



HAL
open science

Définition d'un cadre conceptuel et méthodologique pour concevoir un système à flexibilité souhaitée.

Adrien Lelièvre

► **To cite this version:**

Adrien Lelièvre. Définition d'un cadre conceptuel et méthodologique pour concevoir un système à flexibilité souhaitée.. Autre. Ecole Centrale Paris, 2011. Français. NNT: 2011ECAP0031 . tel-00711472

HAL Id: tel-00711472

<https://theses.hal.science/tel-00711472>

Submitted on 8 Jul 2014

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.



Thèse de doctorat

Présentée par

Adrien LELIEVRE

Pour l'obtention du grade
de Docteur de l'École Centrale Paris

Spécialité : **Génie Industriel**

Laboratoire d'accueil : **LISMMA**

Définition d'un cadre conceptuel et méthodologique pour concevoir un système à flexibilité souhaitée

Soutenue le 12 Juillet 2011 devant le jury composé de :

M. Patrick BURLAT	<i>Professeur, Ecoles des Mines Saint Etienne</i>	<i>Président</i>
M. Lyes BENYOUCEF	<i>Chargé de Recherche – HDR, INRIA Metz</i>	<i>Rapporteur</i>
M. Patrick CHARPENTIER	<i>Professeur, ENSTIB Epinal</i>	<i>Rapporteur</i>
M. Alain RIVIERE	<i>Professeur, SUPMECA Paris</i>	<i>Examineur</i>
M. Samir LAMOURI	<i>Professeur, Arts & Métiers ParisTech</i>	<i>Directeur</i>
M^{me} Séverine DURIEUX-PARIS	<i>Maître de Conférences, IFMA Clermont Ferrand</i>	<i>Encadrant</i>
M^{lle} Roberta COSTA AFFONSO	<i>Maître de Conférences, SUPMECA Paris</i>	<i>Co-encadrant</i>
M. Christophe MALRIN	<i>PDG du groupe EXXELIA</i>	<i>Invité</i>
M. Jean-Jacques MAILLARD	<i>Chargé de Mission, MESR Paris (Relations Universités-Entreprises)</i>	<i>Invité</i>

Avant-propos

Ces travaux ont été menés dans le cadre de la convention CIFRE n°792/2007. Cette convention a permis l'étroite collaboration entre :

- *l'équipe du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des Matériaux (LISMMA) de l'Ecole SUPMECA*
- *le personnel du site industriel EUROFARAD de Chanteloup-en-Brie appartenant au groupe EXXELIA.*

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu les membres de mon jury de thèse, Alain RIVIERE, Jean-Jacques MAILLARD et Patrick BURLAT, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail. Je remercie tout particulièrement Lyes BENYOUCEF et Patrick CHARPENTIER pour leur travail de rapporteur, pour la justesse de leurs propos et pour la bienveillance de leurs conseils. Je remercie également Roberta COSTA et Séverine DURIEUX. Leur encadrement de qualité et leurs conseils m'ont fait découvrir la recherche.

Au-delà d'un directeur de thèse exemplaire par sa capacité à révéler le meilleur de chacun, Samir LAMOURI a su éclairer mon parcours de sa sagesse à travers ses conseils tant sur le plan académique que professionnel. Samir LAMOURI extrait l'essence des situations les plus complexes pour mieux appréhender les évolutions futures et faire apparaître les leviers d'action à notre disposition. Il a su m'accompagner à travers les différentes phases du processus de recherche depuis l'émergence de l'idée de potentialité jusqu'à la validation empirique de ce concept. Depuis son soutien en école d'ingénieur jusqu'à mon entrée dans la vie active, je lui dois beaucoup pour ce que je suis devenu. Pour cette raison, je lui suis infiniment reconnaissant et je le remercie pour tout ce qu'il m'a apporté.

Je tiens à remercier Christophe MALRIN pour m'avoir permis d'effectuer mes travaux de recherches au sein de la société EUROFARAD et d'avoir accepté le rôle de responsable scientifique en entreprise dans la cadre de la convention CIFRE, pour la qualité de l'environnement offert pour cette étude mais également pour la confiance qu'il m'a accordée durant cette période. Toujours disponible, à l'écoute et soucieux de donner une cohérence professionnelle à mon parcours, Christophe MALRIN m'a offert un large terrain d'expérimentation associé à une liberté d'action exceptionnelle à travers les responsabilités qu'il m'a confiées.

Mes pensées se tournent naturellement vers les véritables relais et artisans de la mise en œuvre opérationnelle des résultats de mon travail de recherche. Ainsi, je remercie chaleureusement Patrick MARRIETTE, responsable logistique, Guillaîne MANOUVRIER et Stéphane CERNON, coordinateurs logistiques ainsi que toute l'équipe du département logistique de l'usine de Chanteloup-en-Brie pour la confiance qu'ils m'ont accordée à chaque instant depuis la création de cette nouvelle entité. Ce lien étroit établi entre théorie et pratique

constitue à la fois la particularité et toute la richesse d'une thèse CIFRE. Au-delà de l'efficacité indéniable de ce cadre de recherche, je garderai à jamais gravé en ma mémoire toute la sincérité, la richesse et la beauté de ces relations humaines.

Je remercie également Vincent GIARD pour son aide lors de la rédaction de mon premier article, Marc GROSSET pour sa rigueur scientifique et notre collaboration sur le projet de transfert de l'usine EUROFARAD de Lagny sur Marne, Thomas PAVIOT pour avoir partagé son expérience et son regard sur le processus de recherche et tous ceux qui, à travers nos échanges, m'ont permis de progresser dans ma réflexion.

Enfin, je remercie famille et amis, qui, bien souvent dans l'ombre du quotidien, m'ont soutenu dans mes efforts, ont su s'adapter à mon indisponibilité et ont ainsi contribué activement à l'accomplissement de ce travail.

A ma Mère qui s'est sacrifiée pour mon éducation et ma réussite,

A mon Amour qui illumine ma Vie,

A mon Père,

INTRODUCTION GENERALE

Tout acteur économique assume une fonction génératrice de plus-value en contrepartie de laquelle il perçoit une rémunération. Cependant, la mise en œuvre d'une même fonction peut s'exprimer sous des formes diverses et variées à travers un nombre plus ou moins important d'agents. Ces différentes interprétations d'un même besoin, d'une même demande, permettent d'apporter des offres complémentaires ou encore concurrentes avec un niveau de performance qui leur est propre. Afin de continuer à assumer son rôle pleinement et par conséquent, de rendre sa présence nécessaire voire indispensable sur le marché, un acteur économique doit préserver cet équilibre et maintenir en adéquation la réponse apportée avec le besoin.

Pour parvenir à cet équilibre ou encore le déplacer, l'agent économique peut agir respectivement sur l'un et l'autre des deux termes de cette équation. En effet, la demande ne précède pas systématiquement l'offre que cette dernière tenterait de satisfaire. L'application des principes du marketing explore l'influence que peut avoir un agent sur la demande elle-même. Ainsi, l'offre ne constitue pas l'unique variable d'ajustement qui permettrait d'atteindre l'équilibre. Or, l'équilibre recherché est local et subjectif car défini du point de vue de l'agent considéré. Les actions menées pour l'atteindre peuvent donc générer des perturbations sur les autres équilibres locaux compte tenu des interactions existantes entre les différents agents.

Les rapports de force entre les agents et leurs tailles respectives influencent l'utilisation préférentielle des leviers d'action internes sur leur propre organisation ou externes sur leur environnement. Par conséquent, l'ouverture des marchés, l'accroissement du nombre d'acteurs mis en relation au sein d'un même réseau de chaînes logistiques et le développement de la concurrence au détriment de la complémentarité des offres ont contribué à rendre le coût d'une action externe prohibitif par rapport à celui d'une action interne.

En effet, le développement de l'interdépendance des acteurs au sein d'un marché mondialisé s'accompagne inéluctablement de la multiplication des sources de perturbation des équilibres atteints. Ces derniers sont rendus de ce fait toujours plus instables. De ces connexions complexes naît une menace de nature systémique qui augmente le degré

d'incertitude de l'information disponible. La source, la nature comme l'ampleur et la propagation de ces perturbations pouvant difficilement être appréhendées, la maîtrise des acteurs économiques sur ces événements extérieurs est limitée. D'autre part, la diminution du poids relatif des acteurs au sein du tissu économique a conduit les entreprises à développer leur capacité d'adaptation en se dotant d'outils d'analyse et de leviers d'action leur permettant de modifier leur mode de fonctionnement propre.

L'entreprise EUROFARAD s'inscrit dans le schéma énoncé ci-dessus à la fois par sa stratégie de niche qui positionne son offre comme complémentaire aux autres réponses présentes sur le marché mais également à travers l'expression de son modèle économique dont le cœur de métier est la fabrication sur cahier des charges de composants électroniques. Sa taille réduite, comparativement aux autres acteurs du marché des composants, la conduit naturellement à favoriser une adaptation interne par rapport aux besoins externes.

Cependant, la nécessité de graduer le niveau des stimuli extérieurs apparaît immédiatement pour apporter une réponse mesurée et adaptée. Cette graduation est propre à chaque entité et dépend directement de son aptitude à absorber les fluctuations et variations des paramètres extérieurs. Celle-ci définit par conséquent le seuil au-dessus duquel l'entreprise est contrainte de procéder à un changement structurel pour ne pas altérer la qualité de sa réponse à la demande du marché et poursuivre sa fonction au sein du tissu économique afin de garantir sa survie.

D'un point de vue macroscopique, cette aptitude à absorber les fluctuations est couramment désignée comme son degré de flexibilité. Ainsi définie, on comprend mieux l'intérêt de relever ce seuil pour une entreprise en ce sens qu'il restaure un peu de stabilité au sein d'un environnement qui apparaît turbulent, ou du moins que les acteurs, pris de manière isolés, ont des difficultés à maîtriser.

En poussant le raisonnement, la flexibilité peut ainsi être perçue comme un facteur d'inertie en s'opposant à l'évolution puisque celle-ci fait référence à une position d'équilibre autour de laquelle le système évolue en réaction aux sollicitations extérieures. Il existe donc un risque sous-jacent de laisser dériver le système progressivement sans déclencher de signal d'alerte avant de basculer en dehors des limites acceptables pour celui-ci.

Néanmoins, dans ce contexte, la flexibilité apparaît comme un facteur clé de succès que les managers et dirigeants s'efforcent de développer. Or, il est intéressant de s'interroger sur

la pertinence de cette approche et de la formulation de ce problème. S'agit-il avant tout de développer ou bien de dimensionner la flexibilité requise ? Pour cette raison, nous parlerons dans la suite de notre étude de flexibilité souhaitée.

La finalité commune aux nombreuses études et propositions de mesure de la flexibilité est de permettre de comparer le niveau de performance des différents acteurs selon ce critère. Or, en isolant le degré de flexibilité du besoin propre à la structure concernée, ces outils d'analyse ont contribué à promouvoir la recherche de la maximisation de ce critère. Ainsi, lors de sa mise en œuvre opérationnelle, la flexibilité est passée du statut de moyen au service d'une stratégie au statut d'objectif en soi. Enfin, l'absence de cadre théorique, formalisant la déclinaison sur le plan opérationnel du besoin de se doter d'un système flexible, a conduit les managers et dirigeants à introduire la flexibilité en aval du processus de décision comme critère de sélection. Or, cette méthodologie privilégie les solutions surdimensionnées et par conséquent favorise le gaspillage.

L'enjeu consiste donc à redéfinir le rôle de la flexibilité dans le cadre du processus de décision afin d'exploiter au mieux les potentialités intrinsèques du système et atteindre de cette manière le niveau de flexibilité souhaité. Ainsi, nous nous attacherons à déterminer comment faire de la flexibilité un véritable outil d'adaptation et d'efficience destiné aux managers et dirigeants d'entreprises en permettant de concevoir des systèmes à flexibilité souhaitée alors que les approches descriptives actuelles de ce concept développent essentiellement sa fonction d'analyse ?

Sans le concept de potentialité que nous définirons dans le chapitre III, il n'est pas possible de formuler le problème suivant : Existe-il une implication, au sens mathématique, entre le fait d'avoir des potentialités et d'être flexible ? En l'absence de cadre théorique capable d'articuler à la fois les caractéristiques intrinsèques d'un système et l'utilisation de celles-ci à travers un processus de décision, l'ambiguïté des termes conduirait à se demander si le fait d'avoir de la flexibilité implique nécessairement d'être flexible ? Pour introduire ce besoin, nous formulerons deux remarques :

- 1) Les potentialités peuvent ne pas correspondre au besoin lors de la réalisation de l'événement perturbateur
- 2) Les leviers d'action peuvent ne pas être identifiés. Ils seront par conséquent, rarement et difficilement activés.

Afin de présenter la suite logique des travaux décrits tout au long de ce mémoire, un schéma simplifié est proposé ci-dessous à travers la Figure 1.

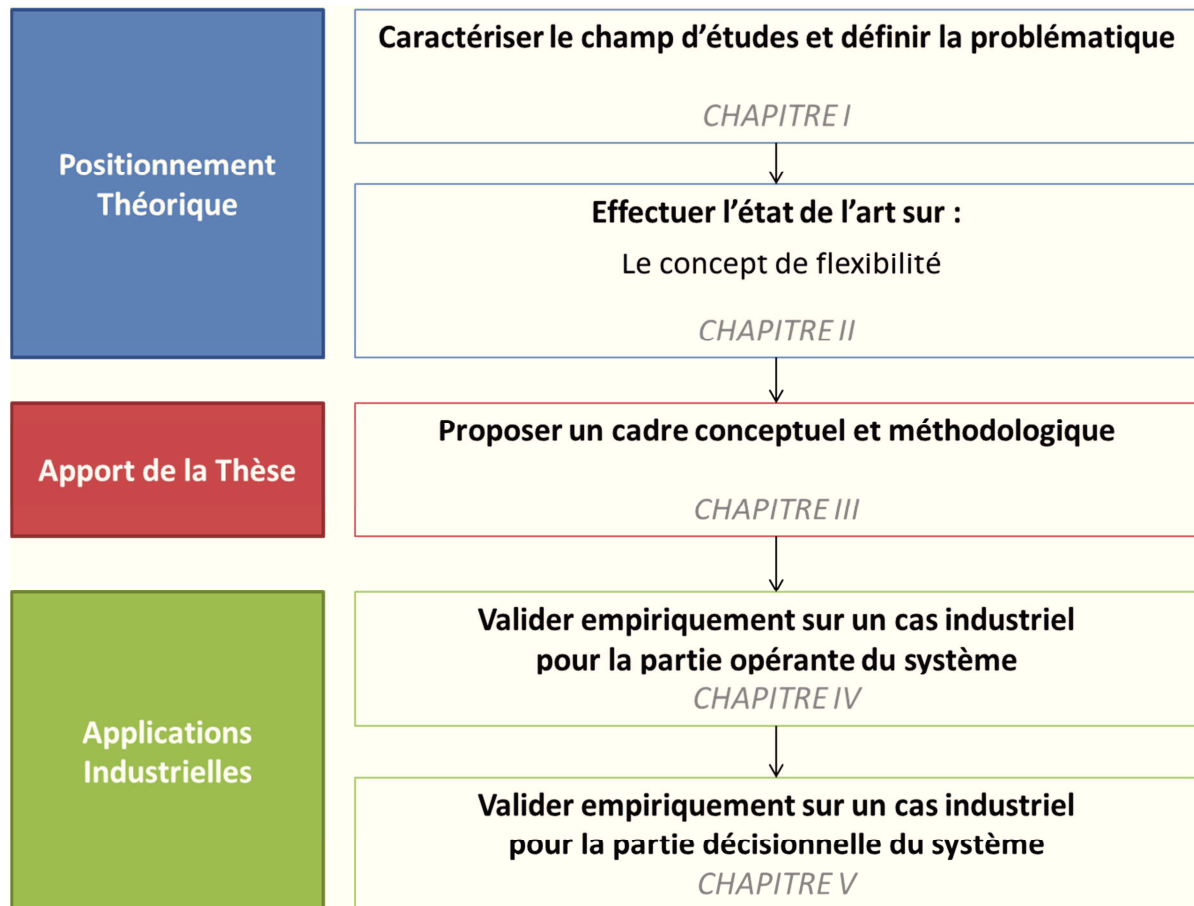


Figure 1 : Articulation de la recherche

L'objet du premier chapitre est de définir le champ général dans lequel nos travaux de recherche se sont inscrits : la prise de décision sous incertitudes et ses conséquences sur la conception de systèmes performants. Nous proposons également une caractérisation du processus de décision à partir du modèle GRAI. Cette étude bibliographique est le fruit d'un travail collaboratif inter-laboratoires avec G. Marques et B. Valet. Les laboratoires impliqués

étaient le CGI¹ de l'EMAC, le LIMOS² et le LISMMA³. Ce travail a donné lieu à une publication à la conférence CIGI09 (Marquès, Lelièvre, & Valet, 2009). Nous concluons ce chapitre en justifiant notre objet d'étude, la conception d'un système à flexibilité souhaitée à travers l'intégration de cette dimension en amont du processus de décision.

Le chapitre II s'intéresse au concept de flexibilité en retenant trois axes principaux. Ceux-ci permettent de souligner la performance économique d'une mise en œuvre industrielle. Ainsi, nous articulons cet état de l'art en trois étapes depuis la mesure de la flexibilité d'un système, puis à travers sa relation avec la notion d'efficacité et enfin nous terminons par des travaux portant sur la conception de systèmes flexibles. La diversité des approches rend complexe voire utopique une approche commune pour ce concept si largement étudié.

Le troisième chapitre est consacré à notre proposition de cadre conceptuel et méthodologique qui introduit le concept de « potentialité » comme dénominateur commun à la variété des flexibilités. Ce concept permet en outre d'articuler flexibilité et prise de décision dans le but d'homogénéiser les approches. Nous contribuons à distinguer le fait de disposer de flexibilité de sa mise en œuvre réelle. La terminologie actuelle favorise les confusions à ce propos puisqu'un système peut être considéré flexible en offrant de nombreuses possibilités ou encore en ayant fait face à des perturbations dans le passé.

Les chapitres IV et V sont dédiés à la validation empirique des propositions formulées dans le chapitre III. Pour cela, nous nous appuyons sur deux applications industrielles issues des projets menés au sein de l'entreprise EUROFARAD.

Enfin, nous concluons nos travaux par quelques commentaires sur la place jouée par la flexibilité dans les organisations ainsi que des perspectives de recherche.

¹ Centre Génie Industriel, Université Toulouse, Mines Albi, Campus Jarlard, route de Teillet, F-81013 Albi CT Cedex 09

² Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes, IFMA, UMR CNRS 6158, Campus de Clermont-Ferrand les Cézeaux, BP 265, F-63175 Aubière Cedex

³ Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des MATériaux, SUPMECA, 3 rue Fernand Hainaut, F-93407 Saint-Ouen Cedex

Notre contribution se situe dans :

- **un cadre conceptuel éclairé par l'introduction du concept de potentialité** qui sert de dénominateur commun à la flexibilité et permet de distinguer le système de son utilisation,
- **une méthodologie pour concevoir un système à flexibilité souhaitée** dans un contexte où peu de recherches sur la flexibilité proposent des approches globales en privilégiant la résolution de problèmes industriels particuliers,
- **une proposition d'articulation entre conception et mise en œuvre de la flexibilité d'un système par l'intégration du flux d'information au processus.**

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
SOMMAIRE.....	7
CHAPITRE I. LES CRITERES D’EVALUATION D’UNE DECISION SOUS	
INCERTITUDES	9
1. CADRE DE CARACTERISATION DE LA DECISION SOUS INCERTITUDES.....	11
2. ANALYSE DES TERMES DANS LE CADRE DE DECISION.....	22
3. SYNTHESE.....	34
CHAPITRE II. LA FLEXIBILITE, OUTIL D’ANALYSE DANS LA LITTERATURE	
ET LIMITES DANS L’APPLICATION INDUSTRIELLE	39
1. CONTEXTE	41
2. MESURE DE LA FLEXIBILITE	43
3. FLEXIBILITÉ VERSUS EFFICIENCE.....	57
4. CONCEVOIR LA FLEXIBILITE	64
5. LES LIMITES DANS L’APPLICATION INDUSTRIELLE	73
CHAPITRE III. CADRE CONCEPTUEL ET METHODOLOGIQUE POUR	
CONCEVOIR UN SYSTEME A FLEXIBILITE SOUHAITEE.....	75
1. DE LA NON-FLEXIBILITE A LA FLEXIBILITE	77
2. MODELISATION DU SYSTEME	80
3. LA PARTIE OPERANTE : L’ESPACE DES POTENTIALITES	84
4. LA PARTIE DECISIONNELLE : LES VARIABLES DE DECISION	86
5. SYNCHRONISATION DU PROCESSUS DE DECISION AVEC LE FLUX	
D’INFORMATION	88
6. METHODOLOGIE PROPOSEE POUR CONCEVOIR UN SYSTEME A FLEXIBILITE	
SOUHAITEE	90
CHAPITRE IV. DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE OPERANTE,	
APPLICATION A LA CONCEPTION DU SYSTEME D’EVACUATION DES	
EAUX DU NOUVEAU SITE INDUSTRIEL EUROFARAD DE	
CHANTELOUP-EN-BRIE.....	95

1.	PROBLEMATIQUES INHERENTES AUX SYSTEMES OUVERTS	97
2.	LA FLEXIBILITE, UNE APTITUDE NECESSAIRE EN UNIVERS INCERTAIN	98
3.	OPTIMISATION DE LA FLEXIBILITE DES INFRASTRUCTURES DU NOUVEAU SITE INDUSTRIEL EUROFARAD	103
4.	APPROCHE CLASSIQUE : LA FLEXIBILITE COMME CRITERE DE SELECTION	106
5.	APPROCHE PAR LE DIMENSIONNEMENT DE L'ESPACE DES POTENTIALITES	118
 CHAPITRE V. DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE DECISIONNELLE, APPLICATION A LA CONCEPTION DU DEPARTEMENT LOGISTIQUE DE L'USINE EUROFARAD DE CHATELOUP-EN-BRIE		125
1.	APPLICATION INDUSTRIELLE : LA CONSTITUTION D'UN DEPARTEMENT LOGISTIQUE	127
2.	DIMENSIONNEMENT DU MAGASIN CENTRAL	131
3.	DESCRIPTION DES ACTIVITES OPERATIONNELLES DU DEPARTEMENT LOGISTIQUE	137
4.	DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE OPERANTE	141
5.	VALIDATION EMPIRIQUE	150
 CONCLUSION.....		155
 BIBLIOGRAPHIE.....		161
 TABLES DES ILLUSTRATIONS		179
	FIGURES	179
	TABLEAUX	182
 TABLE GENERALE.....		185

CHAPITRE I. Les critères d'évaluation d'une décision sous incertitudes

Ce premier chapitre présente les problématiques majeures issues de la littérature liée aux incertitudes lors du processus de décision à travers un cadre de caractérisation basé sur le modèle GRAI. Les concepts liés à la prise en compte des incertitudes dans les processus de décision sont nombreux, notamment ceux mis en œuvre pour la planification. Or, aucun consensus sur leur définition et leur utilisation n'a pu être développé jusqu'à présent.

Au-delà d'une définition, ce cadre permet d'évaluer la comparabilité et/ou la complémentarité de ces concepts. Bien que les frontières entre les définitions respectives de ceux-ci présentent une géométrie variable suivant les personnes ou les domaines d'application. L'analyse qui en découle montre que tous ces termes tels que la flexibilité, l'agilité ou la robustesse peuvent être segmentés en 2 familles principales. Ainsi, pour un centre de décision donné qui doit intégrer différents degrés d'incertitude sur les informations disponibles et/ou sur le cadre de décision lui-même, certains de ces concepts caractérisent des propriétés structurelles alors que la seconde famille s'attache à caractériser des propriétés d'adaptation.

Ce chapitre s'articule autour de trois parties :

La première partie permet de définir les notions de décision, d'incertitudes et d'intégrer la dimension temporelle au processus de décision. L'objectif principal de cette partie est de poser les bases d'un cadre d'analyse qui permettra de définir les différents termes et d'en expliciter les liens à partir du modèle GRAI.

L'objet de la seconde partie sera donc de définir les différents termes en s'appuyant sur la bibliographie.

La troisième partie consiste en un travail de synthèse de ces définitions afin d'introduire la discussion sur la comparabilité et/ou la complémentarité de ces termes.

Enfin, nous terminerons ce chapitre en soulignant le rôle central de la flexibilité dans l'articulation de ces différents critères d'évaluation et la dualité de ce concept par rapport au processus de décision à travers son rôle de critère certes, mais surtout comme prérequis à l'existence de toute décision.

1.	CADRE DE CARACTERISATION DE LA DECISION SOUS INCERTITUDES	11
1.1.	MODELISATION DE LA DECISION	12
1.2.	LA METHODE GRAI.....	15
1.2.1.	<i>La Grille GRAI</i>	16
1.2.2.	<i>Les Réseaux GRAI</i>	17
1.2.3.	<i>Le modèle conceptuel du centre de décision</i>	17
1.3.	L'INCERTITUDE.....	20
1.4.	PRISE EN COMPTE DE LA TEMPORALITE DANS LA MODELISATION.....	20
2.	ANALYSE DES TERMES DANS LE CADRE DE DECISION	22
2.1.	FLEXIBILITE	22
2.2.	FIABILITE	24
2.3.	ROBUSTESSE	25
2.4.	ADAPTABILITE	27
2.5.	REACTIVITE	29
2.6.	STABILITE	30
2.7.	AGILITE	31
2.8.	RESILIENCE.....	32
3.	SYNTHESE.....	34

1. Cadre de caractérisation de la décision sous incertitudes

Décider sous incertitude... L'abondance des travaux scientifiques montre la diversité des moyens et des approches développés pour répondre à ce problème. Prenons l'exemple de l'organisation d'une réunion à n participants plusieurs mois à l'avance. La décision porte sur une date et un lieu. Les informations sur les disponibilités des participants sont imparfaites et cette imperfection peut évoluer dans le temps. Cet exemple fait donc apparaître la double dimension de la problématique liée à la prise en compte de la temporalité dans le processus de décision :

- à t donné, chaque participant a une incertitude sur la disponibilité des dates futures du calendrier ainsi que sur sa capacité à se rendre sur un lieu donné. Ces incertitudes peuvent s'exprimer avec des probabilités ou avec des critères plus qualitatifs. Le processus de décision doit donc avoir certaines propriétés structurelles pour prendre en compte les incertitudes sur ses données d'entrée.

