-360.
- Eyraud, F., Iribarne, A.(d’), Maurice, M., Rychener, F. (1988) “L’apprentissage par les entreprises des technologies flexibles: une recomposition d’acteurs et l’émergence de nouvelles professionnalités” in: Cohendet, P. et Alii (eds) *L’après-Taylorisme. Nouvelles formes de rationalisation dans l’entreprise en France et en Allemagne*. Economica.
- Eyraud, F., Iribarne, (d’)A., Maurice, M., Rychener, F. (1986) Des entreprises en mutation dans la crise – apprentissage des technologies flexibles et émergence de nouveaux acteurs. LEST-CNRS
- Farell, J., Saloner, G. (1985) “Standardization, Compatibility, and Innovation” in: The Rand Journal of Economics, Vol 16, n°1, Spring 1985, pp. 70-83.
- Farell J., Saloner G. (1986) “Installed Base and Compatibility: Innovation, Product Preannouncements, and Predation” in: American Economic Review, Vol 76, n°5, december 1986, pp. 940-955;
- Farell J, Saloner G. (1988) “Coordination through Committees and Markets” in: The Rand Journal of Economics, Vol 19, n° 2, Summer 1988, pp.235-252;
- Favereau, O. (1989) “Vers un calcul économique organisationnel” in: Revue d’Economie Politique, Vol 99, n°2, mars -avril 1989, pp. 322-354.
- Favereau, O. (1989) “Marchés internes, marchés externes” in: Revue Economique, Vol. 40, n°2, pp. 273-328
- Favereau, O. (1989) “Valeur d’option et flexibilité: de la rationalité substantielle à la rationalité procédurale” in: Cohendet, P., Llerena, P. (1989) (eds) *Flexibilité, information et décision*. Economica. Pp.120-182;
- Favereau, O. (1991) “Irréversibilités et institutions: problèmes micro-macro” in: Boyer, R. et Alii (eds) op cit. p. 69-96.

- Favereau (1996) “L’incomplétude n’est pas le problème, c’est la solution” in: Reynaud, B. (dir) *Les limites de la rationalité*. La découverte.
- Foray D. (1989) “Les modèles de compétition technologique: une revue de la littérature” in: Revue d’Economie Industrielle, n° 48, pp. 16-34.
- Foray D. (1990) “Exploitation des externalités de réseau versus évolution des normes: les formes d’organisation face au dilemme de l’efficacité dans le domaine des technologies de réseau” in: Revue d’Economie Industrielle, n° 51, pp. 113-140.
- Foray, D. (1992) “Les mécanismes de la standardisation” in: Foray et Freeman (eds) op cit., pp.235-239;
- Foray D. (1993) “Standardisation et concurrence: des relations ambivalentes” in: Revue d’Economie Industrielle, n°63, pp. 84-101.
- Foray, D. (1993) “Autour de l’apprentissage organisationnel et de l’économie du savoir” in: Revue d’Economie Industrielle, n°65, 3ème trimestre, pp. 96-100.
- Foray, D. (1995) “Les brevets dans la nouvelle économie de l’innovation” in: Baslé, M., Dufourt D., Héraud, JA., Perrin, J. (eds) *Changements institutionnels et changements technologiques. Evaluation, droits de propriété intellectuelle, système national d’innovation*. CNRS Ed. Pp. 125-151
- Foray, D. (1996) “Diversité, sélection et standardisation: les nouveaux modes de gestion du changement technique” in: Revue d’Economie Industrielle, n°75, 1er trimestre, pp. 257-274
- Foray, D., LeBas, C. (1986) “Diffusion de l’innovation dans l’industrie et fonction de recherche technique: dichotomie ou intégration” in: Economie Appliquée, tome 39, n°3, pp. 615-650.
- Foray, D. et Mowery, D. (1989) “L’intégration de la R&D industrielle : nouvelles perspectives d’analyse” in : Revue économique, n°3, pp. 501-530.
- Foray, D., Grübler, A. (1990) “Morphological analysis, diffusion and lock-out of technologies: Ferrous casting in France and the FRG.” In: Research Policy, Vol 19, pp. 535-550.
- Foray, D. et Freeman, C. (1992) *Technologie et richesse des nations*. Economica.