- à $t+\Delta t$, l'évaluation des incertitudes a pu évoluer et induire un changement de décision afin de s'adapter à cette évolution. Le processus de décision doit donc avoir certaines propriétés d'adaptation pour prendre en compte cette évolution.

Dans ce cadre, comment définir les éléments qui conduiront à la prise de décision ? Il existe de très nombreuses façons de répondre à cette question. Bloquer une date dans 6 mois et advenir que pourra ? Consulter tous les acteurs sur leurs disponibilités et appliquer un critère de maximisation ? Consulter tous les acteurs sur un ensemble de dates et de lieux choisis ? Prendre une décision progressive avec une décision de plus en plus précise au fur et à mesure que le temps avance ? Choisir une date et à chaque changement sur la disponibilité d'un participant changer de date et/ou de lieu ?

D'autre part, a-t-on beaucoup de dates et de lieux possibles ? Est-il facile de changer une date ou de réserver un autre lieu ? Un grand nombre de questions et un nombre encore plus grand de façons d'y répondre existent.

Dans le domaine de la planification ou de l'ordonnement les décisions concernent l'investissement, l'embauche, les quantités à produire, le choix de tournées,... avec des

inconnues sur la demande, les pannes, les livraisons, les comportements de ses partenaires... Ces inconnues peuvent également évoluer dans le temps. Les travaux de recherche sur le sujet sont nombreux et un grand nombre de méthodes, techniques et autres notions ont été proposées pour aborder ce type de problème. De nombreux termes ont été définis pour caractériser la prise en compte de l'incertitude et plus généralement sa gestion dans les systèmes de pilotage de la production.

Sur certaines notions il y a même abondance de définitions et de points de vues : fiabilité, flexibilité, robustesse, agilité, stabilité, résilience, adaptabilité, réactivité,... beaucoup de termes mais beaucoup de définitions plus ou moins proches suivant les personnes, les contextes ou encore les domaines. Cette abondance traduit une grande diversité dans les interprétations de chacun de ces mots tout comme dans leurs domaines d'application. L'étude de la littérature dédiée à ce domaine montre des évolutions sémantiques fortes avec l'introduction successive des différents termes. La notion de flexibilité est présente dès le début des années 80 (Webster & Tyberghein, 1980; Buzacott & Shantikumar, 1990), les notions de réactivité ou d'adaptabilité, vers la fin des années 80. Le concept d'agilité n'est apparu dans le domaine qu'au début des années 90 (Nagel, Dove, Goldman, & Preiss, 1991; Goldman, 1994), celui de résilience plutôt vers les années 2000 (Tang, 2006). Le but de cette remarque n'est pas de retracer l'historique détaillé de la naissance de chacun de ces termes mais plutôt de souligner leur répartition dans le temps. Il semble que les plus récents aient été proposés systématiquement en référence aux termes anciens pour en distinguer et préciser certains aspects. Cela explique pourquoi on retrouve de nombreux points communs entre chacune des définitions.

1.1. Modélisation de la décision

Parmi les méthodes de modélisation d'entreprise nous nous sommes appuyés sur la méthode GRAI (Roboam, 1993) et le réseau GRAI pour caractériser une décision. En effet, la méthode GRAI est une méthode basée sur la modélisation d'entreprise avec pour but la conception ou la re-conception des systèmes de production en se focalisant sur la partie décisionnelle d'un système. Cette méthode est notamment adaptée pour modéliser les décisions de planification au niveau des processus de pilotage de la production. Elle repose sur une double décomposition du système étudié :

- Hiérarchique (décomposition temporelle) : un centre de décision est alors défini comme l'ensemble des décisions prises par une fonction et à un niveau hiérarchique donné (grille GRAI).

- Fonctionnelle : le fonctionnement de chaque centre de décision peut être décrit au travers de réseaux GRAI qui constituent le modèle des activités d'un centre de décision.

Une activité est définie comme une partie du comportement d'un centre de décision. A ce niveau, on différencie les activités d'exécution (activité déterministe donnant la même valeur au résultat pour les mêmes valeurs de données d'entrée ; ex : procédure de calcul, programme,...) et les activités de décision (activité qui permet de choisir entre plusieurs alternatives pour des données d'entrées identiques). Pour pouvoir décider, il faut alors connaître :

- la ou les informations d'entrée, c'est-à-dire les informations sur l'environnement de la décision (notées I_E dans la suite),
- le ou les objectifs, c'est-à-dire la performance à attendre par le système piloté (O),
- la ou les variables de décision (ou variables d'action), c'est-à-dire les éléments sur lesquels le ou les décideurs peuvent jouer pour atteindre l'objectif (VD),
- la ou les contraintes, c'est-à-dire les limites du potentiel des variables de décision (C_O),
- un ou des critères, c'est-à-dire la fonction à optimiser dans le choix de la solution (C_r).

Cet ensemble (I_E, O, VD, C_O, C_r) constitue un cadre de décision. La modélisation peut être complétée par des informations extérieures (I_{Ext}) quelconques, des règles de comportement des activités, des informations sur l'état du monde extérieur (possibilité de grèves de transport),... La décision fournit des informations de sortie (I_S) ainsi que des variables de décision instanciées (VD_{inst}).

Parmi les nombreux outils et méthodes utilisables en modélisation d'entreprise, comme IDEF (IDEF0, 1993), CIMOSA (Consortium AMICE, 1993; Vernadat, 1996), PERA (Williams, 1992), Merise (Tardieu, Rochfeld, & Colletti, 1983), nous avons choisi le modèle GRAI (Doumeingts, 1984; Marcotte, 1995) qui nous semble le mieux adapté à la modélisation du système décisionnel. Nous utilisons donc le réseau GRAI pour modéliser le problème de

décision de la date et du lieu et des convocations des personnes et des réservations de lieux que cela induit. La prise de décision sera conduite par les éléments suivants :

- des informations sur la disponibilité date×lieu d'un ou plusieurs participants potentiels,
- des objectifs en termes de dates ou de nombre de participants,
- des contraintes (notamment temporelles) sur les procédures de convocation ou de réservation,
- le nombre de participants et de lieux potentiels.

Pour chacune des notions nous proposerons une représentation d'une partie du problème d'organisation d'une réunion sous la forme du réseau GRAI sur lequel seront mis en évidence, les incertitudes, les leviers et les mesures (Figure 2) ainsi qu'un tableau récapitulatif basé sur le Tableau 1.

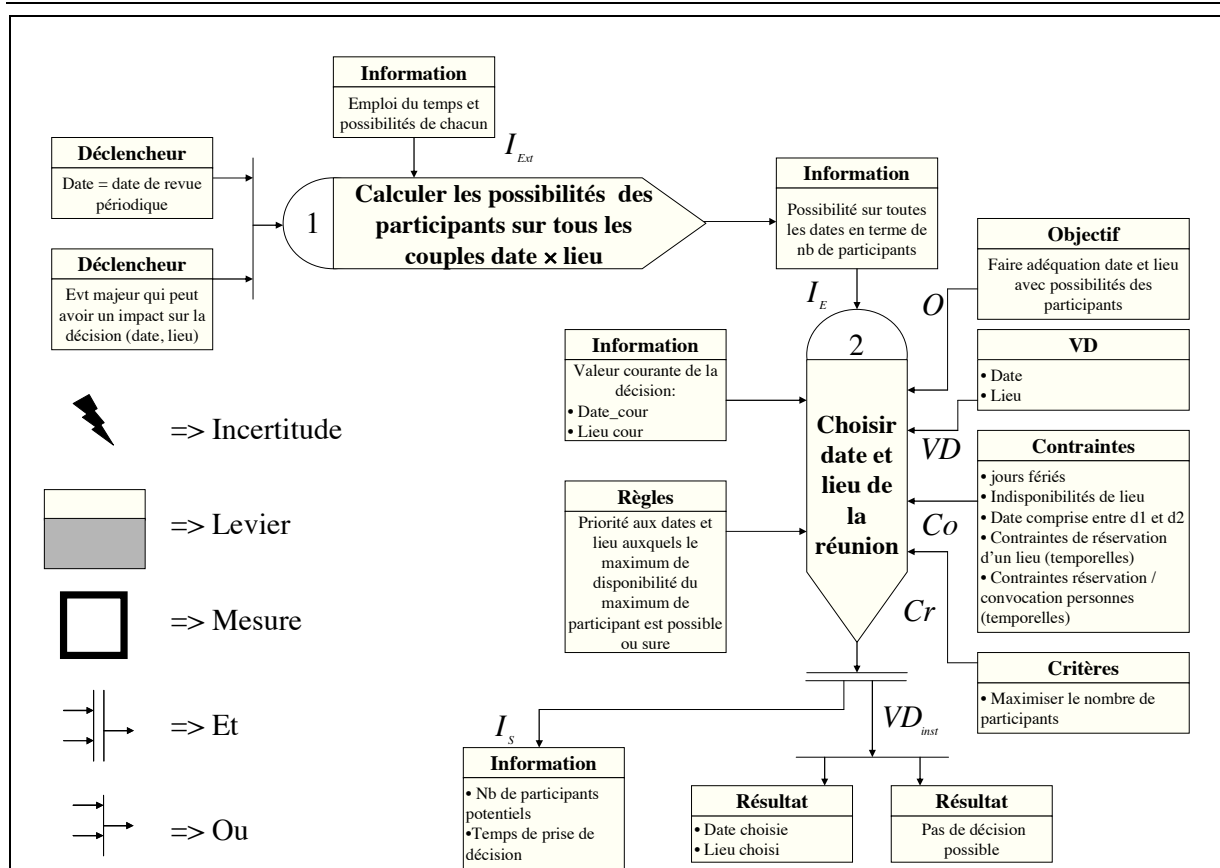


Figure 2 : Réseau GRAI de la décision sur la date et le lieu de la réunion

Notion		
Incertitudes	Leviers	Mesure

Tableau 1 : Modèle de tableau descriptif

1.2. La méthode GRAI

Dans la perspective de subir les incertitudes pour un système, la flexibilité permet de réduire le coût d'un événement perturbateur. Pour expliciter le rôle du processus de décision le fonctionnement d'un système évolutif, nous utiliserons le modèle GRAI.

En effet, nous nous apercevons à travers l'introduction de ce chapitre que la position par rapport à l'incertain se résume souvent à comment prendre une décision optimale grâce à une analyse des données incertaines ? Or le champ propre à la flexibilité peut poser le problème différemment en se demandant comment retarder tout ou partie de la décision lorsque l'incertitude est jugée trop élevée afin de ne prendre la décision qu'au moment où les

événements seront réalisés et transformant ainsi la nature de l'information. Pour cela il est indispensable de se laisser des degrés de liberté pour réagir aux évolutions du système ou de son environnement. C'est la raison pour laquelle nous nous intéresserons maintenant à la modélisation du processus de décision à travers le modèle GRAI.

La méthode GRAI (Doumeingts, 1984; Marcotte, 1995) permet l'étude des systèmes de gestion de production par une approche décisionnelle. Elle propose deux outils principaux : la Grille GRAI et les Réseaux GRAI, basés sur un modèle conceptuel du centre de décision. Dans cette partie nous allons décrire brièvement ces deux outils, de façon à pouvoir analyser par la suite les avantages et limites de cette méthode par rapport aux objectifs de notre étude.

1.2.1. La Grille GRAI

La Grille GRAI donne une vision globale et macroscopique de la structure de décision du système de production étudié. Elle met en évidence les principaux centres de décision, correspondant à l'intersection d'une des fonctions du système de gestion de production et d'un niveau décisionnel caractérisé par un couple horizon/période. Elle identifie aussi les liens décisionnels et informationnels entre ces centres de décision.

Le centre de décision se définit conceptuellement comme un ensemble d'activités appartenant à une même fonction et à un même niveau décisionnel (Marcotte, 1995). Les fonctions de base de la grille sont définies par rapport à la synchronisation dans le temps de la disponibilité des produits et des ressources nécessaires à la réalisation de l'activité pilotée. La Figure 3 illustre une grille de base du modèle GRAI.

Fcts H/P	Informations Externes	Gérer les Produits	Planifier la Production	Gérer les Ressources	Informations Internes
	H = P =				
H = P =			Centre de décision		
H = P =					

Figure 3 : La Grille GRAI et le centre de décision

1.2.2. Les Réseaux GRAI

Les réseaux GRAI permettent de décrire de manière précise les activités qui composent les centres de décision. Celles-ci peuvent être de deux natures : activités d'exécution ou de décision.

Dans le modèle conceptuel GRAI d'un centre de décision, l'activité de décision reçoit un cadre de décision. Ce dernier détermine et décrit les éléments supports du processus d'élaboration d'une décision de pilotage : objectifs, variables de décision et contraintes en particulier. Il définit donc les conditions de mise en œuvre d'une activité de décision (Doumeingts, 1984). Toutes les activités d'un centre de décision sont coordonnées par le cadre de décision.

1.2.3. Le modèle conceptuel du centre de décision

La Figure 4 propose le modèle conceptuel d'un centre de décision, qui détaille les supports d'un centre de décision de la Grille GRAI et associe ce réseau au système d'information nécessaire à la prise de décision et au système physique piloté par ce centre de décision.

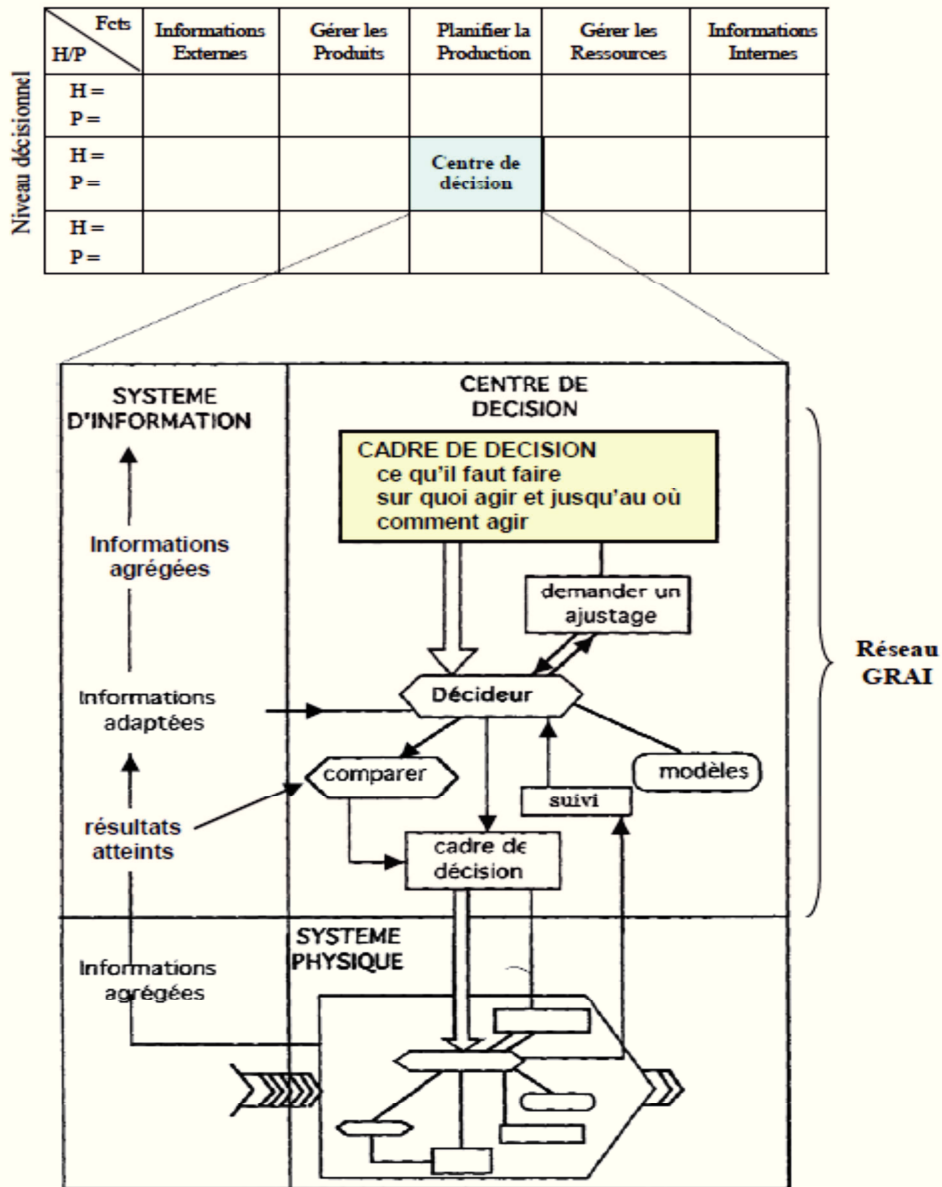


Figure 4 : Modèle conceptuel d'un centre de décision

A partir des éléments du cadre de décision, tels que décrits dans (Marcotte, 1995; Affonso R. , 2008), nous précisons ici les définitions de chacun de ces éléments :

- **Objectifs** : ce sont les résultats ou la performance à atteindre par le système piloté. S'il y a plusieurs objectifs, ils doivent être hiérarchisés. L'objectif principal sera la priorité (la performance cible à atteindre), les autres devenant des critères dont l'optimisation permettra de choisir entre les différentes solutions qui respectent l'objectif principal. Par exemple, si le premier objectif est le "service client" et le deuxième la "minimisation des coûts", le décideur cherchera les solutions qui

permettent au processus de respecter les exigences client, puis choisira la solution la moins coûteuse.

- **Variables de décision :** ce sont les degrés de liberté mis en œuvre pour construire les solutions qui permettent d'atteindre les objectifs (performance souhaitée). Les variables de décision modifient les états du système piloté. Elles peuvent faire appel à des ressources locales ou extérieures au système piloté. Par exemple, pour réaliser les produits en respectant un taux de service donné, l'entreprise peut faire appel à des heures supplémentaires (variable de décision locale) ou à la sous-traitance (variable de décision externe).
- **Contraintes :** ce sont les limites d'utilisation d'une variable de décision. Ces contraintes peuvent exprimer des limites technologiques, contractuelles ou légales, dans l'utilisation des variables de décision. Comme les variables de décision, les contraintes peuvent avoir une origine locale ou provenir de l'extérieur de l'entreprise. Par exemple, « les heures supplémentaires sont limitées à 120h/mois » (contrainte externe - réglementaire), « le stock de composants doit couvrir 5 jours de fabrication maximum » (contrainte locale), « l'approvisionnement de composants est limité à 150 pièces/mois » (contrainte externe), etc.

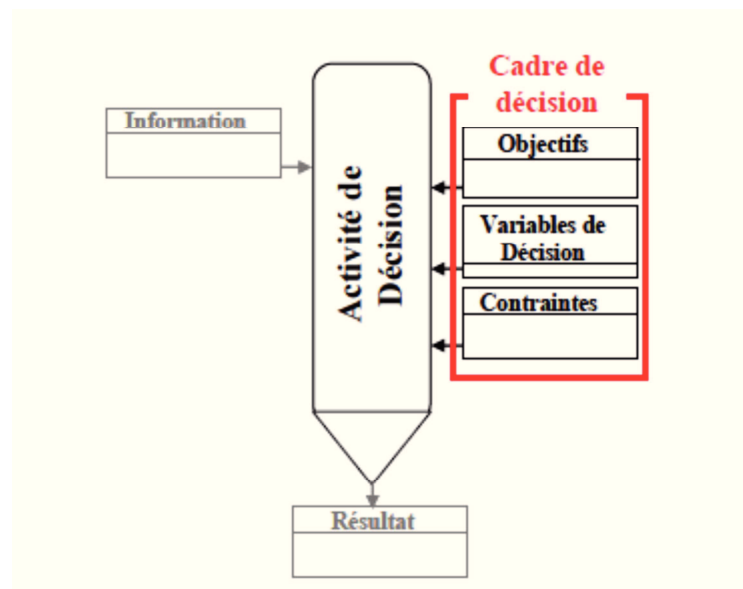


Figure 5 : Une activité de décision selon le modèle GRAI (Doumeingts, 1984)

Toute l'information additionnelle nécessaire au processus de décision ne faisant pas partie du cadre de décision, comme le suivi de production ou les différents éléments d'information sur l'état du système, est incluse dans la boîte "information" de la Figure 5.

1.3. L'incertitude

Le mot « incertitude » est aujourd'hui couramment utilisé au sens large pour traiter les problèmes qui mettent en œuvre des informations imparfaites au sens de Dubois et al. (Dubois, Prade, Farreny, Martin-Clouaire, & Testemale, 1988) qui distinguent trois types d'informations imparfaites :

- *Les incertitudes* concernant un doute sur la validité d'une information,
- *Les imprécisions* concernant une difficulté dans l'énoncé de l'information,
- *Les incomplétudes* concernant une absence totale ou partielle de l'information.

Cette étude ne porte pas sur les détails de la prise en compte de ces différents niveaux à l'intérieur du processus de décision. C'est la raison pour laquelle nous parlerons dans la suite généralement d'« incertitude » sans distinguer les trois types d'imperfections.

1.4. Prise en compte de la temporalité dans la modélisation

Dans la modélisation GRAI, le déroulement des processus décisionnels fait appel à un certain nombre de données nécessaires pour établir le choix comme les informations ou encore le cadre de décision. Parmi les données extérieures, certaines jouent le rôle de déclencheurs du processus de décision. Dans notre exemple, il est possible de retenir 2 événements déclencheurs différents :

- Soit on arrive à une date de revue périodique de la décision. Par exemple, une réunion mensuelle est planifiée pour mettre à jour, faire le suivi et vérifier la validité de la décision courante compte tenu de l'état des informations à la date considérée (disponibilité datexlieu), des objectifs et des contraintes,
- Soit un événement majeur s'est produit. Par événement majeur nous entendons, une perturbation externe susceptible de modifier la décision. Ici, par exemple : une grève des transports, l'endommagement d'un lieu, l'augmentation ou la diminution de la liste des participants...

L'événement peut être défini comme une apparition d'un état significatif ou un changement d'état qui influence le cours d'un processus. Il déclenche l'activité (Thiault, 2007).

Les changements d'états des données externes, déclencheurs des actions au sein des activités, vont apparaître au cours du temps. Un changement d'état peut être un changement de valeur d'une donnée mais aussi un changement dans la perception de l'incertitude que l'on a sur une donnée. L'avance du temps et donc les transitions entre états des données externes au système rendent le processus de décision dynamique. Ici, le qualificatif dynamique reflète le caractère évolutif et/ou réversible de la prise de décision qui peut traduire l'évolution de l'incertitude et de sa perception au cours du temps.

Meinadier (Meinadier, 1998) parle de transition entre états pour caractériser l'évolution des propriétés du système. Afin d'étudier le système il précise qu'il est alors possible d'adopter une des 3 approches suivantes :

- en temps continu,
- en temps discret avec un échantillonnage fixe,
- en temps logique discret où le système peut être regardé au moment des discontinuités.

Dans cette étude nous étudions les processus de décision. Nous considérons leurs temps de déroulements non négligeables et de ce fait, nous ne parlerons ici que de temps discret en se référant à une séquence indexée de moments. L'échantillonnage fixe ou logique correspond alors à nos 2 déclencheurs (à date ou sur événement).

La question suivante porte sur le choix de l'analyse que l'on veut faire du système. Selon Meinadier (Meinadier, 1998), l'ajout de la dimension temporelle complexifie la vision que l'on a du système. Pour cet auteur, il est alors possible de l'approcher :

- soit en analysant les propriétés internes au centre de décision qui peuvent être évaluées à tout instant, c'est l'approche synchronique
- soit en analysant l'évolution dans le temps des propriétés d'adaptation du système qui sont liées à l'occurrence d'un événement ou à l'avance du temps, c'est la vision diachronique. Cette vision fait donc appel à la sollicitation du centre de décision au travers d'un élément déclencheur. Elles ne sont mesurables qu'après occurrence d'un événement déclencheur.

2. Analyse des termes dans le cadre de décision

2.1. Flexibilité

Dans le domaine du génie industriel, De Toni et Tonchia (Toni & Tonchia, 1998) soulignent qu'en dépit de vastes travaux académiques et industriels, les définitions données sur le terme flexibilité restent peu claires et souvent ambiguës. Il semble difficile d'identifier un véritable consensus pour définir clairement ce terme. Les notions englobées par le terme flexibilité changent d'un auteur et/ou d'un domaine d'application à l'autre. Sethi et Sethi (Sethi & Sethi, 1990) ont quantifié cette diversité en relevant plus de 50 termes différents pour caractériser la flexibilité au début des années 90. Les différentes revues et travaux (Sethi & Sethi, 1990; Toni & Tonchia, 1998; Shewchuk & Moodie, 1998), expliquent cette diversité dans les termes et les définitions par la nature multidimensionnelle de la flexibilité et de la variété des points de vue.

Dans ces travaux, nous considérerons la flexibilité au sens absolue (Chryssolouris & Lee, 1992) qui est alors vue comme une caractéristique intrinsèque au système. Elle caractérisera donc l'espace de liberté défini par les variables de décision et leurs contraintes associées. Les variables de décision correspondent à des facteurs maîtrisables du système. L'ensemble des valeurs que peuvent prendre ces variables constituent un espace de degrés de liberté qui ont une influence sur le comportement du système. On retrouve sur la Figure 6 et dans le Tableau 2, l'absence de sollicitation des événements déclencheurs. La flexibilité est portée uniquement par les variables de décision auxquelles on applique certaines contraintes qui bornent leur domaine de réalisation.

Nous avons choisi de caractériser une variable de décision sous 2 dimensions :

- l'espace de variation, c'est à dire la largeur du domaine,
- le coût de mise en œuvre de la variation qui peut intégrer le délai de transition de l'état initial à l'état visé.

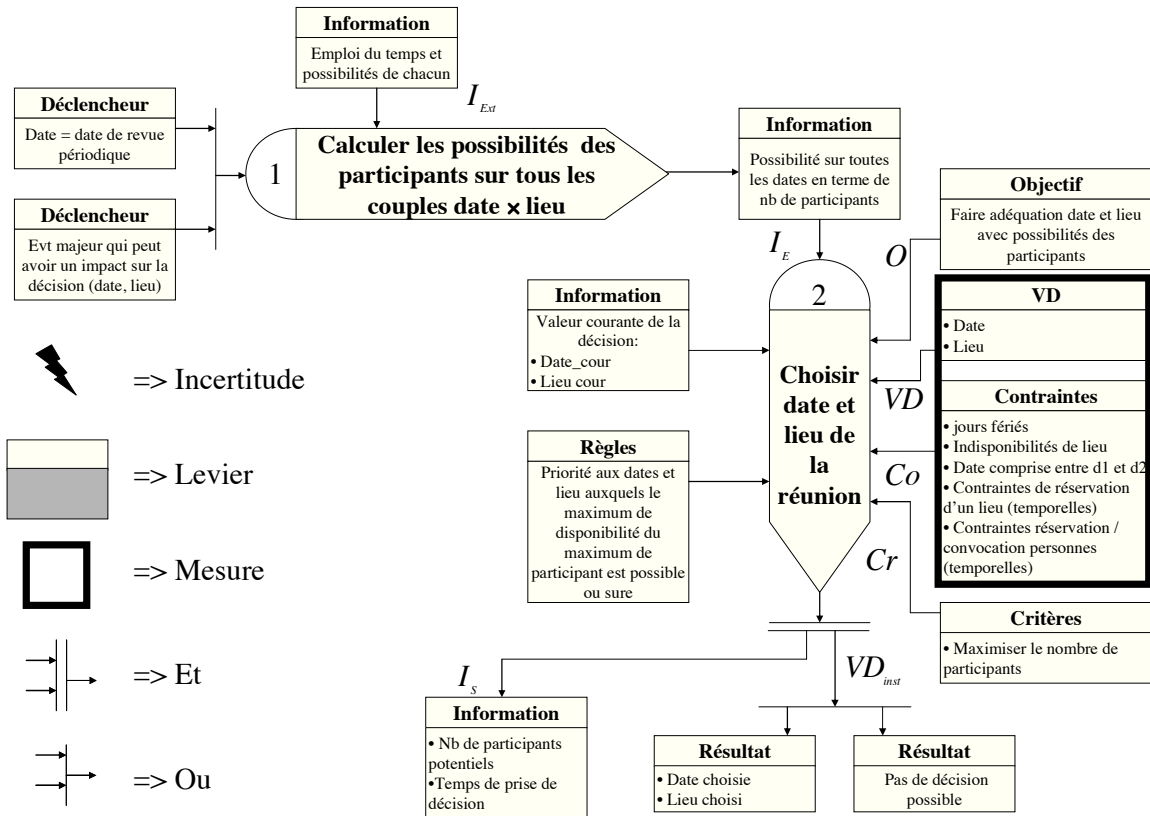


Figure 6 : La notion de flexibilité

Flexibilité		
Incertitudes	Leviers	Mesure
Néant	Néant	$VD \times Co$

Tableau 2 : Description de la flexibilité

Afin de distinguer clairement dans la modélisation GRAI les 2 dimensions de la flexibilité, nous séparons les contraintes en 2 catégories (Figure 7) :

- Co_{espace} , les contraintes liées à l'espace des variables de décision,
- Co_{temps} , les contraintes liées au temps.

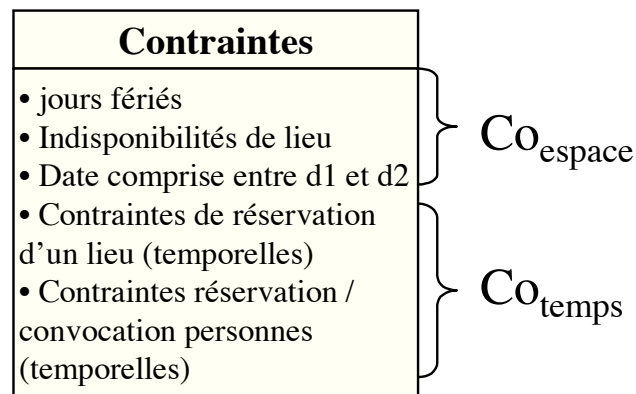


Figure 7 : Séparation des contraintes

2.2. Fiabilité

La notion de fiabilité peut être vue comme l'aptitude, souvent exprimée en probabilité, à répondre à un objectif (O) suivant un critère donné (Cr). L'objectif peut être défini sous la forme d'un besoin, d'un cahier des charges, d'un engagement contractualisé,... (Dupont, 1998; S.C. Council, 2008).

La dimension temporelle qui apparaît dans la plupart des définitions rencontrées, sera ici considérée comme une composante des objectifs donnés au système.

Comme le montrent la Figure 8 et le Tableau 3, la fiabilité se mesure sur la sortie de l'activité de décision. On mesure une performance de sortie influencée par des variations des variables de décisions disponibles vis à vis d'objectifs fixés.

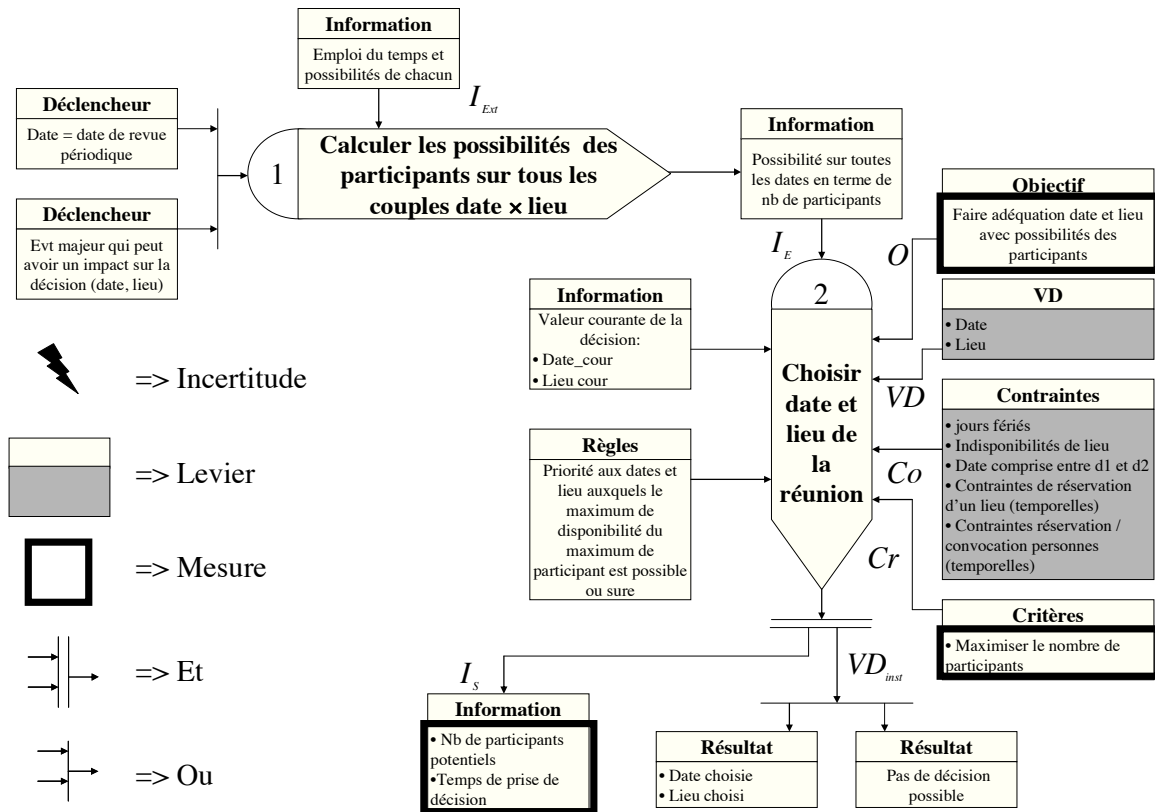


Figure 8 : La notion de fiabilité

Fiabilité		
Incertitudes	Leviers	Mesure
Néant	$VD \times Co$	O, Cr, I_S

Tableau 3 : Description de la fiabilité

2.3. Robustesse

La notion de robustesse illustre parfaitement la multiplicité des définitions utilisées pour les notions liées aux incertitudes (Durieux-Paris, Genin, & Thierry, 2007).

La plupart des définitions font référence à une limitation de la variation de la performance en sortie vis-à-vis de perturbations sur les entrées (objectifs, contrôles). En revanche, elles se différencient surtout par la manière de fixer la limite de cette variation. La limite de la variation de la performance en sortie peut être alors définie de différentes manières :

- au seuil
- au pire cas

- au ratio signal/bruit (sens de Taguchi) (Bendell & Disney, 1989; Génin, 2003)
- à la validité de la solution (au sens de l'optimisation robuste) (Kouvelis & Yu, 1996),...

Toutes les définitions s'accordent autour d'une chose : un système « est rendu » robuste avant occurrence d'un événement. Il s'agit donc bien d'un réglage des caractéristiques structurelles de l'activité de décision avant évolution de l'état des données externes au centre de décision.

Dans notre exemple illustré sur la Figure 9 et le Tableau 4, il est possible de simuler par exemple différents scénarii de possibilités (I_E) et analyser la performance de la sortie. Cette performance peut être vue comme le rapport entre l'information « nombre potentiel de participants » et l'objectif et le critère fixés dans le cadre de décision. Ceci est donc une analyse de l'impact des variations de I_E sur la fiabilité.

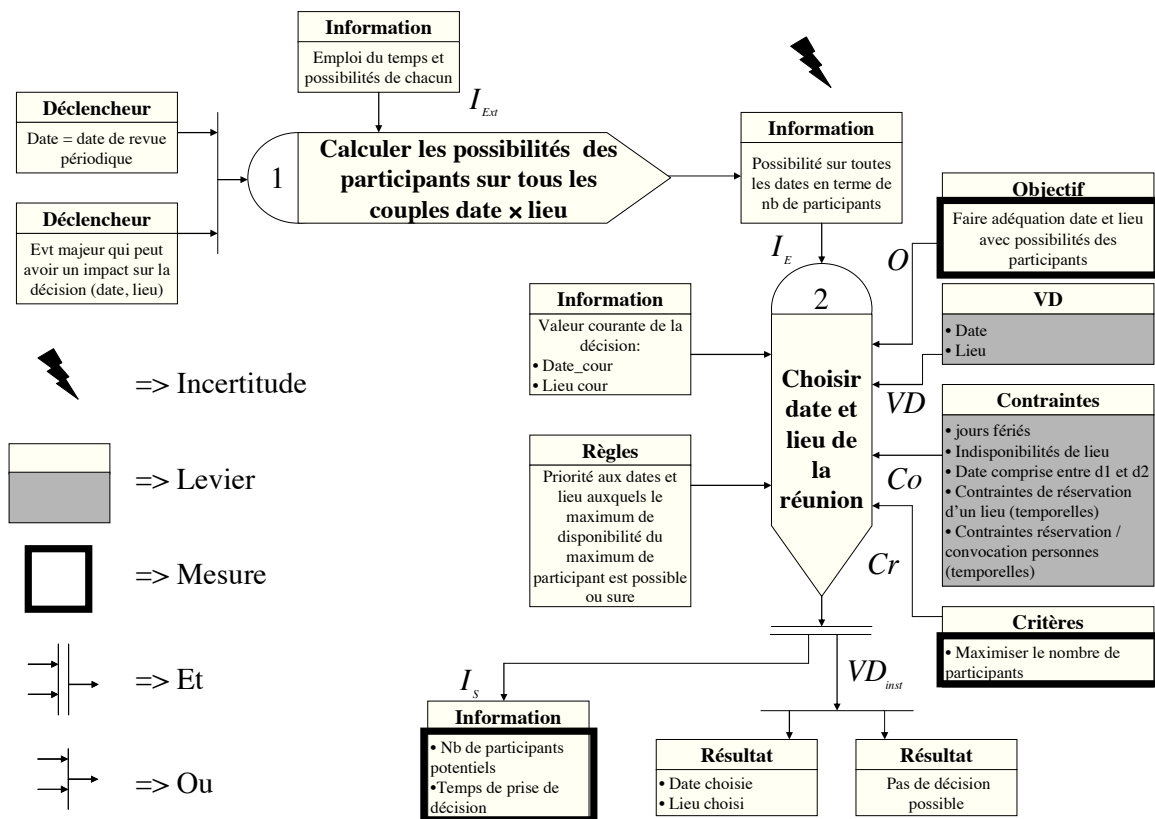


Figure 9 : La notion de robustesse

<i>Robustesse</i>		
Incertitudes	Leviers	Mesure
I_E	$VD \times Co$	O, Cr, I_S

Tableau 4 : Description de la robustesse

2.4. Adaptabilité

L'adaptabilité permet de mesurer le fait que les variables de décision du système piloté aient bien une action possible pour contrebalancer une variation sur les données extérieures. En d'autres termes, on se pose la question : mon centre de décision est-il capable de fournir une solution lorsque celui-ci est sollicité ? La mesure est faite sur l'existence d'une solution, non en délai de réponse, ce qui est lié à la réactivité comme nous le verrons par la suite. Rien ne préfigure non plus de la qualité, c'est à dire de la fiabilité, de la réponse. L'adaptabilité mesure donc la capacité à se déplacer dans l'espace des variables de décision ou à étendre cet espace lorsqu'il n'est plus suffisant. Nous distinguerons donc 2 types de déplacements :

- Déplacement interne au domaine, dans la dimension « largeur du domaine », il s'agit d'une adaptation en prenant une valeur dans le domaine existant
- Extension du domaine, il s'agit d'une évolution de l'espace des possibles, adaptation en agrandissant le domaine.

Dans notre exemple (Figure 10), il s'agit de savoir si au moment d'une revue de la décision (activation d'un événement déclencheur), le centre de décision va être capable de fournir une date et un lieu (Tableau 5). Si le résultat ne présente pas de solution possible, alors le système n'a pas su s'adapter à l'évolution des données extérieures (disponibilités dates×lieux des participants).

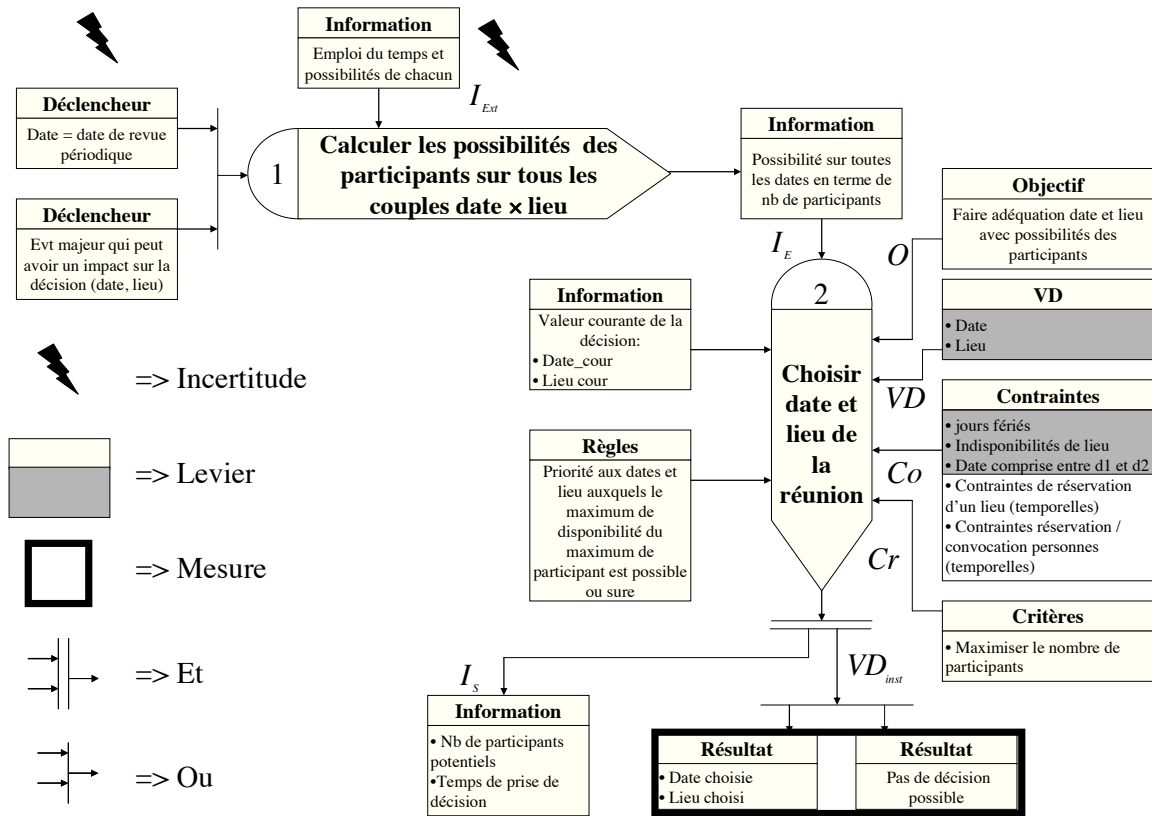


Figure 10 : La notion d'adaptabilité

Adaptabilité		
Incertitudes	Leviers	Mesure
I_{Ext}	$VD \times Co_{espace}$	VD_{inst}

Tableau 5 : Description de l'adaptabilité

2.5. Réactivité

A l'image de l'adaptabilité, la réactivité est la sollicitation d'une certaine dimension de flexibilité. En revanche, la réactivité porte sur la rapidité du mouvement à l'intérieur de l'espace de liberté (Randall, Morgan, & Morton, 2003; Zhang & Sharifi, 2007; S.C. Council, 2008; You & Grossmann, 2008). Là aussi, il existe 2 types de variations :

- déplacement interne au domaine : on sollicite une vitesse de variation des VD dans les vitesses existantes dans le domaine.

- extension du domaine : on se dote d'une nouvelle vitesse de variation. On augmente les capacités du système.

Notre vision est en revanche différente de celle de (Randall, Morgan, & Morton, 2003). Ces auteurs définissent une chaîne logistique réactive (responsive supply chain) comme un réseau ou une entreprise capable de créer de la richesse en accord avec les objectifs des dirigeants dans un environnement compétitif en réagissant rapidement et avec efficacité en matière de coût aux changements des besoins du marché. Ils positionnent clairement la réactivité vis à vis de l'agilité et du lean. Les objectifs d'une chaîne réactive (coûts réduits + vitesse et flexibilité augmentées) sont construits en additionnant les objectifs d'une chaîne agile à ceux d'une chaîne lean. Dès lors, on peut dire qu'ils ne parlent pas de réactivité mais plutôt de « leagility » concept récemment apparu et qui sort des limites de cette étude (Ben Naylor, Naim, & Berry, 1999). Toutefois cela illustre bien la grande diversité des définitions données aux termes.

La projection de cette notion sur notre exemple, illustrée dans la Figure 11, est similaire à celle réalisée pour l'adaptabilité. Suivant notre définition, la réactivité ne nécessite pas l'existence d'une solution, à l'opposé de l'adaptabilité. Nous nous intéressons seulement à la vitesse avec laquelle le signal résultat est apparu et ce, quel que soit le résultat obtenu (Tableau 6).

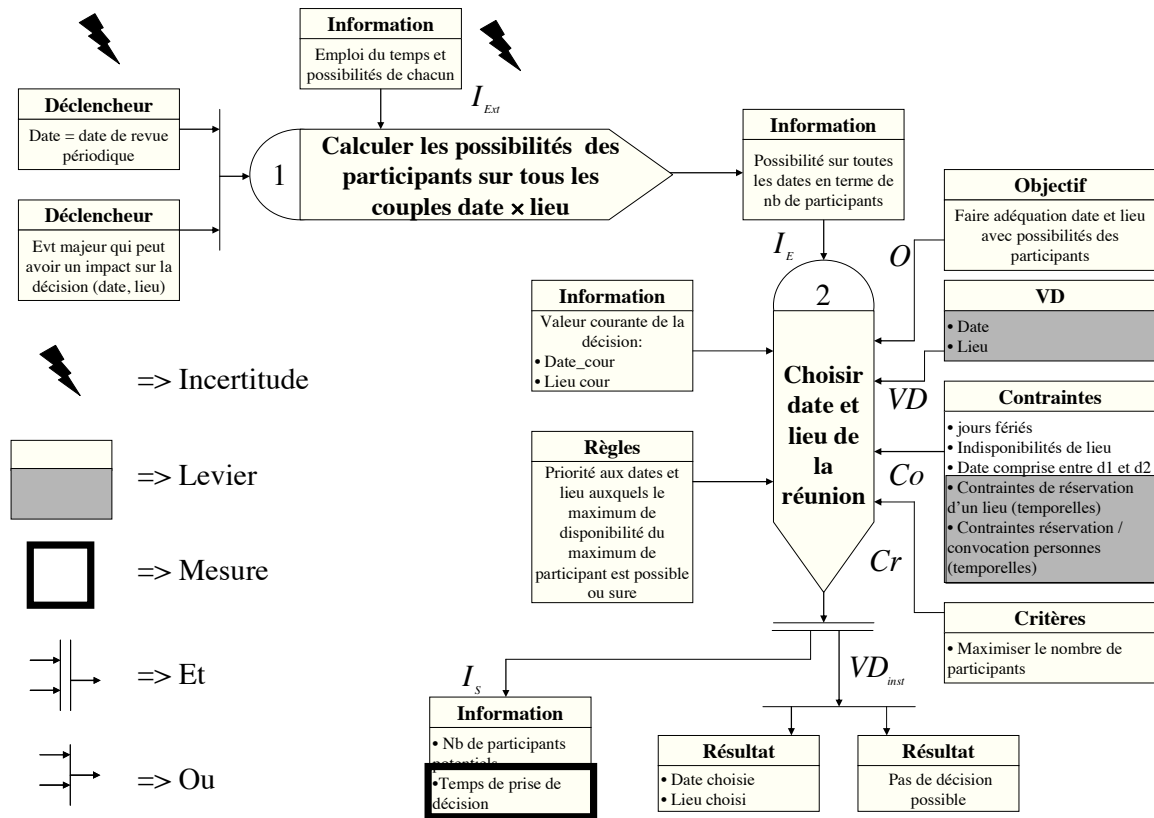


Figure 11 : La notion de réactivité

Réactivité		
Incertaines	Leviers	Mesure
I_{Ext}	$VD \times Co_{temps}$	I_S

Tableau 6 : Description de la réactivité

2.6. Stabilité

De multiples définitions sont disponibles pour la notion de stabilité et selon le domaine, la signification varie. Toutefois, il semble que la stabilité caractérise une propriété d'adaptation du système lors d'un changement d'état des données extérieures. La stabilité va caractériser le fait d'effectuer des variations bornées dans l'espace des variables de décision malgré des variations sur les entrées.

Dans notre exemple (Figure 12 et Tableau 7), la stabilité caractérise le fait de ne pas ou peu modifier l'instanciation des variables de décision lors d'une nouvelle sollicitation du

centre de décision (événement déclencheur). L'instanciation à t doit rester valide à $t+\Delta t$ à une grandeur près. Cette grandeur traduit le niveau de stabilité que l'on cherche à atteindre.

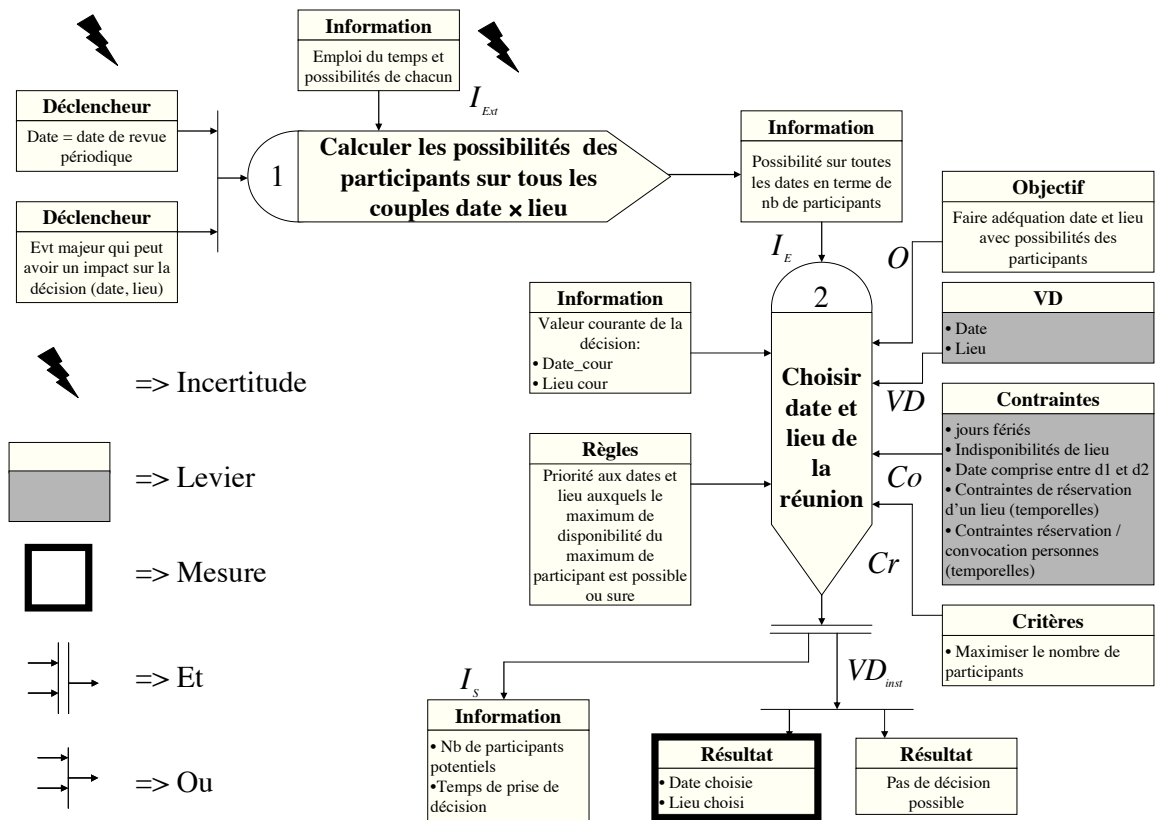


Figure 12 : La notion de stabilité

Stabilité		
Incertitudes	Leviers	Mesure
I_{Ext}	$VD \times Co$	VD_{inst}

Tableau 7 : Description de la stabilité

2.7. Agilité

L'agilité caractérise selon notre étude, une propriété d'adaptation du système après occurrence d'un événement. Celle-ci met en œuvre 2 autres propriétés d'adaptation que sont la réactivité et l'adaptabilité (Iskanius, 2006; Barzi, 2007). L'agilité inclut également la notion de performance que nous traduisons par la fiabilité de la décision prise (Nagel, Dove, Goldman, & Preiss, 1991; Goldman, 1994).