- Frankel, M. (1955) “Obsolescence and Technological Change in a Maturing Economy” in: American Economic Review, Vol 45, pp. 296-319.
- Freeman, C. (1988) “Japan: a New National System of Innovation?” in: Dosi, G. et Al. (eds) *Technical Change and Economic Theory*. Pinter.

- Freeman, C. (1994) "The economics of technical change" in: Cambridge Journal of Economics, Vol 18, pp. 463-514.
- Fujimura, J. (1987) "Constructing 'Do-able' Problems in Cancer Research: Articulating Alignment" in: Social Studies of Science, Vol 17, pp. 257-293
- Fujimura, J. (1988) "The Molecular Biological Banwagon in Cancer Research : Where Social Worlds Meet" in : Social Problems, Vol 35, n°3, June 1988.
- Gaffard, JL (1989) "*Marché et organisation dans les stratégies technologiques des firmes industrielles*" in: Revue d'Economie Industrielle, n°48, pp.35-51
- Gaffard, JL. (1990) *Economie industrielle et de l'innovation*. Dalloz.
- Gold, B. (1981) "Technological Diffusion in Industry: Research Needs and Shortcomings" in: The Journal of Industrial Economics, Vol 29, n°3, pp. 247-269.
- Gold, B. Peirce, W., Rosegger, G., Perlman, M. (1984) *Technological Progress and Industrial Leadership. The Growth of the US Steel Industry, 1900-1970*. LexingtonBooks.
- Gold, B.; Rosegger, G., Boylan M. (1980) *Evaluating Technological Innovations. Methods, Expectations, and Findings*. Lexington Books.
- Goody, J. (1979) *La raison graphique. La domestication de la pensée sauvage*. Ed de Minuit, p.58.
- Griliches, Z. (1957) "Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change" in: Econometrica, Vol. 25, n°3, October 1957, pp. 501-522.
- Hard, M. (1994) "Technology as Practice : Local and Global Closure Processes in Diesel-Engine Design" in : Social Studies of Science, Vol. 24, pp. 549-585.
- Harrison, J. March, J. (1988) "Decision-Making and Postdecision Surprises" in: March, J. *Decisions and Organizations*. Oxford UP. Pp. 228-249.
- Hatchuel, A. (1994) "Apprentissages collectifs et activités de conception" in: Revue Française de Gestion, juin-juillet-août 1994, pp. 109-120.
- Hatchuel, A. (1994) "Frédéric Taylor, une lecture épistémologique. L'expert, le théoricien, le doctrinaire" in: Bouilloud, P., Lécuyer, JP. *L'invention de la gestion*. L'Harmattan.
- Hatchuel, A. (1996) "Coopération et conception collective. Variétés et crises des rapports de prescription." In: De Terssac, G. Friedberg, E. (dir) *Coopération et conception*. Octares. Pp. 101-121.
- Hatchuel, A. (1997) "Expertise et compétence au travail. Formes des savoirs et organisation de l'action collective" in: CGS -Ecole des Mines de Paris, unpublished.

- Hatchuel, A., Weil, B. (1992) *L'expert et le système. Gestion des savoirs et métamorphose des acteurs dans l'entreprise industrielle*. Economica;
- Hayek, F. (1937) "Economics and Knowledge" in: Economica, February 1937, pp. 33 -54.
- Henderson, K. (1995) "The visual culture of engineer" in: Star, S. (ed) *The Cultures of Computing*. Blackwell, pp. 158-180.
- Henderson, R. Clark, K. (1990) "Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms" in: Administrative Science Quarterly, n°1, March 1990, pp. 9-30.
- Henry, C. (1974) "Investment decisions under uncertainty: The irreversibility effect" in: American Economic Review, Vol 64, Decembre 1974, pp.1006-1012.
- Herriot, S., Levinthal, D., March, J. (1985) "Learning from Experience in Organizations" in: American Economic Review, Vol 75, pp. 298-302.
- Houndshell, D. (1983) *From the American System to Mass Production, 1800-1932: The Development of Manufacturing Technology in the United States*. Baltimore.
- Hughes, T. (1983) *Networks of Power: Electrification in Western Society 1880-1930*. John Hopkins UP. p. 19
- Hughes, T. (1987) "The Evolution of large Technological Systems" in : Bijker, Hughes et Pinch (eds) op cit. pp. 51-82.