Dans notre exemple (Figure 13 et Tableau 8), on peut dire que le centre de décision réagit avec agilité si lors de sa sollicitation (activation d'un événement déclencheur), celui-ci est capable de fournir une solution (adaptable) rapidement (réactif) et bonne (fiable) au sens de l'objectif et du critère.

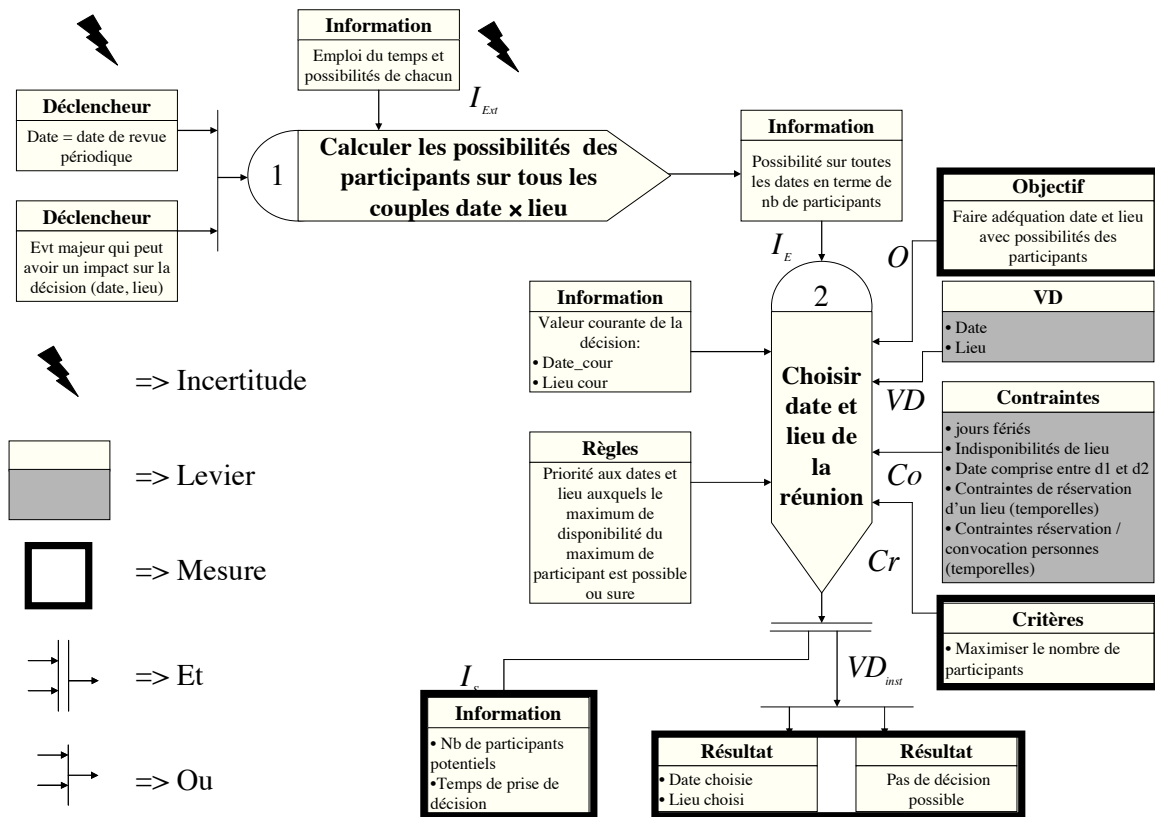


Figure 13 : La notion d'agilité

Agilité		
Incertitudes	Leviers	Mesure
I_{Ext}	$VD \times Co$	O, Cr, I_S, VD_{inst}

Tableau 8 : Description de l'agilité

2.8. Résilience

La résilience est une notion peu présente dans la littérature et son utilisation n'est que rarement expliquée (Al-Othman, Lababidi, Alatiqi, & Al-Shayji, 2008).

La résilience est une notion voisine de l'agilité. La principale différence se situe au niveau de l'origine de la variation des données externes (Figure 14 et Tableau 9). Pour l'agilité, la variation concerne les informations qui entrent dans le processus de pilotage. Pour la résilience, cela concerne un événement majeur qui touche au système piloté. Cela peut être une panne du système de production ou, dans notre exemple, la disparition d'un lieu ou d'une partie des participants potentiels.

La résilience apparaît donc comme l'aptitude en qualité à surmonter une perturbation majeure (Tang, 2006). Cette perturbation majeure est traduite par de nouvelles contraintes dans le cadre de décision notées Co^* .

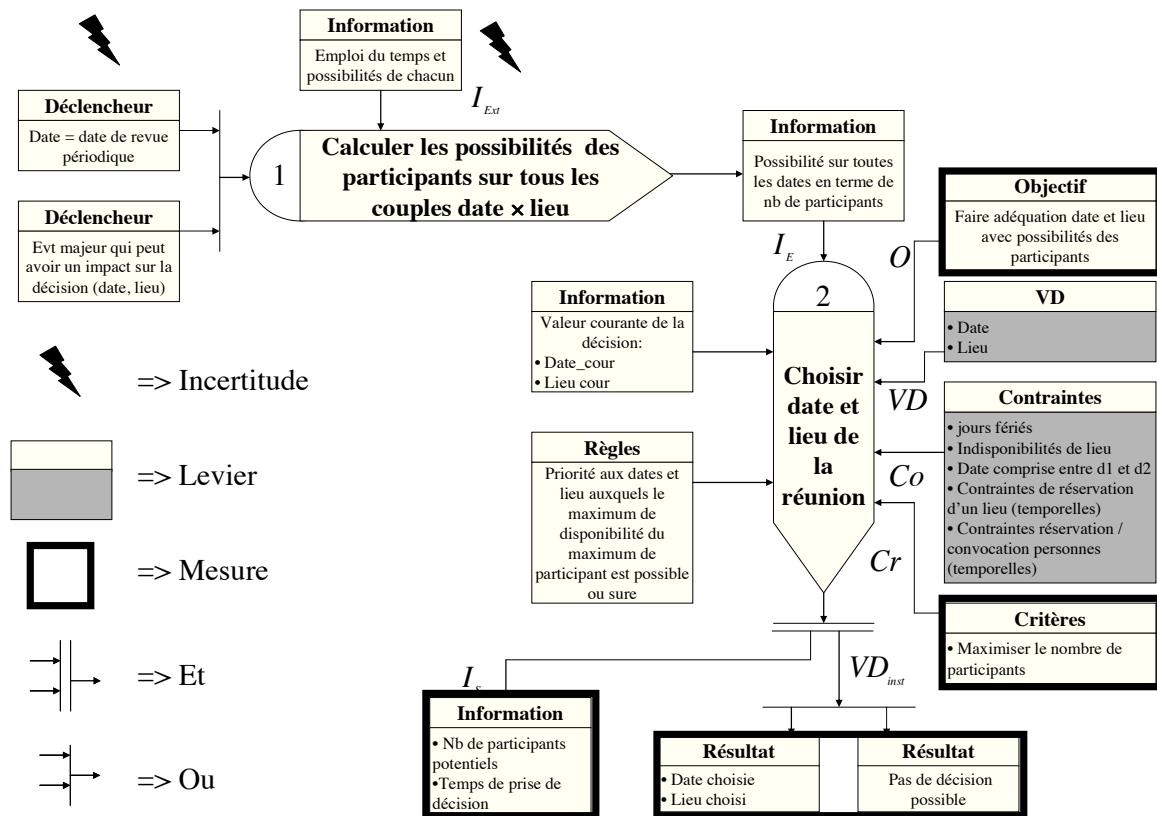


Figure 14 : La notion de résilience

Résilience		
Incertaines	Leviers	Mesure
I_{Ext}	$VD \times Co^*$	O, Cr, I_S, VD_{inst}

Tableau 9 : Description de la résilience

3. Synthèse

Les concepts présentés dans ce chapitre ont comme point commun leur objet d'étude, c'est-à-dire l'évolution d'un système en univers incertain. Cependant, la proximité apparente de ces termes ne doit pas en masquer leurs spécificités. Ainsi, le cadre utilisé pour approcher et mettre en relation ces notions s'appuie sur la méthode GRAI pour constituer une véritable topologie. En effet, les différents éléments du cadre proposé ($I_E, I_{Ext}, VD, Co, O, Cr, I_S, VD_{Inst}$) permettent de définir 3 plans d'analyse à partir desquels nous faisons apparaître l'articulation et la complémentarité de ces notions. Ces 3 plans correspondent aux 3 colonnes principales du tableau de synthèse (Tableau 10) à savoir : les incertitudes, les leviers et les mesures.

	Incertitudes		Leviers		Mesures					
	I_E	I_{Ext}	VD	Co	VD	Co	O	Cr	I_S	VD_{Inst}
Flexibilité					X	X				
Fiabilité			X	X			X	X	X	
Robustesse	X		X	X			X	X	X	
Adaptabilité		X	X	Espace						X
Réactivité		X	X	Temps					X	
Stabilité		X	X	X						X
Agilité		X	X	X			X	X	X	X
Résilience		X	X	Co*			X	X	X	X

Tableau 10 : Grille d'analyse des termes dans le cadre du réseau GRAI

Le premier plan d'analyse, celui des incertitudes, distingue les notions étudiées par rapport à l'intégration ou non par celles-ci de l'évolution des informations extérieures (I_{Ext}). En effet, nous avons d'une part les notions qui portent sur les caractéristiques intrinsèques du système c'est le cas pour la flexibilité, la fiabilité et la robustesse alors que les secondes portent sur la réponse de celui-ci. C'est seulement à la suite de l'occurrence d'un événement perturbateur qu'il est possible de caractériser le type de réponse obtenue à travers les notions d'adaptabilité, de réactivité, de stabilité, d'agilité ou encore de résilience. La segmentation générée est fondée sur la prise en compte de la composante temporelle dans l'évaluation du processus décisionnel par ces termes et selon la nature de l'objet qu'ils caractérisent : les propriétés structurelles du système d'une part, et leurs propriétés d'adaptation d'autre part (Tableau 11).

Propriétés Structurelles	Propriétés d'Adaptation
flexibilité	adaptabilité
fiabilité	réactivité
robustesse	stabilité
	agilité
	résilience

Tableau 11 : Segmentation des termes selon le premier plan d'analyse

Le second plan d'analyse, celui des leviers d'action, révèle qu'une différenciation de ces concepts s'opère sur la nature des contraintes (C_o) considérées. En effet, notre étude montre qu'il est nécessaire de distinguer les contraintes liées au temps, celles liées à l'espace et enfin celles liées à une perturbation exceptionnelle qualifiée de majeure pour décrire de façon fidèle l'objet d'étude de ces termes. D'autre part, ce plan met en évidence l'invariant essentiel, le trait d'union entre ces concepts. Il s'agit des variables de décisions qui sont la base même de tout processus de décision. Ceci illustre le rôle central de la notion de flexibilité qui caractérise l'espace de liberté résultant des variables de décision et des contraintes du système. Ainsi, chacun des autres concepts présentés repose sur cette propriété fondamentale du système considéré.

Contraintes Génériques	Contraintes Spécifiques
flexibilité	
fiabilité	adaptabilité
robustesse	réactivité
stabilité	résilience
agilité	

Tableau 12 : Segmentation des termes selon le deuxième plan d'analyse

Quant au troisième plan, il fait émerger un groupe de concepts dont la mesure est fondée sur les objectifs (O) et les informations de sortie (I_S). Plus précisément, c'est l'écart entre l'objectif et la sortie réelle du système qui est mesuré. Ainsi, les concepts de fiabilité, de robustesse, d'agilité et de résilience sont directement reliés à la notion de performance du système alors que ceux de flexibilité, d'adaptabilité, de réactivité et de stabilité sont évalués par rapport à un état ou un changement d'état du système.

Caractérisation du Système	Caractérisation de la Performance
flexibilité	fiabilité
adaptabilité	robustesse
réactivité	agilité
stabilité	résilience

Tableau 13 : Segmentation des termes selon le troisième plan d'analyse

Cette grille de lecture permet de souligner la spécificité du concept de flexibilité dont la mesure est décorréllée du processus de décision lorsque celui-ci ne remet pas en cause les caractéristiques intrinsèques du système lui-même. En effet, la prise de décision constitue un révélateur de tout ou partie de la flexibilité du système. Ce processus qui conduit à un choix présuppose l'existence d'alternatives. Or, l'ensemble des réponses ou évolutions possibles du système dans un contexte donné ne peut exister sans une certaine flexibilité du système.

Si cette notion est préexistante au processus de décision, elle est pourtant déterminante sur la performance de la réponse du système vis-à-vis des diverses sollicitations. La particularité du concept de flexibilité décrite ci-dessus rend difficile sa mise en œuvre opérationnelle en l'absence d'éclairage sur son articulation avec le processus de décision. Nous nous demanderons donc :

Comment faire de la flexibilité un véritable outil d'adaptation et d'efficience destiné aux managers et dirigeants d'entreprises en permettant de concevoir des systèmes à flexibilité souhaitée alors que les approches descriptives actuelles de ce concept développent essentiellement sa fonction d'analyse ?

Nous nous sommes attachés à définir dans ce chapitre un cadre de référence pour les critères d'évaluation d'une décision de planification sous incertitudes. Nous avons présenté et détaillé les différentes notions présentes dans la littérature puis nous avons montré leur intégration dans le cadre proposé.

D'autre part, nous avons mis en évidence le rôle central de la notion de flexibilité à partir de laquelle s'articulent les autres notions. En effet, l'évolution d'un système n'est seulement possible que si celui-ci possède des degrés de liberté encore non exploités à partir de son état initial. C'est cette aptitude que mesure la notion fondamentale de flexibilité. Les autres notions s'articulent autour de celle-ci selon deux axes : celles qui caractérisent l'adéquation du système considéré avec son environnement pour les notions qui caractérisent les propriétés structurelles et celles qui décrivent la façon dont la flexibilité est mise en œuvre à travers la réponse du système. Il s'agit dans ce cas, des termes qui décrivent les propriétés d'adaptation du système.

Ainsi, tout processus de décision peut être perçu comme la mise en œuvre de la flexibilité du système concerné. En effet, sans alternative, il n'y a pas de choix à établir. Cependant, nous avons montré que pour être performante, cette prise de décision requiert un certain nombre de conditions sur le cadre de décision qui traduisent l'adéquation du système avec son environnement. Nous allons donc nous intéresser au cours des chapitres suivants à la maîtrise de ces caractéristiques afin de proposer une méthodologie destinée aux managers et dirigeants d'entreprise pour concevoir un système à flexibilité souhaitée.

Malgré la diversité des approches existantes pour accompagner la prise de décision en univers incertain (Durieux-Paris, Genin, & Thierry, 2007), il existe un invariant implicite qui consiste à considérer la prise de décision comme unique et définitive du moins sur une période donnée (période de validité de la prise de décision selon le modèle GRAI). Cette représentation s'apparente à celle d'un pari ferme et définitif dont l'issue dépendra uniquement de la réalisation des événements successifs. Or, le concept de flexibilité implique la possibilité pour un système d'évoluer vers un état atteignable suite à la réalisation d'un événement quel qu'il ait été sa probabilité d'occurrence. Le changement d'état est déclenché à l'issue de la décision qui elle-même est provoquée par l'occurrence de l'événement. Notre étude s'intéresse au lien entre cette prise de décision initiale et la préparation des suivantes qui peuvent être d'un genre différent, avec un cadre de décision distinct (objectif et variables de

décision principalement). Ce principe revient à retarder tout ou partie de la décision si la qualité de l'information n'est pas suffisante.

Nous étudions dans le chapitre suivant les approches existantes sur le concept de flexibilité en soulignant les limites pour une application industrielle avant de proposer une méthodologie qui intègre la flexibilité en amont du processus de décision.

CHAPITRE II. La flexibilité, outil d'analyse dans la littérature et limites dans l'application industrielle

Ce chapitre s'intéresse à l'application industrielle des études menées sur le concept de flexibilité. Celui-ci s'articule donc autour de 3 thèmes développés dans la littérature permettant une mise en œuvre opérationnelle de ce concept, à savoir la mesure de la flexibilité, sa relation avec le concept d'efficience et la conception d'un système flexible.

Dans une première partie, nous rappellerons le contexte dans lequel a émergé le concept de flexibilité.

La deuxième partie s'attachera à la mesure de la flexibilité dont l'utilité est aussi bien orientée en interne pour développer cette caractéristique d'un système qu'en externe pour comparer les performances respectives de différents acteurs économiques.

La troisième partie s'intéressera au lien entre le concept de flexibilité et celui d'efficience, garant de la performance économique lors d'une application industrielle.

Enfin, les quatrième et cinquième parties présenteront certaines applications et leurs limites.

1.	CONTEXTE	41
2.	MESURE DE LA FLEXIBILITE	43
2.1.	UN INDICE QUALITATIF COMME OUTIL DE MESURE	44
2.2.	UN INDICE QUANTITATIF COMME OUTIL DE MESURE	48
2.3.	LA MESURE DE LA FLEXIBILITE AU SEIN D'UN SYSTEME STRATEGIQUE	52
2.4.	LES MESURES ECONOMIQUES AIDENT LES DECISIONS D'INVESTISSEMENT	54
3.	FLEXIBILITE VERSUS EFFICIENCE	57
3.1.	UNE ETUDE DE CAS DANS LE SYSTEME DE PRODUCTION TOYOTA	57
3.2.	UNE ETUDE DE CAS DANS DES ENTREPRISES D'ETAT EN CHINE.	60
3.3.	UNE APPROCHE GENERIQUE DE LA MESURE DE L'EFFICIENCE	62
4.	CONCEVOIR LA FLEXIBILITE	64
4.1.	UNE REVUE DES APPROCHES DE LA CONCEPTION	65
4.2.	CONCEVOIR UN SYSTEME D'ASSEMBLAGE FLEXIBLE	67
4.3.	FLEXIBILITE DE LA CONCEPTION ET MANAGEMENT DES RISQUES	70
5.	LES LIMITES DANS L'APPLICATION INDUSTRIELLE	73

1. Contexte

Le modèle de la standardisation, dont les figures les plus représentatives sont le taylorisme et le fordisme, offre des produits en grande série, sans variété. Cependant, l'existence de ce modèle s'appuie sur des conditions du marché où l'offre ne parvient pas à satisfaire la demande en termes de volumes. Ce modèle permet la production efficiente d'un produit unique à moindre coût. Les gains de productivité sont obtenus en maximisant l'utilisation des ressources, en limitant les changements de série ce qui réduit la diversité des produits. Or, l'évolution du marché montre un développement et un déplacement des formes de concurrence vers de la différenciation. La performance ne se mesure plus uniquement en termes de coûts, de quantité et de qualité de la production. D'autre part, les limites de ce mode de production émergent progressivement. Celles-ci se traduisent notamment à travers l'augmentation des coûts de stockage qui deviennent prohibitifs et par une capacité réduite à s'adapter aux évolutions du marché.

L'environnement concurrentiel du XXI^e siècle change constamment et de manière imprévisible en raison de l'émergence de nouvelles technologies de pointe, du raccourcissement de la durée du cycle de vie des produits et de l'évolution des exigences commerciales auxquelles les entreprises doivent être capables de s'adapter. Celles-ci recherchent constamment de nouvelles opportunités à travers le développement de nouveaux produits pour répondre aux évolutions de la demande du marché. Toutefois, dans un contexte de technicité accrue des produits et d'avancées techniques de plus en plus rapides, les marges de manœuvre d'une entreprise agissant seule sont réduites dans un contexte d'interdépendance au sein de la chaîne logistique. Durant la décennie des années 1970 à 1980, le secteur du tertiaire aux Etats-Unis a pris une place prépondérante dans sa contribution à une croissance économique au niveau national et ce, au détriment de l'industrie manufacturière. Par la suite, la récession du secteur manufacturier américain s'est progressivement propagée dans le monde entier. Pour inverser cette tendance, le gouvernement américain a fondé en 1988, sous l'égide de la *National Science Foundation* (NSF) de nombreuses entreprises, universités et institutions de recherche impliquées dans les secteurs universitaires et de la production industrielle. Ces acteurs ont commencé à analyser de manière profonde les causes de la récession économique afin d'en évaluer les effets, mais aussi de proposer un modèle de production adapté aux évolutions du marché. Ainsi, en 1998, l'université Lehigh et

l'entreprise General Motors (GM), s'appuyant sur un mode de production flexible, ont introduit ensemble le modèle de l'Agile Manufacturing (AM).

La concurrence nationale et internationale, associée aux évolutions des besoins du marché et à la diminution de la durée du cycle de vie des produits exigent une remise en question des principes de production. Les entreprises doivent réagir rapidement aux modifications du marché, en proposant des produits de qualité supérieure à moindre coût. Une manière importante, pour tenter d'atteindre cet objectif et pour répondre à la situation actuelle du marché, a été d'investir dans des Systèmes de Fabrication Flexibles (SFF). Les SFF sont conçus de manière à restituer la flexibilité des « *job shops* », tout en conservant l'efficacité de chaînes de montage dédiées. Il est attendu de tels systèmes, qu'ils augmentent la productivité de l'entreprise en réduisant les stocks et les délais de fabrication. Ils ont été développés de manière à constituer un compromis pour la fabrication de masse, dans les situations où la variété des composants est trop faible pour mettre en place des process dédiés et trop élevée pour faire usage de machines-outils autonomes. (Stecke, 1983) estime que cette partie de la production de masse correspondait à 70% des situations de fabrication aux Etats-Unis à la fin du XXe siècle.

Toutefois, (Jaikumar, 1986) a formulé une critique sur l'usage de ces technologies avancées. Il a constaté que bien que les entreprises achetaient le matériel nécessaire à une automatisation flexible de la production, elles n'en faisaient pas un usage adapté. C'est pourquoi, au lieu de réduire les écarts en termes de niveau de productivité qui existent à l'échelle mondiale entre les différents pays industrialisés, l'automatisation tend au contraire à les creuser. En 1986, l'auteur a comparé la production de produits semblables par des entreprises équipées de SFF, aux Etats-Unis et au Japon. Il a découvert que les entreprises américaines produisaient une variété de l'ordre d'une dizaine de types de pièces différentes avec ces technologies, contre 93 pour les technologies japonaises. Le volume de production moyen par pièce était de 1727 aux Etats-Unis, contre seulement 258 au Japon. Constat qui vient compléter cette comparaison, pour chaque nouvelle pièce produite par un SFF aux Etats-Unis, un SFF au Japon pouvait en produire 22. En résumé, les industriels utilisent les SFF pour produire une variété limitée de pièces en volume important, au lieu de produire des pièces à la diversité importante sur des volumes faibles. Jaikumar a découvert que la plupart des SFF étaient utilisés dans le cadre de process de fabrication dédiés et non de process aléatoires comme définis dans (Groover, 1987). Toutefois, Jaikumar souligne que ceci

s'oppose au principe inhérent au concept de flexibilité qui est supposé justifier l'existence des SFF. Il conclue ses résultats en écrivant :

« Ils achètent le matériel pour la fabrication flexible, mais s'en servent de manière très pauvre. Plutôt que de réduire le fossé concurrentiel avec le Japon, les technologies d'automatisation l'élargissent encore davantage. A quelques exceptions près, les Systèmes de Fabrication Flexibles installés aux Etats-Unis montrent un incroyable manque de flexibilité. Dans bien des cas, ils se montrent moins performants que les systèmes qu'ils sont sensés remplacer. Ce n'est pas la technologie elle-même qui doit être incriminée. C'est le management qui fait toute la différence. » (Jaikumar, 1986).

Bien qu'un SFF conçu pour un traitement aléatoire intègre, dans sa conception même, une plus grande flexibilité qu'un SFF conçu pour un traitement dédié, il est évident que le plan de production pour chaque type de système devra tirer parti de toutes les formes de flexibilités disponibles. (Carter, 1986) souligne que la difficulté fondamentale tient à la manière dont est mesuré et employé le concept même de flexibilité. De manière historique, le management de ressources tente de réduire les coûts unitaires associés à la production de toute pièce sur un SFF. Ceci entraîne naturellement des délais de production longs avec peu de changements de pièces. Ceci s'accorde bien avec l'objectif de maximiser la productivité. Cependant, ceci revient à ne pas faire usage de la flexibilité inhérente aux SFF.

Ainsi, nous nous intéresserons dans les parties suivantes aux trois axes principaux développés dans la littérature permettant la mise en œuvre de la flexibilité dans le secteur industriel à savoir : la mesure de la flexibilité pour les systèmes de production, les problématiques liées à la flexibilité versus l'efficacité et enfin l'intégration de la flexibilité à la conception. Nous verrons notamment que préférer un critère de réduction des coûts à une maximisation de la productivité pour un SFF permet de développer l'exploitation de sa flexibilité.

2. Mesure de la flexibilité

Le concept de mesure de la flexibilité a été largement étudié (Browne, Dubois, Rathmil, Sethi, & Stecke, 1984; Gupta & Goyal, 1989; Mandelbaum & Brill, 1989; Sethi & Sethi, 1990; Parker & Wirth, 1999), ce qui a conduit au développement de nombreuses

classifications des types de flexibilités, applicables à des machines, à la manipulation de matériaux, aux opérations, aux process de fabrication, au routage, aux volumes et aux capacités. Dans cette partie, nous nous intéresserons à la mesure de la flexibilité dans les Systèmes de Fabrication Flexibles. Cette étude repose sur la comparaison de différentes approches du problème dans la littérature actuelle.

Au cours des dernières années, les entreprises ont accordé une attention particulière à certaines propriétés d'un système de fabrication, telles que la flexibilité et l'agilité, dans le but de leur fournir un avantage concurrentiel. Les entreprises dotées de ces caractéristiques sont considérées comme capables de gérer une plus forte incertitude dans leur environnement, de s'adapter plus rapidement aux évolutions des besoins du marché et de se positionner sur des fenêtres d'opportunité de plus en plus étroites. Les propriétés que nous avons évoquées - appelées propriétés structurelles- sont intégrées à la conception de l'architecture du système, de politiques opérationnelles, de technologies pour la fabrication et d'organisations. (Buzacott, 1999) souligne que la structure est l'une des problématiques couramment prise en compte dans les stratégies de fabrication. D'autres chercheurs évoquent ces problématiques à travers des terminologies différentes. (Chryssolouris & Lee, 1992) distinguent deux définitions de la flexibilité. La première définit la flexibilité comme un « attribut intrinsèque » du système de fabrication. La seconde est un « attribut relatif », qui dépend des exigences imposées au système par les contraintes externes.

L'application d'une théorie de la mesure est de nature à permettre une meilleure définition des propriétés structurelles de l'entreprise pour gérer celles-ci dans le cadre de sa stratégie. L'application d'une théorie de la mesure a pour objectif d'exprimer avec précision les propriétés de l'entreprise, de les associer à des valeurs numériques, d'utiliser un large éventail d'outils mathématiques de validation et d'identifier quelles analyses statistiques sont porteuses de sens.

2.1. Un indice qualitatif comme outil de mesure

La plupart des systèmes de mesure s'appuient sur des mesures opérationnelles. Ces dernières portent sur le fonctionnement de l'entreprise en relation avec son environnement. Elles peuvent évoluer de manière radicale sur de courtes périodes. Le tableau de bord prospectif (Kaplan & Norton, 1992) s'appuie sur des mesures opérationnelles financières et

non financières pour piloter une stratégie d'entreprise. (Neely, Richards, Mills, Platts, & Bourne, 1997) ont présenté une approche structurée de la mesure des performances d'entreprise qui a pour but de définir leur finalité et la manière dont elles sont liées aux objectifs managériaux. De nombreuses mesures des propriétés de l'entreprise sont formulées en termes vagues et souvent non quantifiées. Elles ne peuvent donc être utilisées de manière pratique en vue de formuler et d'évaluer des objectifs stratégiques. De manière générale, ces mesures sont souvent ambiguës, contradictoires, voire arbitraires dans certains cas. C'est ce qui a conduit, par exemple, (Shewchuk & Moodie, 1998) à proposer une taxonomie en vue de classer les différents types de flexibilité identifiés dans la littérature. En ce qui concerne la mesure de la flexibilité, (Toni & Tonchia, 1998) précisent que :

« en dépit de l'importance et de l'intérêt que soulève constamment la notion de flexibilité dans les cercles académiques comme managériaux, la mesure de la flexibilité reste un sujet sous-développé ».

Une « mesure » peut être définie comme l'assignation de nombres aux attributs d'un artefact suivant une certaine procédure, de sorte que certaines propriétés et certaines relations soient préservées (Krantz, Luce, Suppes, & Tversky, 1971; Narens, 1985; Diez, 1997). La mesure débute avec la définition du système d'intérêt, appelé système empirique. Le cadre de la mesure exige une compréhension claire du système empirique, une définition de ses objets et une définition des relations qualitatives qui existent entre eux. Trois questions sont alors posées :

- 1) quels sont les objets mesurés ?
- 2) quelle est la relation empirique entre ces objets ?
- 3) suivant la définition du système, cette mesure est-elle structurelle ou bien opérationnelle ?

Peu de chercheurs ont considéré de manière explicite les résultats d'une combinaison de propriétés des systèmes. Lorsque cela est nécessaire, on peut utiliser un opérateur de concaténation qui s'appuie sur une définition du système et de la mesure. La Figure 15 montre un schéma général de ce processus.

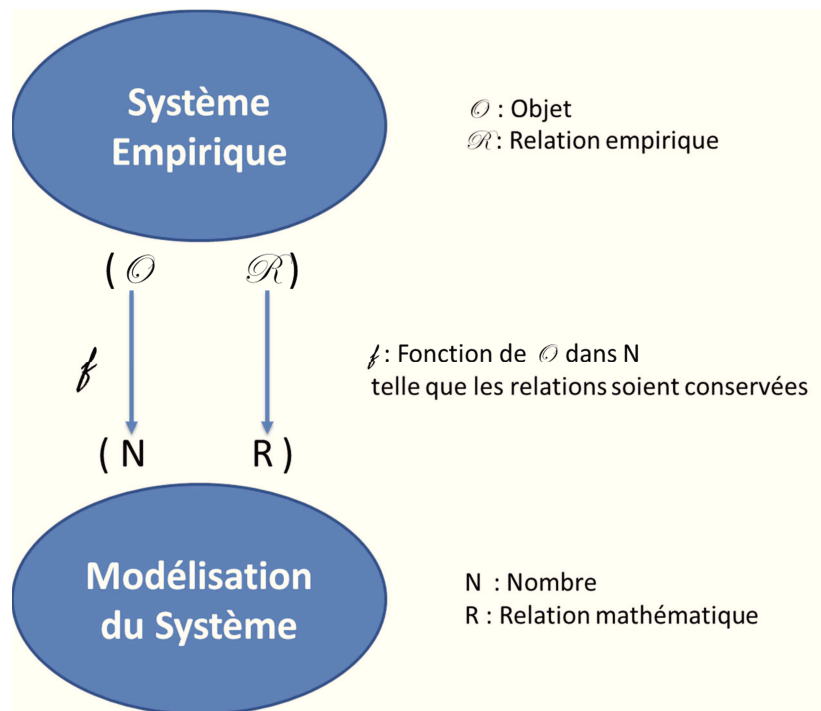


Figure 15 : Condition de représentation d'une théorie de la mesure

Dans le cadre d'une théorie de la mesure, ces auteurs ont élucidé le problème du point de vue du système empirique, mais n'ont pas considéré les mesures en tant qu'objet de nature mathématique. Le cadre proposé par (Bernardo & Mohamed, 1992) pour établir une théorie de la mesure prolonge ces travaux antérieurs, en examinant les relations mathématiques depuis le système empirique vers le système numérique, ainsi que les propriétés de ces relations. Ainsi :

« une théorie de la mesure fournit une base mathématique formelle pour que les mesures effectuées dans ce cadre, présentent certaines caractéristiques souhaitables et préservent les relations que l'on peut trouver au sein du système » (Krantz, Luce, Suppes, & Tversky, 1971; Narens, 1985; Diez, 1997)

La seconde différence clé tient au fait que les classifications évoquées ci-dessus se limitent à la mesure de la flexibilité. Le cadre que propose la théorie de la mesure est plus général et s'applique à toutes les propriétés structurelles du système telle l'agilité par exemple. Le Tableau 14, (Giachetti, Martinez, Saenz, & Chen, 2003), présente une analyse complète des mesures de la flexibilité et de l'agilité dans le cadre de la théorie de la mesure.

CHAPITRE II. La flexibilité, outil d'analyse dans la littérature et limites dans l'application industrielle

Mesure	Références	Définition	Système Empirique		Condition de la modélisation		Relation d'ordre	
			Objet	Relation	Structurel/ Opérationnel	x>y si M(x)>M(y)	M(x)>M(y) si x>y	Transitive
Agilité Indice	Kumar et Motwani (1995) & Martinez (2000)	Yij sont des mesures subjectives du facteur d'agilité i durant la période j	Entreprise	Est plus agile que	Opérationnel	Oui	Oui	Oui
Agilité Tableau de Bord	Metes (1998)	Mesure établie à partir d'une échelle à 5 niveaux (subjectif)	Entreprise	Est plus agile que	Opérationnel	Oui	Oui	Oui
Agilité Temps Retard	Goranson (2000)	Nombre de boucles dans les processus	Entreprise	Est plus complexe que	Structurel	Oui	Non	Non
Flexibilité des livraisons	Beamon (1999)	Capacité à avancer les dates de livraisons prévues	Carnet de Commandes	Est plus capable d'avancer un délai que	Opérationnel	Oui	Oui	Oui
Flexibilité de capacité	Parker et Wirth (1999)	Capacité à ajouter facilement de la capacité à un système	Infrastructure	A plus de facilité à augmenter la capacité que	Structurel	Oui	Oui	Oui
Flexibilité	Thomke et Reinerstein (1998)	Ratio du nombre de modification d'un produit sur l'estimation du profit engendré	Processus de conception	A un ratio de nombre de modifications sur l'estimation des profits supérieur à	Opérationnel	Non	Oui	Non
Flexibilité machine	Gerwin (1987)	Eventail des matériaux utilisables	Machine	Est plus étendu que	Structurel	Oui	Oui	Oui
Flexibilité machine	Sethi et Sethi (1990) & Tsubone et Horikawa (1999)	Nombre des opérations réalisables sans réglage majeur	Machine	A plus d'opérations réalisées pour un réglage effectué	Structurel	Non	Non	Non

Tableau 14 : Analyse des mesures suivant le cadre de la théorie de la mesure

Les cadres de mesure proposés par (Bititci, Suwignjo, & Carrie, 2001) ainsi que d'autres auteurs sont prévus pour la mesure opérationnelle et s'appuient sur une approche fondée sur la théorie de la décision. Le cadre de mesure doit fournir une analyse détaillée. Les auteurs fournissent un axiome permettant son utilisation pratique dans un cadre de travail donné. La flexibilité de livraison (Delivery flexibility, ou DF) correspond à la capacité à avancer des dates de livraison si nécessaire, de manière à intégrer des commandes en période d'affluence ou des commandes spéciales à la chaîne logistique (Beamon, 1999; Beamon, 1998). Sa mesure est définie comme la proportion de temps morts sur l'ensemble des tâches j. Le temps mort correspond à la différence entre le temps actuel t et la date d'échéance L. Si l'on note E la première date à laquelle la livraison peut être faite, alors : $DF = \frac{\sum_j(L_j - E_j)}{\sum_j(L_j - t)}$

Certains systèmes empiriques ont besoin de propriétés additives. Aucune des mesures que nous avons citées ne définit de méthode pour additionner deux objets ensemble. Dans l'approche pour la mesure de la flexibilité de (Bernardo & Mohamed, 1992), les auteurs

s'intéressent aux propriétés aussi bien structurelles qu'opérationnelles du système. La conception, la gestion et l'amélioration du système doivent analyser les deux ensembles de propriétés. Le cadre développé s'appuie sur une théorie relationnelle de la mesure. Celle-ci permet d'analyser aussi bien des mesures de flexibilité que des mesures d'agilité. Ce cadre de mesure peut aussi être utilisé de manière prospective, afin d'aider les concepteurs d'un système à définir ses propriétés souhaitées, leur sens et les moyens de les mesurer. Cependant, aucune des mesures analysées ne tient explicitement compte de la problématique de concaténation. L'échelle de la mesure n'est généralement pas prise en compte, alors qu'il est justement important de connaître cette échelle pour déterminer quelles statistiques peuvent être porteuses de sens et comment interpréter correctement la mesure.

Les propriétés structurelles de l'entreprise fournissent un indice qualitatif pour mesurer la flexibilité. En dehors de ces propriétés structurelles, certains travaux ont montré que quatre éléments de la flexibilité de fabrication peuvent être regroupés en deux facteurs conceptuellement distincts, que sont *l'étendue* et *la capacité de réalisation* de réponses flexibles. Tout comme pour ces deux indices qualitatifs, nous observons un intérêt croissant pour l'utilisation de mesures de la flexibilité comme indicateurs de la capacité d'une entreprise à répondre aux demandes de ses clients. La partie suivante est consacrée à *l'entropie* comme mesure de la flexibilité d'opérations de fabrication. Nous décrivons les propriétés qui font de l'entropie une mesure intéressante de la flexibilité. Les travaux étudiés utilisent une simulation informatique de « *job shop* » pour évaluer cette mesure au travers d'un grand nombre de scénarii différents en utilisant un simulateur stochastique d'événements discrets. Les résultats montrent que l'entropie permet de mesurer la flexibilité lorsque la demande relative pour la fabrication de différents produits change. Celle-ci peut également être utilisée pour contrôler l'évolution de la flexibilité du process dans le temps.

2.2. Un indice quantitatif comme outil de mesure

Du point de vue de la mécanique statistique, l'entropie est définie comme la probabilité que surviennent certains événements dans le référentiel de tous les événements possibles.

L'impact potentiel de la flexibilité sur la compétitivité de l'entreprise est reconnu (Cox, 1989; Meyer, Jinichiro, Miller, & Rerdows, 1989). Toutefois, managers comme chercheurs ont noté le manque de mesures adaptées à la flexibilité (Toni & Tonchia, 1998; Parker & Wirth, 1999; Koste & Malhotra, 1999; Beach, Muhlemann, Price, Paterson, & Sharp, 2000),

ainsi que le besoin de mieux comprendre les relations entre différents types de flexibilité (Parker & Wirth, 1999; Beach, Muhlemann, Price, Paterson, & Sharp, 2000). (Shannon, 1948), quant à lui, a examiné l'information comme fonction d'une probabilité a priori de l'occurrence d'un état ou d'une issue donnés, au sein de l'univers des états physiquement possibles. Il a alors considéré l'entropie comme équivalente à l'incertitude. Ainsi, un système confronté à l'incertitude exploite l'entropie comme une réponse adaptative pour faire face au changement. Dans le contexte des systèmes de fabrication, la flexibilité est communément définie comme la capacité du système à faire face au changement (Mandelbaum, 1990). (Zelenovic, 1982) a défini la flexibilité comme la capacité du système à s'adapter à des changements variés. Plus récemment, (Kahyaoglu & Kayaligili, 2002) ont proposé une mesure qualitative de la flexibilité fondée sur une approche opérationnelle qui décrit le niveau de performance d'un système par rapport à un état de référence, lorsque survient un quelconque changement. La mesure que proposent ces auteurs est adaptée lorsqu'il est difficile de déterminer les probabilités des différentes issues. Toutefois, cette mesure doit être redéfinie pour chaque situation et une mesure du changement doit être définie pour chaque cas. (Yao, 1985) utilise une approche fondée sur la théorie de l'information pour définir l'entropie comme mesure de la flexibilité de routage.

La flexibilité d'action du système dépend des options disponibles en termes de prise de décision, ou encore des choix possibles et de la liberté avec laquelle ces différents choix peuvent être faits (Kumar, 1987). Ce postulat a été la principale raison qui a conduit de nombreux chercheurs à considérer l'entropie comme une mesure de flexibilité (Shuiabi, Thomson, & Bhuiyan, 2005; Olivella, Corominas, & Pastor, 2010; Piplani & Wetjens, 2007). Considérons ainsi une situation à n issues possibles, chacune avec une probabilité d'occurrence de p_i . Pour tout i compris entre 1 et n , la mesure de l'entropie de cette distribution est donnée par la formule suivante : $S = -k \sum_i p_i \ln(p_i)$, où k est une constante strictement positive à valeur arbitraire.

A mesure que les événements possibles deviennent plus nombreux et que leurs probabilités d'occurrence se rapprochent, l'incertitude associée à la situation augmente et l'entropie augmente également par conséquent. Ainsi, plus la demande relative est importante, plus l'entropie est élevée, de sorte que les process capables de gérer des produits plus nombreux sont plus flexibles. Réciproquement, plus le système est flexible, plus son entropie est élevée. La demande relative est alors définie comme la quantité de temps qu'une entité

consacre à réaliser une tâche, par rapport au temps consacré à l'ensemble des tâches assignées à l'entité en question.

L'entropie mesure donc la capacité à s'acquitter d'un ensemble de demandes relatives ou de tâches, ainsi que la distribution de ces demandes relatives. La Figure 16 illustre cette approche.

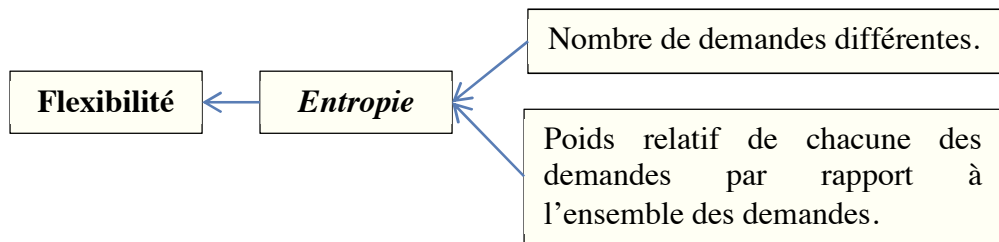


Figure 16 : Les facteurs mesurés par l'entropie contribuent à quantifier la flexibilité.

Le modèle mathématique est défini comme suit : un *job shop* de n machines fonctionne pendant un laps de temps T , au cours duquel il est soumis à différentes demandes en produits. A chaque produit est associée une séquence spécifique de machines par lesquelles il sera traité.

La demande relative p du produit i traité par une machine j vaut donc :

$$p_{ij} = \frac{(ts_{ij} + tm_{ij})}{\sum_{i=1}^{M_i} (ts_{ij} + tm_{ij})}$$

où ts est le temps de réglage, tm le temps de fabrication et M le nombre total de machines constituant le système considéré.

L'entropie de la machine j vaut :

$$S_i = - \sum_{i=1}^{M_i} p_{ij} \ln p_{ij},$$

, où la constante k est fixée à 1.

L'utilisation de la machine j est donnée par la formule :

$$U_j = \frac{\sum_{i=1}^{M_i} (ts_{ij} + tm_{ij})}{T}$$

Les résultats sont donnés pour un nombre de changements de demande, des temps de traitement, des temps de réglage, un nombre de produits et des changements de routage donnés.

Dans cette approche, l'entropie est vue comme une mesure acceptable de la flexibilité. Elle est définie comme la capacité à répondre aux modifications de la gamme de produits et de la demande. Celle-ci peut être utilisée pour contrôler des process entiers. La mesure de l'entropie s'appuie sur des données typiques issues de dossiers de production ou d'activité, qui sont immédiatement accessibles dans l'ensemble des environnements de production.

Malgré les avantages de cette approche, nous devons noter certaines limites dans l'utilisation de l'entropie comme mesure de la flexibilité. Ainsi, l'entropie ne pourra pas distinguer entre la disponibilité d'une capacité supplémentaire et la capacité du système à absorber des variations de la demande sur un produit. L'entropie est une mesure relative. Elle ne peut pas être utilisée pour mesurer des valeurs absolues, ni pour évaluer l'atteinte d'objectifs prédéfinis. Elle permet seulement d'observer des tendances, comme l'évolution d'une mesure dans le temps, qui permet de fournir une référence ou une base de comparaison à différents moments dans le temps. Puisque l'entropie est une mesure relative, il devient nécessaire d'utiliser une mesure complémentaire afin de montrer l'état de ce que l'on mesure et de fournir certains indices en termes d'analyse et de causalité.

Les deux approches techniques présentées précédemment ont été développées pour fournir aux utilisateurs d'un système, un indice qualitatif pour l'analyse et un indice quantitatif correspondant au concept d'entropie. Afin de mettre en œuvre la flexibilité des SFF, une politique basée sur la réduction des coûts présente de meilleurs résultats qu'une politique reposant simplement sur une maximisation de la productivité. De cette manière les coûts seront réduits et l'utilisation de la flexibilité du système augmentée. La partie suivante s'intéresse aux mesures de flexibilité dans un système de prise de décision stratégique. L'analyse de cette approche est réalisée du point de vue d'une planification stratégique de la chaîne logistique.

Aujourd'hui, les aires de prise de décision les plus sensibles dans les environnements compétitifs sont celles qui portent sur la gestion des incertitudes de la chaîne logistique et l'amélioration de la réactivité du marché. Le développement de stratégies adaptées dans ces domaines permettra aux chaînes logistiques d'éviter la plupart des écueils du monde des affaires (Tang & Tomlin, 2008). L'intégration de mesures de la flexibilité tend à rendre un système plus réactif. Depuis près de 50 ans, la recherche accorde une importance toujours plus élevée à la flexibilité de la chaîne logistique, en développant des mesures de flexibilité variées, fondées par exemple sur la spéculation et la flexibilité de volumes dans (Lin & Chen,

2009) ; un indice économique combinant la flexibilité du travail, la flexibilité de routage et les technologies de l'information, (Gong, 2008), les impacts de différents types de flexibilité sur la performance de la chaîne logistique chez (Sawhney, 2006) ; les effets de la création de contrats d'approvisionnement d'après (Das & Abdul-Malek, 2003) ; l'assignation de configurations particulières dans les usines et chez les fournisseurs, chez (Garaveli, 2003) ; ou encore la flexibilité sur les volumes et les délais, (Sabri & Beamon, 2000).

2.3. La mesure de la flexibilité au sein d'un système stratégique

L'article « Integrating effective flexibility measures into a strategic supply chain » de (Das, 2011) utilise les paramètres de la capacité, du mix produits, de la distribution et de la flexibilité de l'approvisionnement en données d'entrée. L'auteur les intègre à un niveau stratégique dans un modèle de planification de la chaîne logistique à numération mixte, afin de faire face aux incertitudes portant sur les stocks et la demande.

(Das, 2011) a classifié les composantes d'un produit ainsi que les capacités nécessaires à la production de ces dernières en catégories centrales et non-centrales. Il a ensuite proposé un modèle en vue de distinguer la concentration en amont de la sous-traitance dans le cas des composantes non-centrales. Il a ensuite considéré un modèle de décision mixte, s'appuyant sur la sous-traitance et une concentration en amont, pour atteindre la flexibilité souhaitée dans une chaîne logistique.

D'après (Das, 2011), la flexibilité est un moyen pour maximiser le profit. En parlant du choix de la demande, celui-ci a voulu intégrer la flexibilité dans la sélection des clients pour vendre des produits dans le but de maximiser les profits. En supposant, comme le fait Zhang dans (Zhang S. , 2001), que chaque client ait un prix de réserve, l'auteur s'attend à ce que chaque choix de demande offre au client des prix différents et ce, en vue d'explorer leur « empressement à l'achat ». (Geunes, Shen, & Romejin, 2004) ont étudié un concept semblable, celui de la flexibilité du choix de demande. (Chan & Chan, 2010) ont proposé un modèle à deux niveaux du coût de stockage associé à une chaîne logistique afin d'étudier l'influence de la flexibilité et de l'adaptabilité sur la quantité livrée et les dates de livraison dans une chaîne logistique de type production à la demande. L'approche de (Cochran & Uribe, 2005) est fondée sur la création de capacité et de flexibilité supplémentaires par l'intégration d'équipements exploitant le lean. Les études sur la gestion de l'approvisionnement chez (Kesen, Kanchanphiboon, & Das, 2010), (Chan & Chan, 2010),

(Zhu, Gavirneni, & Kapuscinski, 2010), (Liu & Chetinkaya, 2009), ont proposé des modèles pour optimiser les coûts d'approvisionnement. Ces études se sont concentrées sur la taille des lots et ont proposé d'assurer la flexibilité dans la gestion de l'approvisionnement par la coordination ou le partage d'informations.

A partir de l'analyse stochastique par scénarii d'informations de marché, l'entreprise estime une augmentation prévisible de la demande, D_{Sict} , pour le produit i à l'emplacement client c pendant un temps t . L'entreprise dispose également de plusieurs fournisseurs en entrée notés $s \in \{1, 2, \dots, S\} = SP$ et affiliés par l'usage de critères de qualité.

L'entreprise envisage de devenir plus compétitive à l'échelle du marché en établissant un niveau de service client pour chaque produit et une entrée qui dépasse le niveau de service du marché par un pourcentage défini – dit flexibilité du niveau de service client.

1) La flexibilité de capacité fixe les conditions dans lesquelles les managers d'une chaîne logistique tentent d'acquérir ou de louer une capacité supplémentaire en plus d'utiliser la capacité existante pour compenser les effets de l'augmentation de la demande suivant un certain pourcentage, anticipé ou ciblé, pendant la période planifiée.

2) La flexibilité de l'approvisionnement en produits permet aux managers d'une chaîne logistique de sélectionner des types de produits adéquats à fournir au marché, compte tenu du cycle de vie réduit de certains produits.

3) La flexibilité du service client permet d'assurer que le niveau de service client soit fixé en fonction du pourcentage de situations de non-rupture de stock, pour chaque produit, dans chaque centre de service client.

4) La flexibilité des fournisseurs introduit la possibilité de créer un réseau de fournisseurs affiliés, qui fourniront des stocks en entrée dans les situations où des partenaires de certains types, ou des fournisseurs de qualité élevée, ne pourraient fournir des entrées, ou ne pourraient honorer une quantité donnée d'entrées en raison d'une augmentation de la demande ou bien d'une modification du mix produits.

L'objectif global d'un modèle stratégique de planification de la chaîne logistique est de maximiser les profits en tirant parti de la flexibilité pour assurer l'allocation optimale des ressources aux usines, des usines aux centres de distribution, des centres de distribution aux

clients et des flux entrants aux fournisseurs. Ceci constitue une nouvelle approche pour modéliser les quatre types de mesures de la flexibilité de la chaîne logistique.

Cette étude propose un algorithme pour résoudre le modèle de planification de la chaîne logistique à un niveau stratégique, en intégrant des mesures de la flexibilité de la planification. L'objectif est de maximiser les profits à travers les éléments suivants : les décisions de production ; l'assignation d'entrées aux fournisseurs, de la production aux usines, des usines aux centres de distribution, des centres de distribution aux clients ; la constitution de stocks de sécurité du produit fini dans les centres de distribution et de matières premières dans les usines. Ce modèle intègre les coûts, la capacité, la capabilité et d'autres données d'entrée relatives aux besoins de la production, du stockage et du marketing, dès lors que l'on intègre les notions de mix produits, de capacité, d'approvisionnement et de la flexibilité du service client. Ceci permet au modèle de proposer des applications en ce qui concerne l'allocation optimale de la production, du transport et de la distribution. Bien que le modèle s'appuie sur de nombreuses variables entières, le temps de calcul avec les moyens actuels est de l'ordre d'une heure.

Posant comme hypothèse qu'une politique de minimisation des coûts donnera de meilleurs résultats en termes de performance qu'une politique de maximisation de la productivité, nous allons maintenant étudier l'intégration de mesures économiques de la flexibilité dans les systèmes de fabrication.

Divers principes et technologies de fabrication ont été introduits, tels que les technologies de groupe (GT), les systèmes juste-à-temps (JIT), les systèmes de fabrication flexibles, etc. Ces systèmes intégrés de fabrication et de production (IMPS) ouvrent tout un champ de nouvelles possibilités pour l'amélioration des performances dans la fabrication. Toutefois, ces IMPS exigent un niveau élevé d'investissement initial dans un environnement fondé sur le long terme et l'incertitude. Sans preuve ou justification économique, peu d'entreprises sont prêtes à assumer le risque financier associé.

2.4. Les mesures économiques aident les décisions d'investissement

Dans les SFF, la productivité, la qualité et la flexibilité sont des mesures critiques de la performance globale de fabrication. La productivité est indicative de l'efficacité dans la

conversion des entrées (ressources) en sorties. La qualité désigne le degré d'excellence dans la fabrication des produits. La flexibilité désigne enfin l'adaptabilité aux évolutions de l'environnement de fabrication.