- Imai, K., Nonaka, I., Takeuchi, H. (1985) "Managing the New Product Development Process: How Japanese Companies Learn and Unlearn" in: Clark, K., Hayes, R., Lorenz, C. *The Uneasy Alliance. Managing the Productivity-Technology Dilemma*. HBS Press.
- Salomon, JJ. et Schméder, G. (1986) *Les enjeux du changement technologique*. Economica.
- Jaffé, A. (1989) "Real effects of Academic Research" in: American Economic Review, Vol 75, n°5, pp. 957-970.
- Jolivet, E. (1999) "La politique industrielle de la France en échec : le cas de la sidérurgie dans la période d'après-guerre" in : WP, LEST – CNRS forthcoming.
- Joly, PB, De Looze MA (1996) "An analysis of innovation strategies and industrial differentiation through patent applications : the case of plant biotechnology" in : Research Policy, Vol. 25, pp.1027-1046.
- Jordan, K. & Lynch, M. (1992) "The Sociology of a Genetic Engineering Technique : Ritual and Rationality in the Performance of the 'Plasmid Prep'", in : Clarke, A., Fujimura, J. (eds) *The Right Tool for the Right Job*. Princeton UP. pp. 77-114.
- Katz M., et Shapiro C. (1985) "Networks externalities, Competition, and Compatibility" in: American Economic Review, Vol 75, pp. 424-440;

- Kline, S., Rosenberg, N. (1986) "An Overview of Innovation" in: Landau, R. , Rosenberg, N. (eds) *The Positive Sum Strategy*. National Academy Press. pp. 275-305.
- Kogut, B; Zander, U. (1992) "Knowledge of the Firm, Combinative Capabilities, and the Replication of Technology" in: Organization Science, Vol 3, n°3, August 1992, pp. 383-397
- L. Lynn (1982) *How Japan Innovates*. Boulding Westview.
- Lanciano, C., Maurice, M., Nohara, H., Silvestre, JJ. (1993) *L'analyse sociétale de l'innovation: genèse et développement*. Document Lest-CNRS. repris dans Lanciano et Alii (1999) *Les acteurs de l'innovation et l'entreprise*. L'Harmattan.
- Langlois, R. Robertson, P. (1995) *Firms, Markets and Economic Change. A Dynamic Theory of Business Institutions*. Routledge.
- Latour B. (1986) "The powers of association" in Law J. (ed) *Power, Action and Belief. A New Sociology of Knowledge?*.in: Sociological Review Monograph 32. Routledge & Kegan Paul. pp. 264-280.
- Latour, B. (1989) *La science en action*. La Découverte.
- Latour, B. (1993) *Petites leçons de sociologie des sciences*. La découverte.
- Latour, B. (1996) "Do Scientific Objects Have a History? Pasteur and Withehead in a Bath of Lactic Acid" in: Common Knowledge, Vol. 5, n°1, pp. 74-91.
- Latour, B. et Woolgar, S. (1979) *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts*. Princeton UP.
- Law, J. (1987) "technology and Heterogeneous Engineering: the Case of Portuguese Expansion" in: Bijker, W., Hughes, T., Law, J. (eds) *The Social Construction of Technological Systems*. MIT Press. Pp. 111-134.
- Law, J. et Callon, M. (1992) "The Life and Death of an Aircraft: A Network Analysis of Technical Change" in: Bijker, W. & Law, J. (eds) op cit. pp.21-52.
- Le Bas, C.; Sylvestre-Baron, P.(1995) "Difusion technologique non binaire et schéma épidémiologique. Une reconsidération" in: Economie Appliquée, tome 48, n°3, pp. 71-101
- Liebowitz, S. et Margolis, S. (1990) "The Fable of the Keys" in: Journal of Law and Economics, April 1990, Vol 33, pp. 1-26.
- Liebowitz S., Margolis S. (1994) "Networks Externality: an Uncommon Tragedy" in: Journal of Economic Perspective, Vol 8, N°2, Spring 1994, pp. 133-150;

- Leibowitz S., Margolis S. (1995) " Path-Dependence, Lock-in, and History" in: The Journal of Law and Economics, Vol 11, n° 1, pp. 205-226.
- Leonard-Barton D. (1988) " Implementation as Mutual Adaptation of Technology and Organization " in : Research Policy, Vol 17, pp. 251-265.