Il est possible de remplacer des mesures de flexibilité partielles par des mesures de flexibilité globales, comme mesure de la possibilité qu'a un système de fabrication d'ajouter de la valeur aux produits. Les mesures de flexibilité partielles aident à expliquer les évolutions de la flexibilité globale. Il est couramment avancé que plus la flexibilité est élevée, plus la productivité est faible (Gustaysson, 1984; Hegland, 1981). Un autre principe fréquemment soutenu est que l'augmentation de la qualité entraîne une augmentation des coûts et une diminution de la productivité (Kaplan, 1983). Toutefois, certains auteurs ont récemment suggéré que ces trois mesures pouvaient avoir des relations positives entre elles (Muramatsu, Ishii, & Takahashi, 1985; Zelenovic, 1982). Malheureusement, peu de travaux ont été réalisés pour vérifier en pratique ces observations. Les relations entre productivité, qualité et flexibilité doivent être étudiées pour fournir des mesures adéquates de performance et éclairer les décisions liées à l'introduction d'IMPS.

Selon (Son & Park, 1987), la flexibilité est une mesure de la performance de fabrication qui indique la capacité d'un système de fabrication à s'adapter aux changements dans les environnements de fabrication. Quatre types de mesure de la flexibilité sont rencontrés dans la littérature : l'équipement, le produit, le process et la demande.

Mesures partielles de la flexibilité :

Pour chacun des cas suivants, O_T représente une évaluation des possibilités offertes par le système.

- 1) La flexibilité des équipements : c'est la capacité de l'équipement à fabriquer de nouveaux produits et des variantes de produits existants. Cette flexibilité des équipements F_E est définie pour une période t donnée, par :

$$F_E = O_T / C_I \quad \text{où } C_I \text{ est le coût associé aux équipements inactifs.}$$

- 2) La flexibilité des produits est l'adaptabilité aux changements dans l'assortiment de produits. Nous définissons la flexibilité des produits F_P pour une période donnée, comme

$$F_P = O_T / A \quad \text{où } A \text{ correspond au coût d'installation}$$

- 3) La flexibilité du process représente l'adaptabilité vis-à-vis de divers changements dans le traitement des pièces, telles que les pannes d'outils et d'équipements, l'accès aléatoire au mix produits, le planning du process, etc. Dans ce cadre, la flexibilité du process F_s est définie pour une période donnée, comme :

$$F_s = O_\tau / C_w \quad \text{où } C_w \text{ correspond au coût d'attente des pièces traitées.}$$

- 4) La flexibilité de la demande correspond à l'adaptabilité face aux changements dans l'intensité de la demande. Celle-ci s'exprime pour une période donnée comme :

$$F_d = O_\tau / H \quad \text{où } H \text{ correspond aux coûts de stockage.}$$

Mesure de la flexibilité globale

A partir des flexibilités partielles présentées ci-dessus, la flexibilité pour une période donnée est définie comme :

$$TF = O_\tau / (C_t + A + C_w + H)$$

La productivité, la qualité et la flexibilité sont aussi des mesures critiques de la performance de production qui permettent de justifier l'investissement dans des systèmes intégrés de fabrication. L'objectif poursuivi par les auteurs est de définir, de quantifier et de combiner ces trois mesures (Son & Park, 1987). Ces dernières ont donc été intégrées en vue d'évaluer le système de fabrication dans son ensemble. Ces mesures s'appuient sur une technique de simulation pour recueillir des coûts intangibles, tels que ceux liés à l'attente de pièces et à l'inactivité d'équipements. Ces mesures se rattachent étroitement au système de comptabilité de l'entreprise. Les mesures de performance présentés peuvent aider à la planification stratégique, dans la mesure où elles ne se limitent pas à l'évaluation des performances de fabrication passées et présentes, mais peuvent aussi prédire les effets d'investissements en capital sur les performances futures. Cependant, cette méthode nécessite de grands volumes de données quantitatives, liées par exemple à l'organisation, au budget et aux estimations. Dans le cas d'entreprises de taille importante, ce travail peut être extrêmement complexe et impacter l'exactitude des résultats.

De nombreuses théories de l'organisation développent l'idée que l'efficacité nécessite une gestion administrative importante, que cette dernière nuit à la flexibilité et que les organisations doivent donc gérer un compromis entre flexibilité et efficacité.

3. Flexibilité versus Efficience

Le compromis entre flexibilité et efficience a été appelé un « paradoxe central de l'administration » selon (Thompson, 1967). En effet, flexibilité et efficience sont fréquemment perçues comme des besoins concurrents constituant les deux extrémités d'un même spectre. Tandis que l'efficience vise à maximiser les sorties à partir d'entrées données, en faisant usage de ressources existantes (Ghemawat & Costa, 1993), la flexibilité exige de l'entreprise qu'elle se repositionne rapidement face aux changements futurs, en reconfigurant ses compétences (Carlsson, 1989). Dans la mesure où l'efficience et la flexibilité entrent en concurrence pour utiliser des ressources limitées, toute entreprise qui poursuivrait ces deux objectifs pourrait se retrouver « coincée au milieu » (Porter, 1980) et obtenir des performances moindres. Les dirigeants devraient ainsi choisir entre une stratégie orientée vers l'efficience ou bien vers la flexibilité, mais pas vers les deux (Abernathy, 1978). Plus récemment, alors que notre environnement en constante mutation oblige de plus en plus les entreprises à réaliser à la fois des activités d'exploitation et des activités de veilles, certains chercheurs ont interrogé la nécessité d'établir ce compromis (Ferbows & Meyer, 1990) et ont exploré les possibilités d'atteindre à la fois une efficience et une flexibilité élevées (Adler, Goldoftas, & Levine, 1999).

3.1. Une étude de cas dans le système de production Toyota

Il existe de nombreux types de flexibilité et une littérature abondante s'est intéressée à établir différentes typologies pour ce concept (Sethi & Sethi, 1990). Toutefois, d'un point de vue organisationnel, toutes les formes de flexibilité sont confrontées à un défi commun selon les auteurs (Adler, Goldoftas, & Levine, 1999). L'efficience exige des formes d'organisation bureaucratiques, avec un degré élevé de standardisation, de formalisation, de spécialisation, de hiérarchisation. Mais ces mêmes caractéristiques de la bureaucratie empêchent le processus fluide d'adaptation qu'exige la flexibilité. Les organisations doivent donc rechercher un compromis entre efficience et flexibilité (Knott, 1996; Kurke, 1988).

Une étude de cas menée par (Adler, Goldoftas, & Levine, 1999) sur une organisation qui excelle à la fois sur les critères d'efficience et de flexibilité permet de développer empiriquement la connaissance de ces mécanismes et freins hypothétiques, tout en observant la manière dont l'environnement influence leurs effets relatifs. NUMMI, filiale de TOYOTA,

possède une organisation de ce type. Cette étude s'intéresse à son agilité face à des changements de grande ampleur. (Tushman & O'Reilly, 1997) ont analysé plusieurs organisations capables à la fois de viser des évolutions et des révolutions par l'innovation.

Le postulat d'un compromis entre efficacité et flexibilité est l'une des idées les plus répandues de la théorie de l'organisation. (Thompson, 1967) le décrit comme « le paradoxe central de l'administration ». Les gestionnaires doivent choisir entre des organisations conçues pour des tâches de routine et répétitives, et des organisations conçues pour des tâches non-routinières et innovantes. Toutefois, à mesure que s'intensifient les rivalités concurrentielles, un nombre grandissant d'entreprises tentent de s'améliorer à la fois suivant les critères d'efficacité et de flexibilité (Meyer, Jinichiro, Miller, & Rerdowns, 1989; Volberda H. W., 1996).

NUMMI est une filiale de Toyota localisée à Fremont. Celle-ci s'appuyait sur une organisation fortement bureaucratique pour atteindre une efficacité élevée. La théorie de l'organisation a toujours soutenu que des structures et processus formels s'inséraient dans un contexte organisationnel plus large et que leur efficacité y était conditionnée, sur les plans de sa culture et de sa gouvernance (Scott, 1992). NUMMI a investi bien plus dans la formation de ses travailleurs que les usines des *Big Three* (General Motors, Ford et Chrysler). La formation était d'une importance critique. D'autre part, la confiance s'est avérée être un deuxième facteur contextuel déterminant, plus précisément le manque de confiance dans le respect des engagements des autres parties - ce que (Sako, 1992) appelle la confiance de contrat (*contract trust*), (Mishra, 1996), la confiance en la fiabilité (*reliability trust*) et (Mayer, James, & Shoorman, 1995), la confiance de capacité (*ability trust*).

Afin de comprendre comment NUMMI est parvenue à développer son efficacité parallèlement à sa flexibilité, (Adler, Goldoftas, & Levine, 1999) ont appuyé leur étude sur des entretiens des différents acteurs entre 1993 et 1994. Le travail a été réalisé à tous les niveaux de l'entreprise, parmi lesquels des ouvriers de production, des ouvriers qualifiés, des chefs d'équipe, des leaders de groupes, des directeurs adjoints, des directeurs et des cadres supérieurs.

Le premier constat a été que NUMMI disposait de nombreuses méta-routines pour guider ses performances et augmenter l'efficacité de ses activités non routinières. Des procédures standardisées pour la résolution de problèmes permettaient de faciliter

l'amélioration continue de la production régulière. L'accumulation d'une documentation sur des expériences de changements a facilité le travail de l'équipe pilote et guidé ses interactions avec les fournisseurs. Une procédure structurée de réflexion et de revue de projets a également permis de faire converger les efforts dans l'entreprise pour améliorer progressivement le pilotage d'un projet.

D'autre part, NUMMI a tiré un bénéfice de l'enrichissement des tâches routinières. En effet, l'amélioration continue était définie comme une responsabilité supplémentaire cruciale des opérateurs de production ainsi que pour tout le personnel de NUMMI. Les suggestions des opérateurs se sont avérées particulièrement importantes dans l'accélération de la production sur le nouveau modèle.

Troisièmement, la politique d'entreprise a encouragé les salariés à alterner facilement entre des tâches de production et des tâches d'amélioration.

Enfin, NUMMI est parvenue à déplacer l'équilibre entre efficacité et flexibilité en créant de nouvelles partitions en son sein, en redistribuant les tâches entre ces partitions, en éliminant les partitions où des dysfonctionnements étaient constatés et en améliorant la coordination et l'intégration entre celles-ci. L'équipe pilote était une unité nouvelle et spécialisée, travaillant aux côtés d'une équipe de conduite du changement. Cette équipe était composée d'ingénieurs qui avaient pour responsabilité de mettre au point le processus de travail au sein du nouveau modèle et de former les travailleurs à leurs nouvelles attributions.

Les méta-routines augmentaient l'efficacité du système pour un niveau de flexibilité donné. Les méta-routines encourageaient le développement de la flexibilité en facilitant l'identification d'anomalies selon les auteurs.

Le mécanisme décrit dans (Adler, Goldoftas, & Levine, 1999) s'applique à toute entreprise qui souhaiterait mettre en œuvre une organisation bureaucratique pour atteindre une efficacité élevée. Cependant, le succès de NUMMI selon les auteurs, dépendait de paramètres du contexte organisationnel étendu ; en particulier la formation, la confiance et le leadership (flexibilité ; bureaucratie ; compromis ; routines ; méta-routines ; ambidextrie ; changement ; partitionnement ; confiance). Des recherches passées ont montré que les quatre mécanismes que sont les méta-routines, l'enrichissement, le changement et le partitionnement sont cependant confrontés à un grand nombre d'obstacles intrinsèques.

Ceci constitue un cas de changement de modèle dans l'industrie automobile. Les résultats suggèrent que les quatre mécanismes de déplacement du compromis ont fonctionné bien plus efficacement chez NUMMI que chez les *Big Three* (General Motors, Ford et Chrysler), en partie parce que ces mécanismes étaient intégrés dans un contexte organisationnel et inter-organisationnel très différent. Comment donc construire un mécanisme adapté, et comment analyser le compromis entre efficacité et flexibilité dans une entreprise située dans un environnement turbulent ? L'étude suivante présente un cas dans un contexte aux évolutions imprévisibles.

3.2. Une étude de cas dans des entreprises d'Etat en Chine.

Le postulat d'un compromis entre efficacité et flexibilité, deux points situés aux extrémités de l'éventail des combinaisons possibles, est une des idées les plus anciennes dans la littérature sur le management (Adler, Goldoftas, & Levine, 1999). Plusieurs définitions différentes de l'efficacité et de la flexibilité ont été proposées (Klein, 1984; Carlsson, 1989; Evans, 1991; Ghemawat & Costa, 1993). (Carlsson, 1989) a identifié trois aspects de la flexibilité : à savoir, la flexibilité opérationnelle, tactique et stratégique. Ceci suggère que la définition de la flexibilité devrait intégrer non seulement des aspects liés à l'utilisation de capacités, mais aussi à leur gestion stratégique (Carlsson, 1989). De même, (Ghemawat & Costa, 1993) ont identifié deux types d'efficacité. L'efficacité statique porte sur le raffinement de produits, de processus ou de capacités existants tandis que l'efficacité dynamique concerne le développement de nouveaux produits, de nouveaux processus, de nouvelles capacités. L'amélioration de l'efficacité peut provenir de l'utilisation de ressources à ce jour inutilisées, ou bien du fait de produire plus de sorties pour le même niveau d'entrées (Leontief, 1951).

<p>L'efficacité se rapporte au degré auquel les ressources de l'entreprise sont actuellement consommées dans la production de produits et de services, tandis que la flexibilité se rapporte au niveau auquel l'entreprise maintient des ressources non encore engagées, pouvant être mobilisées pour absorber, provoquer, ou répondre à des changements de l'environnement (Meilich, 1997).</p>
--

Le compromis flexibilité-efficacité est une décision qui concerne les ressources non engagées afin de déterminer desquelles devrait disposer une entreprise. L'objectif étant de maintenir un équilibre entre les besoins a priori opposés d'efficacité et de flexibilité. Lorsque

les ressources non utilisées sont éliminées, une entreprise abandonne sa flexibilité pour une meilleure efficacité. Lorsque le marché n'est pas parfaitement concurrentiel, alors l'entreprise peut obtenir un facteur clé de succès durable, en accumulant des ressources critiques qui permettent à l'entreprise de produire une valeur économique pour le consommateur de manière plus efficace que ses concurrents (Barney, 1986; Dierickx & Cool, 1989; Finney, Campbell, & Powell, 2005).

D'après notre lecture bibliographique, nous observons que l'adaptation flexible comme l'utilisation efficace des ressources sont critiques dans des environnements turbulents d'une part et que la RBV (*resource-based view*, vue fondée sur des ressources) et la DCA (*dynamic capabilities approach*, approche dynamique fondée sur les capacités) doivent être associées d'autre part, pour examiner le compromis flexibilité-efficacité (Mahoney, 1995). Les entreprises dont la flexibilité est trop sollicitée, dans le sens où elles sont constamment en transition vers un nouvel état, pourront sans doute souffrir des coûts de l'expérimentation sans en tirer de vrais bénéfices (March, 1991). Inversement, les organisations trop spécialisées seront enfermées dans des solutions sous-optimales et surpassées à terme par des entreprises plus innovantes (Schumpeter, 1942).

Il est évident qu'une entreprise ne saurait garder toutes ses ressources non utilisées au nom de la flexibilité. (Daniel, Lohrke, Fornaciari, & Turner, 2004) fait partie des travaux qui ont montré une relation positive entre la possession de possibilités non-exploitées et la performance.

Nous pouvons cependant remarquer que les travaux empiriques existants sur l'équilibre entre efficacité et flexibilité sont largement fondés sur des économies de marché occidentales, sur lesquels des marchés financiers développés permettent de se débarrasser de ressources disponibles en excès (Davis & Stout, 1992; Walsh & Konsnik, 1993).

Dans (Tan & Wang, 2010), les auteurs prennent l'exemple du développement économique de la Chine. Au cours des deux dernières décennies, la Chine a traversé un environnement économique turbulent et est passée d'une économie planifiée à une économie de marché. Pour survivre à cette métamorphose économique, les entreprises d'Etat ont eu à équilibrer les exigences concurrentes d'efficacité et de flexibilité (McGrath, 1997; Boisot & Child, 1999).

La performance a été mesurée en calculant le retour sur investissement des actifs, à partir du profit total et des actifs totaux. L'efficacité globale (*i.e.* l'utilisation globale des ressources) a été mesurée à l'aide d'un indice calculé en utilisant les revenus et le total des immobilisations. L'efficacité de ressources individuelles (*i.e.* utilisation de ressources individuelles) a fourni une mesure fine de l'efficacité pour différentes ressources. Cet indice a permis de comprendre comment des ressources clés spécifiques étaient distribuées, en plus de fournir une mesure globale de l'efficacité.

Il est possible d'identifier quatre mesures de comptabilité, *i.e.* les dépenses sur le marché, les dépenses R&D, le stockage et les réserves comptables, toutes associées à la flexibilité dans le contexte chinois. Plusieurs mesures de contrôle ont été intégrées. L'âge de l'entreprise était mesuré par le nombre d'années depuis la fondation de l'entreprise. La taille de l'entreprise était mesurée séparément par le total des actifs et le nombre total d'employés, sur une échelle logarithmique.

Cette analyse est valable pour toute entreprise qui serait faiblement efficace et qui devrait répondre aux exigences à la fois d'efficacité et de flexibilité dans une période turbulente à l'instar des entreprises d'Etat chinoises. Dans la mesure où la flexibilité et l'efficacité se concurrencent pour utiliser les ressources limitées de l'entreprise, l'auteur soutient l'idée selon laquelle l'entreprise qui viserait les deux objectifs finirait coincée entre les deux (Porter, 1980), ce qui conduirait à réduire son niveau de performance.

Les deux études de cas présentées analysent différentes définitions, conceptions et types de relation entre l'efficacité et la flexibilité. Ainsi, dans la partie suivante, l'analyse quantitative de la flexibilité permettra d'apporter un nouvel éclairage.

3.3. Une approche générique de la mesure de l'efficacité

Certaines définitions abordent la flexibilité de machines comme l'ensemble des opérations que la machine peut réaliser avec un degré d'efficacité positif. A partir de cette définition, (Brill & Mandelbaum, 1989), (Chen & Chung, 1996) et (Wahab, 2005) mesurent la flexibilité d'une machine comme une somme pondérée d'efficacités du fonctionnement de la machine. Par ailleurs, (Das & Nagendra, 1993) suivent une approche semblable, mais mesurent la flexibilité des machines dans un système comme la somme moyenne des efficacités du fonctionnement de la machine. (Sethi & Sethi, 1990) et (Sarker,

Krishnamurthy, & Kuthethur, 1994) identifient deux domaines distincts de la flexibilité de machines :

1) celui fondé sur la capacité de production de l'équipement (Brill & Mandelbaum, 1989; Das & Nagendra, 1993; Chen & Chung, 1996; Wahab, 2005)

2) celui fondé sur les coûts et délais (Chandra & Tombak, 1992; Taymaz, 1989). Les indicateurs utilisés pour ces deux domaines sont : les délais d'installation, les coûts d'installation, les délais de réinstallation, les efficacités individuelles du fonctionnement des machines et le poids accordé à chaque opération.

(Wahab, Wu, & Lee, 2008) présentent dans un premier temps un cadre conceptuel en deux étapes pour développer un modèle de la flexibilité machine. Dans la première étape, un modèle DEA (Data Envelopment Analysis, ou méthode d'enveloppement) utilise le coût d'installation, le temps d'installation, etc. Ce modèle de « superefficacité » (SE) mesure l'efficacité de chaque machine pour traiter chacune des opérations sur une pièce, pondère l'importance de chaque opération et sert de donnée d'entrée pour la seconde étape du modèle. La seconde étape intègre le nombre d'opérations que chaque machine peut réaliser, ainsi que les incertitudes de la demande et l'allocation des pièces aux différentes machines. Enfin, la flexibilité des machines est calculée suivant le modèle SE.

Le modèle DEA est utilisé pour établir un groupe de bonnes pratiques au sein d'un ensemble d'unités observées, ou DMU (*decision-making units*, ou unités décisionnelles) et pour identifier les unités qui ne seraient pas efficaces comparées au groupe référence de bonnes pratiques.

Après avoir calculé le score de superefficacité (SE) pour une DMU, on peut normaliser les scores d'efficacité de sorte que tous les scores se situent entre 0 et 1. Ainsi, l'efficacité se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\bar{e}_{mlk} = \frac{e_{mlk}}{\max_m \max_l \max_k (e_{mlk})}, \text{ où } m \text{ désigne une machine, } l \text{ une opération et } k \text{ une pièce.}$$

On peut alors créer une table des efficacités de chaque machine, dans le traitement des opérations pour chaque pièce en réunissant les tableaux des coûts et délais d'installation, ainsi que les coûts et délais de chaque opération, sur chaque pièce, pour chaque machine.

En sortie de l'étape 1 du modèle DEA du modèle proposé par (Wahab, Wu, & Lee, 2008), nous obtenons le poids respectif de chaque opération et l'efficacité d'une machine pour le traitement d'une opération sur une pièce. Ces sorties servent d'entrées au modèle de la flexibilité proposé par les auteurs. Ce modèle de la flexibilité intègre à la fois le nombre d'opérations que chaque machine peut réaliser avec une efficacité positive ainsi que l'incertitude portant sur la demande et l'attribution des machines aux pièces, pour calculer la flexibilité des machines.

Les auteurs proposent une approche générique de mesure de la flexibilité de machines impliquées dans des systèmes de fabrication. Celle-ci constitue donc un outil dédié à l'évaluation de la flexibilité de machines et permet de classer des systèmes de fabrication en fonction de la flexibilité des machines composant le système.

4. Concevoir la flexibilité

Les systèmes de fabrication flexible (SFF) ont été développés pour répondre aux besoins du secteur industriel confronté aux mutations du marché et devaient permettre à ces systèmes de s'adapter en limitant les dégradations de performances liées aux évolutions de la demande. Cependant, l'implantation des SFF a souvent révélé de nombreuses difficultés dans leur mise en œuvre opérationnelle. D'ailleurs, le taux d'implantation de SFF réalisées à ce jour a été bien inférieur à celui attendu ce qui illustre ces difficultés.

Le développement de SFF s'est appuyée sur la perception d'un besoin dans les industries manufacturières, à répondre aux changements plus rapidement que par le passé (O'Grady, 1987). Les SFF promettaient de nombreux avantages, parmi lesquels une utilisation accrue des machines, un stock d'en-cours réduit, une meilleure productivité des fonds de roulement, un nombre moins important de machines-outils, une réduction des coûts de main-d'œuvre, une réduction des délais de livraison, une qualité plus régulière des produits, une réduction de la surface occupée au sol et une réduction des coûts d'installation (Palframann, 1987; Young & Greene, 1986). En effet, les résultats de l'implantation de SFF montrent selon (Palframann, 1987) des améliorations significatives sur des indicateurs de performance clé. Toutefois, (Young & Greene, 1986) nuancent et mettent en garde contre ces performances apparentes. Ils soulignent que l'installation d'un SFF implique aussi une période difficile

durant l'implantation. Ces éléments sont de nature à expliquer pourquoi la croissance dans l'usage des SFF a été beaucoup plus lente que prévue (Young & Greene, 1986; Owen, 1985).

Cette partie propose une revue des approches qui peuvent être utilisées pour concevoir un SFF. Les domaines abordés concernent la conception de SFF liés aux installations de systèmes de manutention de matériaux, de systèmes de contrôle, de planification ainsi que dans le domaine spécifique des systèmes d'assemblage. Dans chaque cas, nous exposons les problématiques majeures de recherche et de développement. En examinant les outils et les approches utilisés pour concevoir la flexibilité au sein des différents systèmes, il ressort qu'il n'existe aujourd'hui aucune méthodologie globale et intégrée pour les SFF.

4.1. Une revue des approches de la conception

(Spano, O'Grady, & Robert, 1993) passent en revue les approches pouvant être utilisées pour concevoir un SFF. Les auteurs proposent une revue du travail réalisé dans la conception de SFF dans le champ de la conception d'installations de systèmes de manipulation de matériaux, de systèmes de contrôle et de planification (Figure 17).

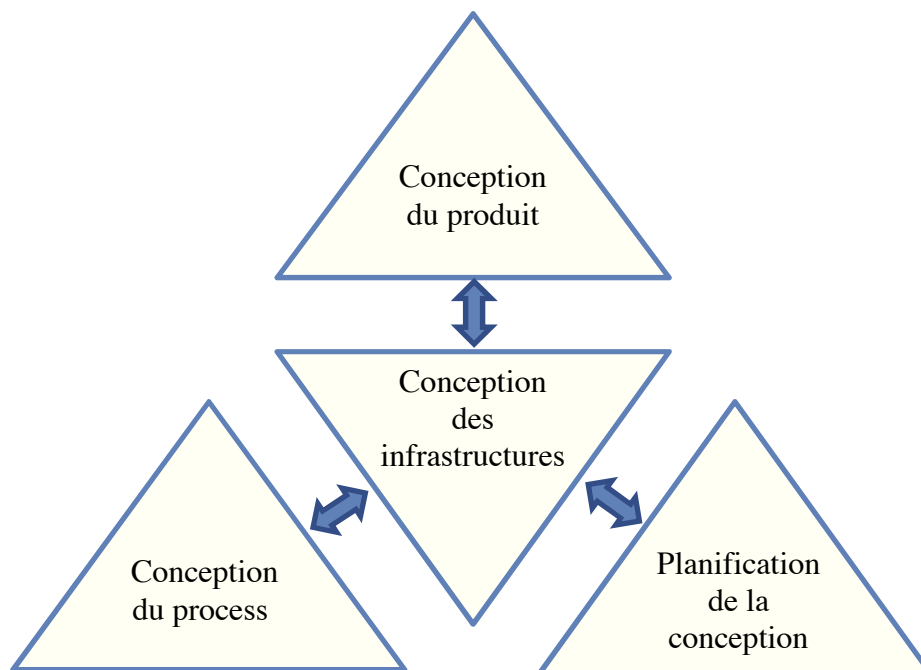


Figure 17 : Liens avec la conception d'infrastructures.

La conception d'infrastructures a été définie comme « le fait de déterminer comment les composantes d'une activité apportent un soutien dans la réalisation des objectifs de cette activité » (Tompkins & White, 1984). Toutefois, dans la pratique, le problème de la conception d'infrastructures correspond à une famille de problèmes de conception dont les objectifs, le spectre et les approches de résolution diffèrent entre eux. La conception d'infrastructures a un impact financier majeur sur une entreprise en raison de l'importance des investissements engagés par l'implantation d'un SFF. Il existe une grande variété d'approches manuelles et de modèles informatiques pour aider à la conception d'infrastructures. Ces derniers visent à concilier des divergences de points de vue à travers des listes d'alternatives restreintes. La conception d'infrastructures dans un SFF est un problème complexe, qui implique de réconcilier plusieurs objectifs et autant de contraintes, souvent contradictoires les uns par rapport aux autres.

Une composante clé, pour tout SFF, est le système de manutention lié aux flux physiques. La conception de ces systèmes de gestion peut être définie comme la sélection et la configuration de dispositifs pour transporter et entreposer des matériaux au sein d'une unité de production.

Les systèmes de contrôle du SFF ont une place importante à travers ces travaux. La hiérarchie proposée comporte quatre niveaux : celui de l'usine, du magasin, de la cellule et de l'équipement. Ce travail fournit des réponses à la question suivante : « *Quel est le niveau de contrôle qu'il est souhaitable de placer au niveau d'une cellule et quelle est l'architecture interne souhaitable d'un système de contrôle des cellules ?* » (Spano, O'Grady, & Robert, 1993)

La littérature classe généralement les types de processus de fabrication en trois catégories principales : « *flow shop* », « *job shop* » et « *batch manufacture* ». Quelle que soit la catégorie considérée, un point caractérise presque toutes les entreprises de fabrication : celui de la complexité associée à la planification et au contrôle. Comme nous l'avons indiqué, afin de réduire cette complexité, la plupart des recherches l'organisent sous la forme d'un cadre hiérarchique. Les modèles hiérarchiques peuvent être segmentés en deux grands groupes. Le premier groupe décompose les problèmes de planification de la production au niveau des tâches. Le second groupe structure cette décomposition autour des frontières physiques. De nombreux travaux ont été réalisés sur la planification et le contrôle de systèmes de fabrication. Comme dans le cas de la conception d'infrastructures, on peut les diviser en

deux, selon qu'ils s'appuient sur des approches traditionnelles ou sur celles de l'IA (Intelligence Artificielle), (Spano, O'Grady, & Robert, 1993).

Le processus d'assemblage est une partie essentielle du processus de fabrication dans son ensemble car il fait généralement partie des dernières opérations de la gamme de fabrication et à ce titre, la valeur de l'encours est plus importante. Afin de concevoir des systèmes d'assemblage évolutifs par rapport à la demande, il est important d'intégrer la notion de flexibilité dès la conception de ces installations. Après avoir présenté une vue d'ensemble des approches de conception, nous nous intéressons donc plus particulièrement à l'intégration de la flexibilité dans la conception d'un système d'assemblage.

4.2. Concevoir un système d'assemblage flexible

Le processus d'assemblage est une partie essentielle du processus de fabrication et correspond souvent à la dernière ou l'une des dernières étapes du processus de fabrication. La valeur du produit à ce stade de fabrication est donc élevée.

Pour développer une méthode dédiée à la conception de systèmes d'assemblage, il est important non seulement de faire usage des capacités analytiques des concepteurs, mais également d'accompagner leur créativité. Andreasen stipule que la méthode des checklists est une méthode utile pour générer des idées, ou pour la créativité, principalement en conception de produits (Andreasen, 1984). Cette approche systématique indiquera quelles activités mettre en œuvre, ainsi que l'ordre relatif de réalisation de ces activités.

Afin de structurer le processus de conception, une méthode comportant treize étapes a été développée par cet auteur (Figure 18).

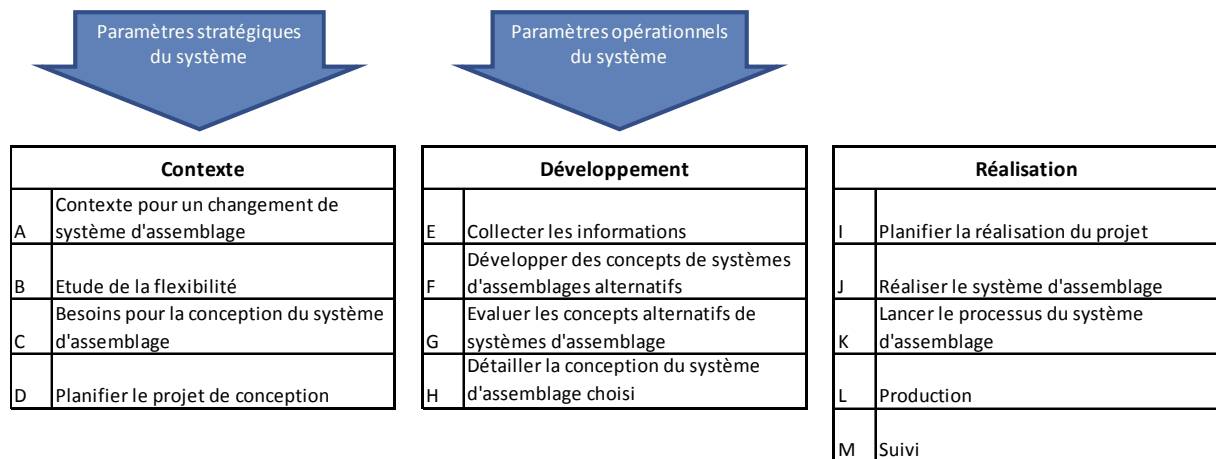


Figure 18 : Processus de conception

Les lettres indiquent les différentes étapes notées de A à M. Les trois premières étapes (A-C) concernent la collecte d'informations de fond et les décisions stratégiques. L'étape D est liée à une activité de gestion, où les quatre étapes suivantes (E à H) devront être planifiées. Ces étapes concernent le développement et l'évaluation du système d'assemblage. C'est ici qu'est réalisée la partie principale du travail de conception. L'étape I est une autre étape de planification, où les quatre étapes de réalisation sont planifiées. Les trois dernières étapes de la méthode, J à M, portent sur la performance physique avérée du système d'assemblage choisi.

La méthode prend fin lorsque la production et le suivi du projet de conception et du système d'assemblage ont été réalisés.

La méthode présentée s'appuie sur un modèle inspiré notamment par la technique IDEFO. La structure IDEFO permet de présenter la méthode à l'utilisateur potentiel mais n'est pas utilisée dans l'objectif de décrire un système d'assemblage. La Figure 19 présente IDEF.

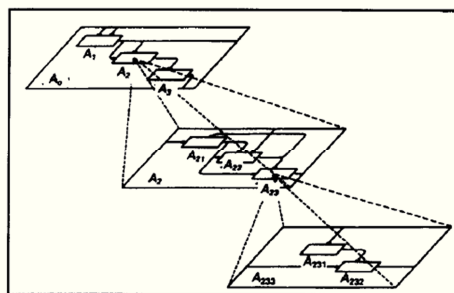


Figure 19 : Les niveaux de fonction IDEF

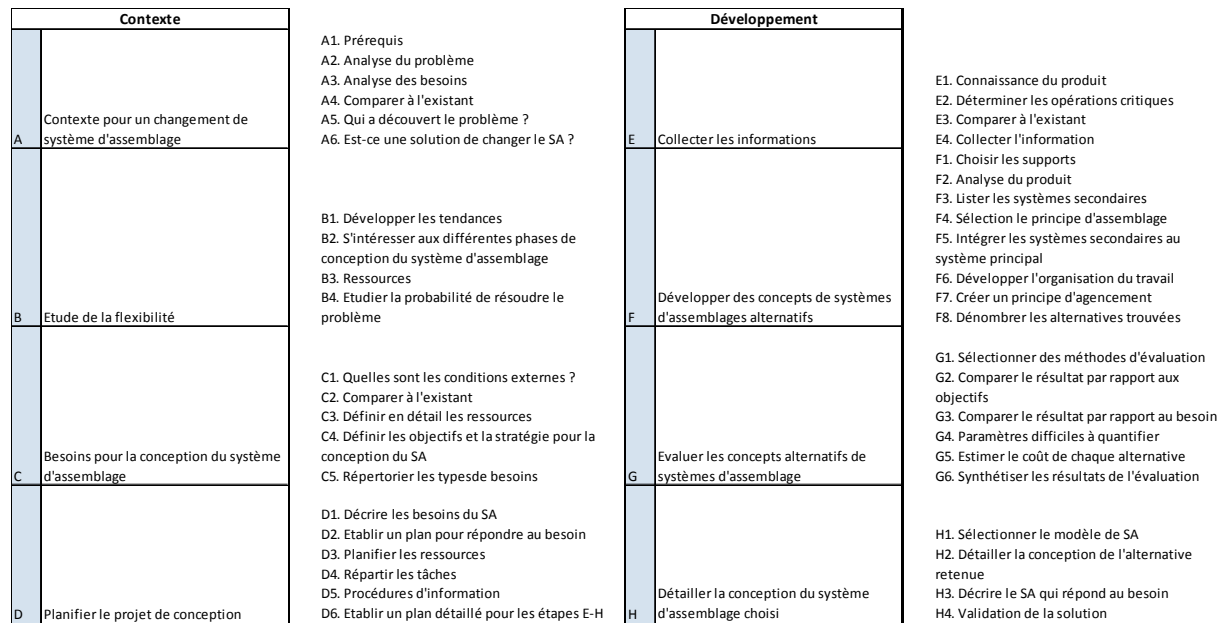


Figure 20 : Décomposition des étapes pour un système d'assemblage

Chaque étape (de A à M) de la méthode (Figure 20) peut être représentée par un bloc de niveau supérieur, pouvant être décomposé en blocs plus détaillés dans les niveaux inférieurs de la hiérarchie. L'avantage de cette description est qu'elle peut être modifiée et étendue à tout niveau de détail.

L'objectif principal de la conception du système d'assemblage est la rentabilité. Une conception rapide du système réduira les délais associés à la mise sur le marché du produit, ce qui générera une augmentation des prises de part de marché. De courts délais de conception pourront aussi réduire les coûts du système d'assemblage. Un autre aspect permettant de mesurer la performance du résultat du processus de conception du système d'assemblage est le niveau de qualité obtenu par le système lorsque celui-ci satisfait toutes les contraintes fixées par ailleurs.

Dans un système de fabrication complexe par exemple, les actifs d'une infrastructure étendue telle qu'un terminal d'aéroport, une centrale électrique, une ligne ferroviaire à grande vitesse ou encore la construction d'une usine, sont livrés au travers de projets uniques, sur des périodes de temps moyennes voire longues, impliquant des dépenses conséquentes en termes de capital et la contribution intensive de compétences. La relation symbiotique entre le développeur, qui encourt les coûts en capital et le client, qui fera usage des actifs, est centrale dans ce type de projets. Dans la mesure où les besoins du client évoluent avec le temps, celui-

ci attendra implicitement une flexibilité du processus lui-même, pour pouvoir retarder des décisions de conception et demander des évolutions tardives.

Ainsi, cette tension entre efficience et flexibilité est une caractéristique clé de projets reposant sur des infrastructures étendues et plus généralement de grands projets d'ingénierie. La littérature de gestion des risques appliquée aux grands projets a identifié cette problématique. De nombreux auteurs soulignent que le fait d'adapter un projet aux évolutions des besoins du client peut s'avérer déterminant dans le succès d'une affaire (Dvir & Lechler, 2004; Gil, Tommelein, & Schruben, 2006; Miller & Lessard, 2000). Ainsi, dans la partie suivante, nous aborderons les relations entre flexibilité de la conception et management des risques.

4.3. Flexibilité de la conception et management des risques

Dans (Gil & Tether, 2010), les auteurs ont exploré la manière dont le management des risques et la flexibilité de la conception interagissent dans les projets d'infrastructure de grande ampleur, en utilisant comme exemple le projet à 4,5 milliards de livres sterling du « Terminal 5 » (T5), visant à agrandir l'aéroport de Heathrow à Londres. En juxtaposant ces deux cadres théoriques, les auteurs ont mis à jour les conditions sous lesquelles ils peuvent être complémentaires pour aborder la problématique liant efficience et efficacité qui est centrale dans les projets de ce type. La mise en œuvre de la flexibilité dans la conception, au travers d'architectures intégrées ou modulaires, permet d'augmenter l'adaptabilité de sorte à préserver l'efficacité du système.

Des travaux dans le domaine du management des risques mettent en exergue l'importance d'activités prescriptives, parmi lesquelles la définition du spectre et des tâches du projet, l'identification des risques, de leur probabilité d'occurrence, de leurs effets potentiels afin d'établir des plans d'actions et des budgets intégrant ces contraintes (Cleland & King, 1983; Cooper & Chapman, 1987). Des chercheurs se sont aussi prononcés en faveur d'une combinaison d'activités prescriptives avec d'autres activités, telles que la planification de scénarii, le raisonnement par options, le dialogue avec les usagers finaux et les communautés, mais également le développement d'échanges sur l'environnement politique et économique avec les acteurs clés du projet (Morris & Hough, 1987; Morris, 1994; Miller & Lessard, 2000). Le raisonnement stratégique en entrée vise à réduire la survenue de « surprises stratégiques » (Floriciel & Miller, 2011) et de « changements d'objectifs » (Dvir &

Lechler, 2004), mais il ne saurait éliminer toute l'incertitude sur les besoins de la conception au cours du cycle de vie d'un projet.

L'étude de (Gil & Tether, 2010) s'appuie sur une comparaison de cas. Ceci a permis de développer, de tester et de consolider les concepts théoriques (Yin, 1984; Eisenhardt, 1989). L'étude inductive de (Yin, 1984) propose des unités d'analyse qui chevauchent des cas multiples. Le management innovant du projet T5 fournit un contexte riche pour l'étude en permettant d'atteindre un équilibre entre une flexibilité limitée de la conception et un management des risques.

Le projet a établi une structure de gouvernance (Figure 21) composée d'une direction des projets supervisant toutes les sous-directions des projets. La direction des projets se réunissait une fois par mois, comprenait les principaux clients et rendait des comptes à un comité exécutif du T5. Cette structure se comportait comme une « organisation en parapluie » (Shenhar & Dvir, 1996) : elle délégait l'autorité et les responsabilités de manière à accompagner la prise de décisions et le management des risques.

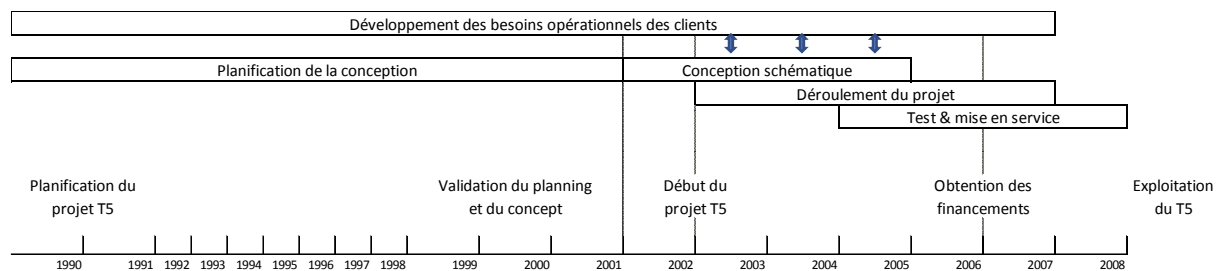


Figure 21 : Pilotage du projet T5

La principale conclusion de cette étude souligne que la flexibilité de la conception et le management des risques ont des rôles complémentaires dans la gestion de projets. Par ailleurs, les auteurs rappellent que la qualité de la relation entre le développeur et le client conditionne l'équilibre de ces deux approches.

Cette théorie s'applique aux cadres théoriques de la gestion des risques et de la flexibilité de la conception. Que la performance soit liée à l'atteinte d'objectifs spécifiques dans des délais et dans un budget impartis ou qu'elle soit liée au respect des exigences du client, la flexibilité est un concept central à la fois dans la gestion de projets de grande ampleur mais également au cours du développement de produits nouveaux. Toutefois, dans

ces deux domaines, deux cadres sensiblement différents ont été développés pour gérer le processus de conception : celui du management des risques et celui de la flexibilité de la conception. D'autre part, la modularité du produit n'est ni gratuite, ni facile à réaliser (Baldwin & Clark, 2000; Whitney, 2004). En l'absence de modularité, on peut toutefois intégrer une flexibilité limitée sous la forme de sauvegardes. Ces marges réservées lors la conception visent à limiter voire à supprimer les effets d'entraînement de changements prévisibles sur un élément. Sans ces mécanismes, le phénomène se propagerait sur d'autres éléments en relation d'interdépendance.

5. Les limites dans l'application industrielle

Le concept de flexibilité a une importance stratégique pour de nombreuses organisations, qui doivent survivre dans des marchés fortement concurrentiels et dynamiques. L'état de l'art présenté dans ce chapitre s'est intéressé aux systèmes de production flexibles. Nous avons d'abord replacé le développement de ce concept dans son contexte historique qui a accompagné l'évolution de l'économie concurrentielle moderne. Les acteurs du marché s'attachent à suivre au plus près la demande ce qui induit la nécessité d'une fabrication flexible. Notre étude s'est attachée à décrire la complexité du concept de flexibilité, ses modèles, ses structures, les concepts qui sous-tendent son évaluation, afin de faciliter la compréhension du rôle de la flexibilité et de ses applications. A nouveau, nous avons souligné le fait que les méthodes de fabrication flexible constituent une clé de succès dans le cadre de la compétitivité économique.

Ensuite, nous avons présenté les relations qui existent entre efficacité et flexibilité, ainsi que les méthodes pour concevoir des systèmes de fabrication flexibles. Nous avons ainsi décrit le rapport entre efficacité et flexibilité qui peut non seulement guider la conception et l'évaluation de la flexibilité, mais aussi guider les entreprises dans leurs prises de décision.

Cependant, en raison de la diversité et de la variété des systèmes de fabrication flexible, on soulignera que de nombreuses méthodes de mesure, d'analyse et de conception ne peuvent être étendues à une application générale. La présentation de chaque méthode s'est appuyée sur les travaux issus de la littérature qui offrent pour la plupart des données expérimentales, en particulier à un ou à quelques cas concrets dans le secteur industriel. Nous soulignons cependant que dans une situation d'analyse quantitative, la difficulté ou encore l'incapacité à recueillir les données nécessaires au modèle réduit son application en pratique.

C'est ainsi que nous avons abordé la flexibilité, dans la littérature, comme outil d'analyse, présentant des limites en termes d'applications industrielles. La littérature peut s'avérer utile pour éclairer un travail ou un projet avec pour objectif de créer un SFF suivant une politique de moindre coût. Ce type de politique permet des performances supérieures à une politique fondée sur la maximisation de la productivité. En effet, la réduction des coûts permet une meilleure exploitation de la flexibilité du système.

Comme nous avons pu le voir précédemment, la littérature dédiée au concept de la flexibilité est abondante et de nombreux auteurs se sont attachés à décrire ses caractéristiques et les notions qui lui sont liées. (Hamblin, 2002) définit différentes flexibilités et les classifie en neuf axes selon leur importance (ressources, main d'œuvre, délai, ...). Il établit des liens avec les notions de délai, de qualité et de coûts. Pour (Abele, Liebeck, & Wörn, 2006), il faut contraindre le choix de flexibilité par les coûts engendrés. Ces auteurs montrent alors la nécessité de mesurer la ou les flexibilité(s) et propose le concept de 'Real Option Analysis' permettant d'évaluer les coûts de décisions d'investissement. De même, (Parker & Wirth, 1998) proposent plusieurs méthodes de mesures selon la flexibilité concernée. Ils démontrent, en outre, l'existence de liens entre différentes flexibilités notamment celles des ressources et des processus. Une méthode (en utilisant un modèle stochastique) qui lie la flexibilité à la demande incertaine et à la marge est développée par (Van Mieghem, 1998). Celui-ci étudie l'impact de la flexibilité des ressources sur les coûts. Pour finir, (Beskese, Kahraman, & Irani, 2004), après avoir cherché à classifier et à quantifier les différentes flexibilités, détaillent la méthode d'analyse Floue qui s'appuie sur des critères économiques pour évaluer la flexibilité.

Il n'apparaît donc pas une définition unique de la flexibilité et le lien avec les coûts n'est pas systématiquement établi. Quant à la mesure de la flexibilité, elle est souvent considérée comme une nécessité, bien que difficile à définir. Cette diversité des méthodes face à la singularisation des applications rend particulièrement complexe la gestion de la flexibilité par les managers dans le secteur industriel. Ce concept pourtant largement étudié reste complexe à appréhender et nécessite une unité de gestion commune afin de proposer des méthodologies à vocation générale. Le cadre conceptuel proposé dans le chapitre suivant introduit le concept de « *potentialités* » comme dénominateur commun aux différents types de flexibilité avant de proposer une méthodologie permettant d'introduire la prise en compte de la flexibilité en amont du processus de décision.

CHAPITRE III. Cadre conceptuel et méthodologique pour concevoir un système à flexibilité souhaitée

Ce chapitre a pour objet d'exposer le cadre conceptuel structurant notre démarche pour atteindre une flexibilité souhaitée puis de définir une méthodologie basée sur celui-ci afin de concevoir un système à flexibilité souhaitée.

Dans une première partie nous caractériserons la flexibilité d'un système en explicitant le cheminement pour rendre flexible un système non-flexible.

Ensuite, dans une seconde partie, nous modéliserons le système en distinguant ses deux composantes principales à savoir sa partie opérante et sa partie décisionnelle.

Les parties 3 et 4 s'intéressent respectivement à chacune de ces parties pour expliciter leur rôle dans l'obtention d'un système flexible.

Nous consacrerons la 5^e partie à l'articulation de ce système avec son environnement en nous intéressant particulièrement à la synchronisation du flux d'information utile pour celui-ci et son processus de décision propre.

Enfin, nous exposerons dans la 6^e et dernière partie la méthodologie proposée pour concevoir un système à flexibilité souhaitée.

1.	DE LA NON-FLEXIBILITE A LA FLEXIBILITE.....	77
1.1.	L'ESPACE DES ETATS ATTEIGNABLES	77
1.2.	LA FINALITE DU SYSTEME	78
1.3.	UN SYSTEME FLEXIBLE EST UN SYSTEME OUVERT SUR SON ENVIRONNEMENT ...	79
1.4.	LES 4 CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES D'UN SYSTEME FLEXIBLE.....	79
2.	MODELISATION DU SYSTEME	80
2.1.	ESPACE DES ETATS ATTEIGNABLES DU SYSTEME ET ESPACE DE SOLUTIONS	80
2.2.	DECOMPOSITION THEORIQUE DU SYSTEME	82
3.	LA PARTIE OPERANTE : L'ESPACE DES POTENTIALITES	84
3.1.	LE DEGRE D'ACCESSIBILITE DES ETATS ATTEIGNABLES	84
3.2.	L'ESPACE DE FLEXIBILITE	85
4.	LA PARTIE DECISIONNELLE : LES VARIABLES DE DECISION.....	86
4.1.	LA MISE EN ŒUVRE DES POTENTIALITES	86
4.2.	LE PROCESSUS DE DECISION VU COMME UN PROCESSUS D'INTEGRATION DES ALEAS PAR LE SYSTEME	87
5.	SYNCHRONISATION DU PROCESSUS DE DECISION AVEC LE FLUX D'INFORMATION.....	88
5.1.	CARTOGRAPHIE DES POTENTIALITES.....	89
5.2.	COMPARAISON DES DELAIS	89
6.	LA METHODOLOGIE PROPOSEE POUR CONCEVOIR UN SYSTEME A FLEXIBILITE SOUHAITEE	90

1. De la Non-Flexibilité à la Flexibilité

Face à la multiplicité des approches et à la taxonomie complexe du domaine propre au concept de flexibilité, l'exercice intellectuel consistant à se représenter un système totalement dépourvu de cette caractéristique apporte un éclairage par contraste sur les composantes essentielles et communes à ce concept. Ainsi, le recours à la non-flexibilité comme objet théorique et outil d'étude permet de mieux appréhender les conditions nécessaires à l'obtention d'une flexibilité adaptée au besoin propre d'un système.

Pour aborder cette analyse, nous commencerons par définir un système élémentaire composé d'un corps inerte comme un cube par exemple. Ensuite, nous nous interrogerons sur les différents composants faisant défaut à ce système pour le qualifier de flexible.

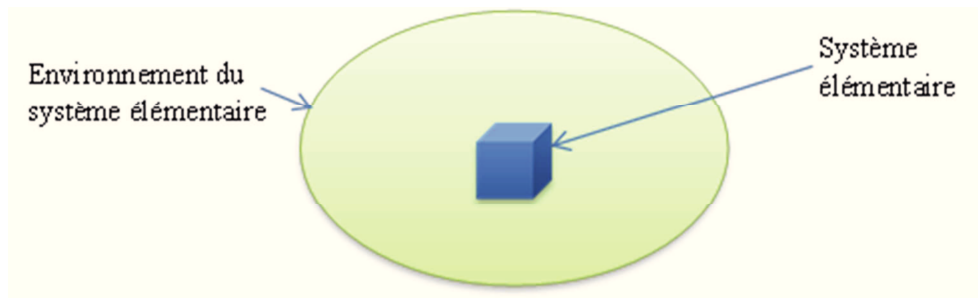


Figure 22 : Un système élémentaire

Tout d'abord, les nombreuses définitions du concept de flexibilité font systématiquement référence à des possibilités d'évolution du système. A ce stade, ce cube ne présente aucun autre état atteignable que son propre état initial.

1.1. L'espace des états atteignables

Dans une première étape, nous dotons ce système d'une capacité à se déplacer de manière rectiligne et en sens unique. Le cube peut désormais se présenter sous deux états distincts, à savoir, immobile ou bien en déplacement et peut dès lors accéder à un ensemble élargi de positions sur un plan comme représenté ci-après :

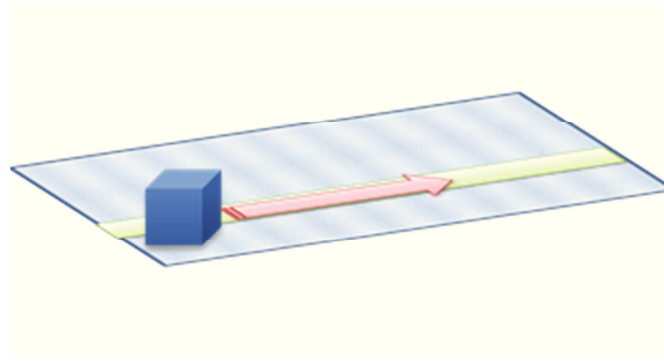


Figure 23 : Espace des états atteignables d'un système

L'ensemble des états atteignables peut ainsi être décrit par l'espace des 2-uplets $(a ; b)$ avec a comme variable décrivant l'état du système et $a \in \{ \text{« en marche »} ; \text{« à l'arrêt »} \}$ d'une part et b la variable décrivant sa position dans l'espace par rapport à la position initiale du système selon une distance avec $b \in [0 ; \infty [$ d'autre part.