- Levin, R., Klevorick, K., R., Nelson, R., Winter, S. (1987) "Appropriating the Returns from Industrial Research and Development" in: Brooking Papers on Economic Activity: Microeconomics, Vol 3, pp. 783-820.
- Levitt, B., March, J. (1988) "Organizational Learning" in: Annual Review of Sociology, n°14, pp. 319-340.
- Lissoni F, Metcalfe J. (1994) "Diffusion of Innovation Ancient and Modern: A Review of the Main Themes." in: Dodgson M., Rothwell R. (eds) (1994) *The Handbook of Industrial Innovation*. Edward Elgar. pp.106-141.
- Loasby, B. (1998) "The organisation of capabilities" in : Journal of Economic Behavior & Organization, Vol. 35, pp. 139-160.
- Loewenstein, G., Thaler, R. (1989) "Anomalies. Intertemporal choice" in: Journal of Economic Perspectives, Vol 3, n°4, Fall 1989, pp. 181-194..
- Lucas, R. (1988) "On the mechanics of Economic Development" in: Journal of Monetary Economics, Vol 22, pp. 3-42.
- Lundvall BA. (1988) "Innovation as an Intercative Process" in: Dosi et Alii (eds) *Technical Change and Economic Theory*, Pinter, pp. 349-369.
- Lundvall, B. (ed) (1993) *National Systems of Innovation. Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*. Pinter.
- Magaud, J. et Sugita, K. (1992) *France-Japon: un produit, deux façons de faire*, Dossier de recherche du CEE n°43.
- Magaud, J., Sugita, K. (1991) France-Japon. Un produit, deux façons de faire. Dossier de recherche n°43, CEE, janvier 1991.
- Magaud, J., Sugita, K. (1992) "France-Japon sur le terrain" in: La Lettre d'Information du CEE, n°25, septembre 1992
- Maman, C. (1994) "L'organisation: de l'indivision vers l'individuation en devenir d'un concept" in: Economies et Sociétés, n°8, Décembre 1994, pp. 61-88.
- Mansfield, E. (1961) "Technical Change and the Rate of Imitation" in: Econometrica, Vol 29, n°4, pp. 741-766.
- Mansfield, E. (1963) "The Speed of Response of Firms to New Techniques" in: Quarterly Journal of Economics, Vol 67, May 1963, pp. 290-309.

- Mansfield, E. (1968) *Industrial Research and Technological Innovation*. Norton & Co.
- Mansfield, E. (1988) "Industrial R and D in Japan and the United States: a Comparative study", in: American Economic Review, May 1988, pp223-229.
- March, J. (1988) *Decisions and Organizations*. Oxford UP.
- March, J. et Simon, H. (1958) *Organizations*. Wiley & Sons.
- March, J., Sproull, L., Tamuz, M. (1991) "Learning from samples of one or fewer" in: Organization Science, Vol 1, n°2, February 1991, pp.1-13.
- Maurice, M. (1989) "Méthode comparative et analyse sociétale. Les implications théoriques des comparaisons internationales" in: Sociologie du Travail, n°2, pp. 175-191.
- Maurice, M. (1995) "The Social Foundations of Technical Innovation: Engineers and the Division of Labour in France and Japan" in: Littek, W., Charles, T.(eds) *The New Division of Labour. Emerging Forms of Work Organisation in International Perspective*. De Gruyter.
- Maurice, M. (1998) "De l'espace de qualification à l'espace d'innovation (réflexion sur la dynamique de l'analyse sociétale)" in : Gazier, B., Marsden, D., Maurice, M., Sellier, F. (1998) *Repenser l'économie du travail. De l'effet d'entreprise à l'effet sociétal*. pp. 27-39.
- Maurice, M., Sellier, F. et Silvestre, JJ. (1982) *Politique d'éducation et organisation industrielle en France et en Allemagne*. PUF
- Maurice, M., Mannari, H., Takeoka, Y., Inoki, T. (1988) Des entreprises françaises et japonaises face à la mécatronique. Acteurs et organisation de la dynamique industrielle. LEST-CNRS
- Maurice, M., Nohara, H., Silvestre, JJ. (1988) *Organisation, compétence et créativité. Les ingénieurs et la dynamique industrielle au Japon*. Document LEST. N°461046.
- McKenzie, M., Keating, P., Cambrosio, A. (1990) "Patents and Free Scientific Information in Biotechnology: Making Monoclonal Antibodies Proprietary" in: Science, Technology, and Human Values, Vol 15, n°1, winter 1990, pp. 65-83
- Ménard C. (1990) *L'économie des organisations*. Ed La Découverte.
- Metcalf, JS (1988) "The diffusion of innovation: an interpretative survey" in: Dosi et Alii (eds) op cit. pp.560-589
- Metcalf, JS (1990) "On diffusion, investment and the process of technological change" in: Deiac, E., Hörnell, E., Vickery, G. (eds) *Technology and Investment. Crucial Issues for the 1990's*. Pinter

- Metcalf J., Miles I. (1994) "Standards, selection and variety: an evolutionary approach" in Information Economics and Policy, Vol 6, pp. 243-268.
- Midler, C. (1986) "Les concepts au concret: révision sur les liens entre systèmes techniques et systèmes de gestion dans l'industrie automobile" in: Salais, R., Thévenot, L. (eds) *Le Travail: marchés, règles, conventions*. Economica. Pp. 29-50.
- Midler, C. (1993) "Temps du produit, temps du projet, temps des métiers" in: Information sur les Sciences Sociales , Vol 33, n°1, pp. 25-39
- Misa, T. (1992) "Controversy and closure in technological change : constructing 'steel'" in : Bijker, W & law, J. (eds) *Shaping Technology/ Building Society*. Op cit. pp. 109-139.
- Mowery, D. et Rosenberg, N. (1979) "The influence of market demand upon innovation: a critical review of some recent empirical studies" in: Research Policy, Vol 8, pp. 102-153.
- Myers, G. (1985) "Texts as Knowledge Claims : The Social Construction of Two Biology Articles" in : Social Studies of Science, Vol 15, pp. 593-630 ;
- Myers, G. (1995) "From Discovery to Invention : The Writing and Rewriting of two Patents" in : Social Studies of Science, Vol 25, pp. 57-105.
- Nelson, R. (1991) "Why Do Firms Differ, and How Does It Matter?" in: Strategic Management Journal, Vol 12, pp. 61-74.
- Nelson, R., Winter, S. (1977) "In Search of a Useful Theory of Innovation" in: Research Policy, Vol 6, n°1, pp. 36-76
- Nelson, R., Winter, S. (1982) *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Belknap Press of Harvard UP.
- Nelson, R., Rosenberg, N. (eds) (1993) *National Innovation Systems. A Comparative Analysis*. Oxford UP.
- Norman, D. (1993) "Les artefacts cognitifs" in: Conein, B., Dodier, N. Thévenot, L. (eds) *Les objets dans l'action*. EHESS. Pp. 15-34.
- Norotte, M., Bensaïd, J. (1987) "Comportements d'investissement et diffusion de nouvelles technologies" in: Economie et Prévision, Vol 80, pp. 53-67.
- Olson, M. (1968) *The Logic of Collective Action*. Schocken Books.
- Ordober, J. (1991) "A Patent System for Both Diffusion and Exclusion" in: Journal of Economic Perspectives, Vol 5, n°1, Winter 1991, pp. 43-60;
- Pavitt, K. (1984) "Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory" in: Research Policy, Vol 13, pp. 343-373.

- Pavitt, K. (1992) " Les entreprises et la recherche de base" in: Foray, D. Freeman, C. (eds) *Technologie et richesse des nations*, Pinch, T. & Bijker, W. (1987) "The Social Construction of Facts and Artifacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other" in: Bijker, W., Hughes, T., Pinch, T.(eds) *The Social Construction of Technological Systems*. MIT Press.
- Piore, M. (1968) "The Impact of the labor Market Upon the design and selection of Productive Techniques within the Manufacturing Plant" in : Quarterly Journal of Economics, n°82, pp. 602-620.
- Piore, M. (1983) "Labor Market Segmentation : To What Paradigm Does it Belong ?" in : American Economic Review, May 1983, Vol.73, n°2, pp. 249-254.
- Piore, M. (1991) "Nouvelles remarques sur les trajectoires technologiques" in: Boyer, R., Chavance, B., Godard, O. (eds) *Les figures de l'irréversibilité en économie*. EHESS. Pp.137-149.
- Piore, M. et Sabel, C. (1985) "Le paradigme de la production de masse et ses alternatives, le cas des Etats Unis et de l'Italie". in : Thévenot, L. (ed) *Convention économiques*. Cahiers du Centre d'Etude de l'Emploi – PUF, pp. 1-20.
- Ponssard, JP., Tanguy, H. (1993) "Planning in Firms as an Intercative Process" in: Theory and Decision, Vol 34, pp. 139-159.
- Rallet, A., et Torre, A., (dir.) (1995) *Economie industrielle et économie spatiale*. Economica.
- Reynaud JD. (1989) *Les règles du jeu. L'action collective et la régulation sociale*. Ed. Armand Colin. P 173.
- Richardson, G. (1972) "The Organisation of Industry" in : The Economic Journal, septembre 1972, pp.883-896.
- Richardson, G. (1990) *Information and Investment*. Oxford UP. 2d ed.
- Romer, P. (1986) "Increasing Returns and Long Run Growth" in: Journal of Political Economy, Vol. 94, n°5, p. 1102-1037.
- Romer, P. (1990) "Endogeneous Technological Change" in: Journal of political Economy, Vol 98, n°5, S71-102.
- Romer, P. (1993) "Two Strategies for Economic Development: Using Ideas and producing Ideas" in: Proceedings of the World Bank Annual Conference on Development Economics 1992, World Bank Ed. Pp.63-91.
- Rosenberg, N. (1982) *Inside the Black Box. Technology and Economics*. Oxford UP.
- Rosenberg, N. (1990) "Why do firms do basic research (with their own money)?" in: Research Policy, Vol . 19, pp. 165-174; Teece, D. (1986) "Profiting from

- technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy” in: Research Policy, Vol 15, pp. 285-305.
- Rosenberg, N., Vincenti, G. (1978) *The Britannia Bridge: the Generation and Diffusion of Technological Knowledge*. Cambridge.
- Rosenberg, N and. Steinmuller E (1988) “Why are Americans Such Poor Imitators” in: American Economic Review, May 1988;
- Rosenbloom, R. et Abernathy, W. (1982) “The climate for innovation in Industry.” In: Research Policy, Vol 11, pp. 209-225.
- Sahal, D. (1985) “Technological guideposts and innovation avenues” in: Research Policy, Vol 14, pp. 61-82.
- Salais, R., Storper, S. (1994) *Les mondes de production*. EHESS
- Schelling, T. (1955) “An Essay on Bargaining” in: American Economic Review, Vol 46, pp. 281-306.
- Schelling, T. (1960) *The Strategy of Conflict*. Harvard UP.
- Schumpeter, J. (1934) *The Theory of Economic Development*. Harvard UP.
- Scotchmer, S. (1991) “Standing on the Shoulders of Giants” in: Journal of Economic Perspective, Vol 5, n°1, Winter 1991, pp. 29-41;
- Silvestre, JJ. (1985) “Qualification et entreprise: Quelques réflexions en vue d’un renouvellement théorique” in: Salais, R., Thévenot, L. (eds) *Le Travail: marchés, règles, conventions*. Economica. Pp. 107-118.
- Siverberg G., Dosi G., Orsenigo L. (1988) “Innovation, Diversity and Diffusion: A Self-organisation Model” in: The Economic Journal, Vol 98, December 1988, pp. 1032-1054.
- Spence, M. (1973) “Job Market Signaling” in : Quartely Journal Economics, n°87, pp. 355-374.
- Star S. (1983) “Simplification in Scientific Work: An Example from Neuroscience Research” in: Social Studies of Science, vol 13, pp. 205-228.
- Star, S., Gerson, E. (1986) “The Management and Dynamics of Anomalies in Scientific Work” in: The Sociological Quarterly, Vol. 28, n°2, pp. 147-169.
- Star, S. Griesemer, J. (1989) “Institutional Ecology, ‘translations’ and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley’s Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39” in: Social Studies of Science, Vol 19, pp. 387-420.

- Steinmuller, E. (1996) "Technological Infrastructure in Information Technology Industries" in: Teubal, M. et Alii (eds) *Technological Infrastructure Policy. An International Perspective*. Kluwer
- Stiglitz, J. (1975) "The Theory of 'Screening', Education, and the Distribution of Income" in : American Economic Review, n°65, pp. 283-300.
- Stiglitz, J. (1987) "Learning to learn, localized learning and technical progress". In : Dasgupta, P. et Stoneman, P. (eds) *Economic Theory and Technology Policy*, op cit.
- Stoneman, P.(1983) *The Economic Analysis of Technological Change*. Oxford UP.
- Strauss A., Corbin, J. (1990) *Basics of Qualitative Resarch. Grounded Theory Procedures and Techniques*. SAGE
- Strauss, A. (1988) *Qualitative analysis for social scientists*. Cambridge UP.
- Suchman, L. (1988) "Representing practice in cognitive science" in: Human Studies traduction française dans Pharo, P. et
- Thévenot, L. (1985) "Les investissements de forme" in: Conventions économiques, Cahiers du CEE, n°29, pp. 21-71.
- Thévenot, L. (1992) "Nouvelles approches du travail" in: La Lettre d'Information du CEE, n°25, septembre 1992.
- Thévenot, L. (1993) "Essai sur les objets usuels" in: Conein, B., Dodier, N., Thévenot, L. (eds) *Les objets dans l'action*. EHESS. Pp. 85-111
- Thévenot, L. (1996) "Formes de 'savoir collectif' et régimes d'ajustement des actions. Coordination par jugement commun et connaissances distribuées" in: Reynaud B. (ss dir.) *Les limites de la rationalité*. Colloque de Cerisy. Ed La Découverte.
- Thompson, G. (1954) "Intercompany Technical Standardization in the early American Automobile Industry" in: The Journal of Economic History, Vol XIV, Winter 1954, n°1, pp. 1-20.
- Tushman, M., Nelson, R. (1990) "Technology, Organizations, and Innovation. Introduction." in: Administrative Science Quarterly, Vol 35, March 1990, pp. 1-8.
- Tyre, M. (1991) "the introduction of new process technology : International differences in a multi-plant network" in : Research Policy, Vol 20, pp. 57-76.
- Utterback, J., Suarez, F. (1993) "Innovation, compétition, and industry structure" in : Research Policy, Vol 22, pp. 1-21.
- Van Den Belt, H., et Rip, A. (1987) "The Nelson-Winter-Dosi Model and Synthetic Dye Chemistry" in: Bijker, W., Hughes, T., Pinch, T. (eds) *The Social Construction of*

- Technological Systems. New Directions in the Sociology and History of Technology.*
MIT Press. Pp.135-158.
- Von Hippel, E. (1986) "Lead Users: A Source of novel Product Concepts" in: Management Science, Vol. 32, n°7, July 1986, pp. 791-805.
- Von Hippel, E. (1988) *The Sources of Innovation*. Oxford UP.
- Von Hippel (1990) "Task partitioning: An innovation process variable" in: Research Policy, Vol 19, pp. 407-418.
- Von Hippel, E. & Tyre, M. (1995) "How learning by doing is done : problem identification in novel process equipment" in : Research Policy, Vol. 24, pp.1-12.
- Williamson, O. (1979) "Transaction Cost Economics: the Governance of Contractual relations" in: Journal of Law and Economics, n°22, pp. 3-61.
- Williamson, O. (1980) "The Organization of Work: a Comparative Institutional Assesment" in: Journal of Economic Behavior and Organization, n°1, pp.5-38.
- Williamson, O. (1981) "The Economics of Organizations: The Transaction Cost Approach" in: American Journal of Sociology, Vol 87, pp. 548-577.
- Willinger, M. Zuscovitch, E. (1993) "Efficiencie, irréversibilités et constitution des technologies" in: Revue d'Economie Industrielle, n°65, 3ème trimestre, pp. 7-22.
- Winter, S. (1993) "*On Coase, Competence and the Corporation*" in: Williamson, O. (ed) *The Nature of the Firm. Origins, Evolution and Development*. Oxford UP. Pp.179-195.
- Young, A. (1928) "Increasing returns and economic progress" in: The Economic Journal, December 1928, pp. 527-542.
- Zuscovitch, E. (1985) "La dynamique du développement des technologies. Eléments d'un cadre conceptuel" in: Revue Economique, n°5, septembre 1985, pp. 897-915