Pourtant, l'accroissement de ses possibilités n'en fait toujours pas un système flexible. En effet, la flexibilité n'est qu'un moyen pour permettre au système d'atteindre un objectif qui lui est fixé. En l'absence d'objectif nous ne pouvons parler que de possibilités du système ou encore d'états atteignables.

1.2. La finalité du système

Dans une seconde étape, nous fixons donc comme objectif au système de se déplacer d'un point A à un point B situés à une distance fixe, égale à la distance de parcours paramétrée du système comme montré ci-dessous :

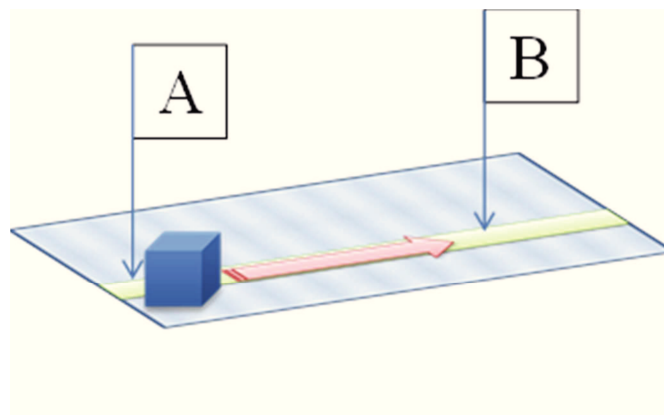


Figure 24 : L'objectif assigné au système comme référence

Dans cette configuration, le moindre aléa, que ce soit un obstacle sur le parcours, une imprécision sur la distance ou encore une panne du système lui-même, écartera inévitablement ce dernier de son objectif. Cette vulnérabilité du système face aux événements extérieurs résulte de l'absence de fonction de collecte d'information, sur l'état de son environnement comme sur son propre état, mais également de leviers d'action pour réagir en conséquence. Ces éléments font du cube un système fermé. Or, la flexibilité requiert une synchronisation du flux d'information avec un processus de décision pour faire face aux aléas éventuels.

1.3. Un système flexible est un système ouvert sur son environnement

Dans une troisième et dernière étape, nous dotons donc le cube d'un capteur pour repérer le point B et d'une variable de décision qui peut prendre la valeur « marche » ou « arrêt » en fonction de la position du système par rapport à son objectif. En choisissant de doter le système d'une variable de décision au lieu de programmer une distance fixe lors de sa conception, le concepteur retarde ainsi une partie de sa décision en déléguant ce choix au système lui-même afin de synchroniser le processus de décision avec le flux d'information à venir.

L'objectif étant d'atteindre le point B, le système ainsi défini est flexible par rapport à la distance de parcours. Cependant, il est important de noter que si toutes les possibilités offertes par un système peuvent être employées comme des variables de décision pour atteindre un objectif, il n'est pas possible en revanche de décrire l'espace des possibilités du système opérant à partir de la combinaison de ses variables de décision. En effet, ces variables de décision sont une composante du cadre de décision comme décrit dans le modèle GRAI et sont dépendantes de l'objectif visé.

1.4. Les 4 caractéristiques essentielles d'un système flexible

Pour conclure, au caractère flexible d'un système précède nécessairement l'existence d'une palette de possibilités offerte par celui-ci. Cependant, cette condition n'est pas suffisante. Il faut également que ces possibilités soient exploitables et exploitées par le biais de variables de décision pour atteindre un objectif. Ceci signifie que le concept de flexibilité fait nécessairement référence à une certaine finalité. On peut donc imaginer que les évolutions

successives que nous avons effectuées sur notre système initial (le cube) aient été provoquées par la connaissance de l'objectif final et pour lequel les variables de décision nécessaires auraient été définies. Ainsi formalisé, ce processus s'apparente donc à celui de la conception d'un système flexible.

Nous pouvons ainsi résumer les 4 caractéristiques essentielles d'un système flexible et qui doivent par conséquent être traitées lors de la conception d'un système à flexibilité souhaitée :

1	Disposer d'un espace d'états atteignables
2	Être doté d'un objectif
3	Interagir avec son environnement
4	Disposer de leviers d'actions pour changer d'état

Tableau 15 : Les 4 caractéristiques essentielles d'un système flexible

2. Modélisation du système

2.1. Espace des états atteignables du système et espace de solutions

Quel que soit son domaine d'application ou encore quelle que soit la composante du système étudié, la flexibilité fait toujours référence à la capacité d'un système à quitter son état initial pour se déplacer vers un état atteignable voisin. Cette capacité à se déplacer requiert deux conditions nécessaires et suffisantes : La première concerne l'existence de l'état visé dans le champ des états atteignables propre au système. La seconde s'intéresse quant à elle à la capacité du système de pilotage à initier le changement de configuration et gérer la transition. En d'autres termes, le système étudié doit être doté d'un système de pilotage en phase avec le flux d'information et muni des leviers d'action idoines. Cette deuxième condition fait donc référence implicitement à un processus qui s'apparente à celui d'une prise de décision soumise, de ce fait, à un objectif.

Malgré l'utilisation fréquente des variables de décision pour décrire, à travers leur combinaison, l'espace des états atteignables d'un système, ces deux espaces ne sont pas confondus. En effet, dans le cadre de décision, tel qu'il est défini dans le modèle GRAI, le choix des variables de décision dépend de l'objectif assigné au système. D'ailleurs, en cas de non satisfaction de l'objectif suite au déroulement du processus de décision, le cadre de

décision peut être remis en cause et avec lui le jeu des variables disponibles. Ce mode de description rend contingente la représentation du système. Ainsi, le jeu des variables de décision du cadre de décision peut être vu comme une modélisation de la partie utilisée et/ou utile de l'espace des états atteignables du système opérant. Cependant, cette image n'est qu'une approximation des capacités d'évolution réelles du système.

Pour s'approcher de façon asymptotique de la description de l'espace des états atteignables du système à travers la combinaison des variables de décision, il faudrait réunir les espaces décrits par les combinaisons de variables associées aux différents objectifs assignables au système. Reprenons l'exemple du cube, objet inerte, cité dans la partie précédente pour illustrer ce propos et essayons dans un premier temps d'appréhender l'espace de ses états atteignables à l'aide de l'objectif que nous lui avons assigné, à savoir, de se déplacer jusqu'au point « B ».

Pour atteindre cet objectif, il faut se munir de variables de décision concernant des modifications de cet objet. Ces variables vont donc couvrir la palette des différents moyens de déplacement, des différents capteurs pour la fonction d'asservissement, dans le cas où le concepteur souhaite déléguer la prise de décision sur la distance de parcours en fonction de la position variable du point B, mais également le temps de parcours. Ces variables décrivent donc un espace dans lequel, à partir de l'état initial du cube, celui-ci peut atteindre des états qui se différencient au niveau de la composition du système et par rapport à sa position dans un plan. Nous pourrions ensuite imaginer comme nouvel objectif d'insérer cet objet dans une structure préexistante. Le jeu des variables de décision serait alors composé d'un ensemble d'actions possibles sur les formes et procédés d'usinage à appliquer au cube. L'espace des états atteignables s'étendrait donc aux différentes morphologies de ce système.

Après des modifications aussi profondes, pouvons-nous toujours parler du même système et pouvons-nous véritablement parler d'états atteignables à partir de l'état initial de celui-ci ? L'évolution de proche en proche ne modifie pas la définition du système même si sa nature peut être amenée à changer. Pour parler de nouveau système, il faudrait établir une typologie des variables de décision en fonction de leur impact sur l'intégrité du système. Or, un atelier de fabrication qui aurait son effectif pour variable de décision ne serait pas considéré comme un nouveau système à chaque nouvelle valeur prise. Pour autant, la structure de son espace des états atteignables pourra être impactée en introduisant une notion de distance au sein de cet espace.

Ainsi, ces deux espaces sont distincts par la nature des objets qu'ils décrivent. Le premier s'attache à décrire un ensemble de solutions atteignables pour répondre à un besoin qui est lui-même exprimé à travers un objectif. Dans le cadre du modèle GRAI, (Marcotte, 1995) définit l'espace de décision comme l'espace décrit par les variables de décision et limité par les contraintes. Le second est dépourvu de finalité et décrit simplement tous les états atteignables pour un système et ses possibilités d'évolution. A travers l'exemple ci-dessus, nous nous apercevons que le champ des possibles pour un système est infini. Cependant, ces deux espaces ne sont pas indépendants et il est intéressant de souligner que tout état atteignable peut constituer une solution à la lumière d'un objectif particulier. A l'inverse, toute combinaison de variables de décision n'a pas forcément d'équivalent dans l'espace des états atteignables du système. En effet, cette combinaison de variables décrit à la fois la solution mais également le moyen d'y parvenir. Or, ce dernier est propre à chaque système.

2.2. Décomposition théorique du système

Dans la perspective de concevoir un système à flexibilité souhaitée, nous nous appuyerons sur la distinction des deux espaces décrits dans le paragraphe précédent pour modéliser le système en deux parties. La notion de finalité présente dans tout système ayant vocation à devenir flexible et la poursuite d'un objectif assumé à travers un organe de décision sont deux éléments qui nous feront souligner le rôle du pilotage du système en le séparant du système piloté.

Cette distinction nous permettra à la fois de comparer les caractéristiques de leur espace propre et par la suite de bâtir un référentiel dans le but de concevoir un système à flexibilité souhaitée. En effet, la séparation théorique de ces deux objets qui sont souvent confondus en pratique servira d'outil pour apprécier l'adéquation ou mesurer les écarts éventuels entre les caractéristiques du système piloté et le besoin exprimé par le système de pilotage.

La notion de flexibilité sous-entend implicitement pour le système opérant d'offrir une palette de possibilités mais également que cette palette réponde au besoin. La condition d'avoir de nombreuses possibilités n'est donc pas suffisante. Pour distinguer ces deux aspects et poser les bases d'une gestion de la flexibilité, nous proposons le cadre théorique suivant qui permet d'étudier ces conditions séparément en comparant le besoin avec les capacités du

système. Nous distinguons donc la partie décisionnelle, qui représente le besoin, de la partie opérante, qui modélise les possibilités du système.

SYSTEME FLEXIBLE	
Composantes du système	Espaces associés
Partie Décisionnelle	Espace des solutions
Partie Opérante	Espace des états atteignables

Tableau 16 : Décomposition d'un système flexible

Pour que le système puisse être qualifié de flexible, il est nécessaire que la période du processus de décision soit synchronisée avec le flux d'information et que les espaces propres aux deux parties soient reliés par l'existence d'une fonction surjective de l'espace des états atteignables dans l'espace des solutions. L'espace des solutions étant sujette aux variations du cadre de décision en fonction de l'objectif assigné comme de la périodicité du processus de décision, l'existence de cette fonction n'est pas assurée à chaque instant. S'assurer de l'existence d'une telle fonction et l'obtenir si nécessaire constitue un des éléments essentiels de l'activité de conception d'un système à flexibilité souhaitée.

Cette modélisation souligne l'importance à accorder en pratique au choix de la matérialisation et éventuellement de la répartition des rôles pour la partie décisionnelle que ce soit en fonction des niveaux de responsabilité ou encore en fonction de la périodicité des différentes prises de décision liées au système. En effet, cette partie assume un rôle majeur dans la mise en œuvre de la flexibilité et doit être intégrée dès la phase de conception du système.

Enfin, cette approche fonctionnelle de la flexibilité est compatible avec la taxonomie existante relative à ce concept, en ce sens qu'elle peut s'appliquer aux différents types de flexibilité. En proposant ce modèle unique, nous aspirons cependant à une plus grande intégration des différentes dimensions de ce concept à travers une formalisation homogène des problèmes traités.

3. La partie opérante : L'espace des potentialités

3.1. Le degré d'accessibilité des états atteignables

Pour qu'un système soit en mesure d'apporter une réponse en conformité avec l'objectif qui lui a été assigné, il faut dans un premier temps que l'espace des états atteignables de sa partie opérante contienne au moins un état susceptible d'apporter la réponse attendue. Or, exprimée ainsi, cette condition n'apparaît pas restrictive ou encore bloquante compte tenu de la définition précédente de cet espace dont le champ des possibles est infini. Ce qui peut en revanche faire qualifier le système d'inapte est bien une certaine notion d'éloignement de cet état par rapport à l'état initial et actuel du système considéré.

Pour apporter un éclairage théorique et servir dans une méthodologie de conception d'un système à flexibilité souhaitée, cet espace doit donc être muni d'une notion de distance. Nous désignerons alors ce nouvel espace comme l'espace des potentialités d'un système (Lelièvre, Durieux, Génin, & Lamouri, 2009). Cet espace sera donc constitué des couples $(E_i ; C_j)$ avec i et j appartenant à N (entiers naturels) avec E_i un état atteignable associé au coût C_i de déplacement depuis l'état initial à l'instant t vers ce nouvel état. Ce coût synthétique C_j peut être décomposé de la manière suivante entre le coût marginal pour accéder à ce nouvel état, une estimation des coûts induits et enfin être pondéré par le temps nécessaire pour effectuer la transition. Ainsi : $C_j = C_{\text{marginal}} + C_{\text{induit}} + C_{\text{délai}}$.

Ce coût dépend naturellement du moyen choisi pour atteindre l'état E_i . Cependant, le choix de ce moyen relève d'un processus de décision qui n'est pas propre au système opérant. Par souci de commodité, il est fréquent d'utiliser le cadre de décision de la partie décisionnelle pour estimer le coût des états qui ont une image dans l'espace des solutions. Cependant, cette approche n'est pas suffisante et limite la portée de l'analyse de l'espace des potentialités en l'assimilant à celui des solutions. En pratique, il est évidemment impossible d'estimer un coût pour chacun des états. Il est en revanche souhaitable de sélectionner un échantillon représentatif des états significatifs pour les décisionnaires afin d'obtenir une cartographie discrète mais représentative des potentialités du système.

Pour estimer les coûts de déplacement de l'état initial du système vers chacun de ces échantillons, il est possible de construire un cadre de décision pour chaque état visé avec comme objectif principal d'atteindre cet état et comme critère de minimiser le coût. La

sélection des variables de décision permettra ainsi de définir un moyen et par conséquent d'associer un coût à cet état atteignable. Cette approche permet d'éviter de caractériser le système uniquement par les états de celui-ci qui sont utiles ou bien utilisés à un instant donné. Les caractéristiques intrinsèques d'un système sont définies également par ses capacités non encore exploitées.

Ainsi, l'espace des potentialités peut être vu à la fois comme un outil descriptif pour analyser la structure de coûts induite par le cadre de décision de la partie décisionnelle mais également comme un outil normatif pour dimensionner ce cadre de décision en référence à une structure de coûts visée. L'espace des potentialités permet ainsi d'intégrer les différents niveaux de la planification de l'opérationnel au stratégique. Il permet également de s'affranchir de l'horizon temporel du processus de décision en s'intéressant aux propriétés intrinsèques du système opérant.

3.2. L'espace de flexibilité

Le concept de flexibilité fait référence à des fluctuations de l'état du système dans le voisinage d'un état de référence pour atteindre son objectif malgré les perturbations générées par un certain nombre d'aléas. La structure de coûts de l'espace des potentialités dépend à la fois de l'état dans lequel se trouve le système à l'instant t et des caractéristiques de son environnement à ce même instant. Nous désignerons alors comme espace de flexibilité à l'instant t , EF_t , la partie de l'espace des potentialités au sein de laquelle le coût de déplacement à partir de l'état initial est considéré comme nul pour le système.

Prenons l'exemple d'un atelier de fabrication pour illustrer l'évolution de la structure de coûts. Considérons 3 états E_i de ce système à savoir : E_1 : Atelier muni d'une machine, E_2 : Atelier muni de 2 machines, E_3 : Atelier muni de 3 machines. Le coût d'une machine étant invariablement égal à C .

Dans le cas où l'atelier dispose à l'instant initial t_0 d'une machine, la structure de l'espace des potentialités est la suivante :

E_1 avec $C_1 = 0$	E_2 avec $C_2 = C$	E_3 avec $C_3 = 2C$
----------------------	----------------------	-----------------------

L'espace de flexibilité est réduit au premier couple ($E_1 ; C_1$).

Dans le cas où l'atelier s'est déplacé vers le 2^e état E_2 à l'instant t_1 , la structure de coût évolue de la manière suivante :

E_1 avec $C_1 = 0$	E_2 avec $C_2 = 0$	E_3 avec $C_3 = C$
----------------------	----------------------	----------------------

L'espace de flexibilité est élargi et comprend à la fois le couple $(E_1 ; C_1)$ et $(E_2 ; C_2)$

L'espace des états reste inchangé mais la structure de coûts évolue en fonction de l'état du système et de son environnement. Cette modélisation permet d'analyser les avantages concurrentiels respectifs de systèmes dont les objectifs seraient identiques.

Cette partie permet d'établir un lien entre les caractéristiques essentielles d'un système flexible avec des outils conceptuels modélisant la partie opérante. Par conséquent, l'espace des potentialités servira de support à la conception d'un système à flexibilité souhaitée en décrivant les capacités intrinsèques de la partie opérante. Ensuite, l'espace de flexibilité, incluse dans l'espace des potentialités, sera dimensionné par rapport à l'objectif assigné au système et à ses risques associés.

1	Disposer d'un espace d'états atteignables	Espace des potentialités	PARTIE OPERANTE
2	Être doté d'un objectif	Espace de flexibilité	
3	Interagir avec son environnement		
4	Disposer de leviers d'actions pour changer d'état		

Tableau 17 : Paramètres à dimensionner pour la conception d'un système à flexibilité souhaitée, part I

4. La partie décisionnelle : Les variables de décision

4.1. La mise en œuvre des potentialités

Etre flexible, c'est avoir des possibilités et bien les utiliser. Or, nous avons vu précédemment qu'il n'existait pas d'équivalence entre l'espace des solutions décrit par les variables de décision et l'espace des potentialités du système. Ce constat implique qu'un système peut ne pas atteindre la flexibilité désirée pour deux raisons principales : La première cause peut provenir du décalage entre les possibilités du système opérant et le besoin, en ce sens, le système ne disposerait pas des ressources adaptées. La deuxième raison peut être liée à son système de décision qui n'exploite pas toutes les possibilités de la partie opérante. Dans

ce second cas, le choix des variables de décision n'est peut-être pas approprié ou bien le processus de décision n'est pas synchronisé avec le flux d'information.

Nous parlerons dans cette partie de flexibilité souhaitée car ce qui est en jeu n'est pas simplement la flexibilité mais bien son adéquation avec le besoin. En effet, par définition, tout système muni d'un centre de décision dispose d'un certain degré de flexibilité. Les espaces de réalisation des variables de décision et les espaces de solution que la combinaison de ces variables génère sont des marques des possibilités d'évolution du système. De plus, nous avons vu qu'en l'absence de partie décisionnelle soumise à une finalité, nous ne pouvons qualifier un système de flexible.

En ce sens, la flexibilité n'est pas une notion absolue mais relative au système. En effet, il ne s'agit pas de la développer en étendant simplement le champ des possibilités mais surtout d'adapter celui-ci au besoin. L'obtention de la flexibilité ne se résume pas à une approche quantitative qui consisterait à maximiser le nombre des possibilités.

4.2. Le processus de décision vu comme un processus d'intégration des aléas par le système

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous utiliserons le modèle GRAI pour modéliser cette partie du système. L'espace des solutions, qui est l'espace associé au cadre de décision, est décrit par la combinaison des variables de décision. Cet espace est une image de la partie de l'espace des potentialités utile et/ou utilisée car les variables de décision sont sélectionnées pour satisfaire l'objectif assigné au système. Par conséquent, dans l'hypothèse où l'objectif ainsi que les contraintes appliquées au système seraient immuables, les autres états accessibles au sein de l'espace de flexibilité pourraient être perçus comme du gaspillage au sens où le coût d'acquisition de ces états aurait pénalisé la rentabilité économique.

L'espace des solutions est une modélisation de la perception du système de pilotage du système piloté et ne saurait restituer les caractéristiques intrinsèques du système opérant. En effet, cet espace dépend non seulement de l'objectif poursuivi mais également de la perception par le système de pilotage de son environnement. Selon sa sensibilité aux différents flux d'information, celui-ci ne se dotera pas des mêmes leviers d'action pour réagir aux éventuelles fluctuations. Le type de comportement adopté modifiera la nature des variables de décision retenues. Le regard porté sur un équipement de production par un

responsable d'atelier ou un responsable de maintenance ne retiendra pas les mêmes risques encourus par rapport au même objectif de production.

Enfin, exprimer un besoin en termes de flexibilité, c'est souhaiter donner les moyens au système étudié de pouvoir prendre un certain type de décisions en fonction des événements futurs et ainsi retarder tout ou partie d'une décision pour la synchroniser avec le flux d'information. Pour cette raison, la matérialisation du système de pilotage tout comme le positionnement de ce dernier par rapport au flux d'information détermine l'obtention de la flexibilité souhaitée au même titre que l'adéquation du cadre de décision avec les potentialités du système opérant.

Cette partie relie les caractéristiques essentielles d'un système flexible aux paramètres à dimensionner lors de la conception d'un système à flexibilité souhaitée pour les parties opérante et décisionnelle :

1	Disposer d'un espace d'états atteignables	Espace des potentialités	PARTIE OPERANTE
2	Être doté d'un objectif	Espace de flexibilité	
3	Interagir avec son environnement	Flux d'information	PARTIE DECISIONNELLE
4	Disposer de leviers d'actions pour changer d'état	Cadre de décision	

Tableau 18 : Paramètres à dimensionner pour la conception d'un système à flexibilité souhaitée, part II

5. Synchronisation du processus de décision avec le flux d'information

Notre étude repose sur une description du mécanisme de mise en œuvre de la flexibilité composée de trois étapes décrites à travers la Figure 25. Celle-ci met en évidence le lien entre le traitement de l'information et le besoin en flexibilité. En effet, le risque est de solliciter la flexibilité d'un système pour pallier un manque d'anticipation lié à un défaut dans la planification des tâches. L'objet de notre étude se concentre sur le processus de mise en œuvre de la flexibilité d'un système pour éclairer le décideur lors de sa conception. Ce processus est initié par le changement de nature d'une information incertaine lors de la conception du système en une donnée certaine à travers la réalisation d'un événement. La donnée nouvelle est alors traitée par le processus de décision qui définit à travers

l'instanciation des variables de décision la potentialité du système à atteindre. Enfin, le système change d'état avec un coût et dans un délai propre aux caractéristiques de déplacement au sein de l'espace des potentialités du système (Figure 25).

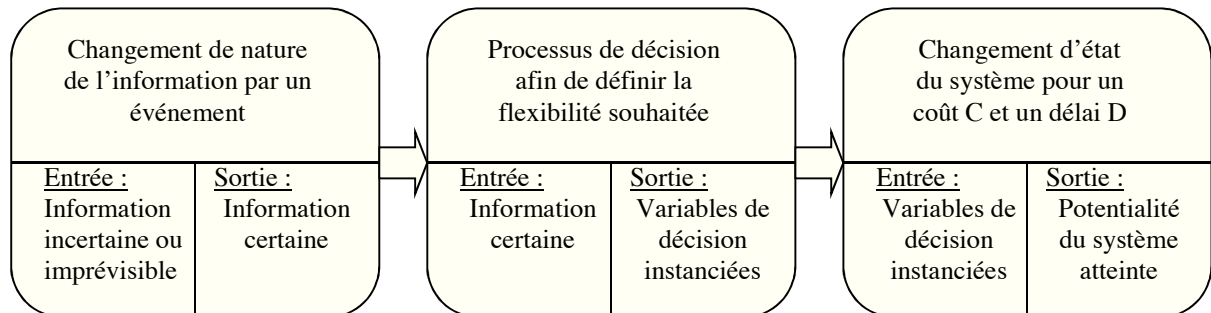


Figure 25 : Mise en œuvre de la flexibilité

5.1. Cartographie des potentialités

Dans un premier temps il s'agit de caractériser la flexibilité du système considéré. L'objectif est de segmenter l'ensemble des potentialités selon leur accessibilité à partir de l'état initial. Pour cela, nous utiliserons 2 critères, le coût du changement d'état et son délai de réalisation (Figure 26). Le coût permet d'introduire la notion d'efficience comme indicateur de performance. D'autre part, le délai permet de mettre en évidence le lien entre la nature de la flexibilité et les problématiques de réactivité.

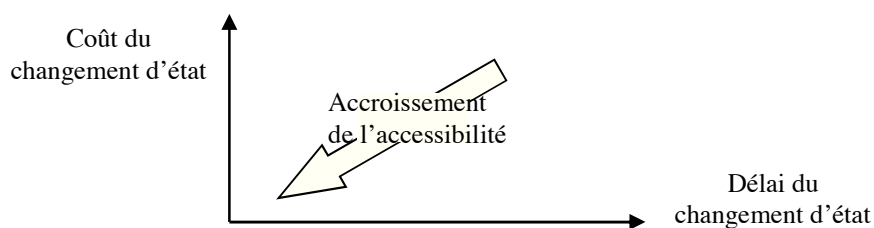


Figure 26 : Segmentation des potentialités

5.2. Comparaison des délais

Dans le cadre de cette thèse, nous identifions la place du processus de décision dans le flux d'information par rapport à la date souhaitée du changement effectif d'état du système. Dans cette perspective, nous déterminons quel type d'information déclenche le processus de décision, d'où provient cette information et comment elle est produite. Dans la suite de notre

étude, nous considérerons le temps du processus de décision comme nul, car négligeable par rapport à la mise en œuvre du changement d'état du système.

Notre analyse porte sur la comparaison du délai de changement d'état au délai entre le processus de décision et la date souhaitée du changement effectif d'état du système. Il apparaît ainsi que la nature des potentialités mises en œuvre n'est pas l'unique critère et que la place du processus de décision dans le flux d'information est déterminant pour dimensionner l'espace de flexibilité requis comme le montre la Figure 27. La pondération du temps de changement d'état dans le coût de déplacement C_i dépend du temps de cycle de transmission de l'information disponible. Ainsi, malgré des temps de réponse longs, c'est-à-dire avec une réactivité limitée, un système peut être qualifié de flexible si le traitement du flux d'information déclenche suffisamment tôt le processus de décision pour permettre au système d'exploiter ses potentialités.

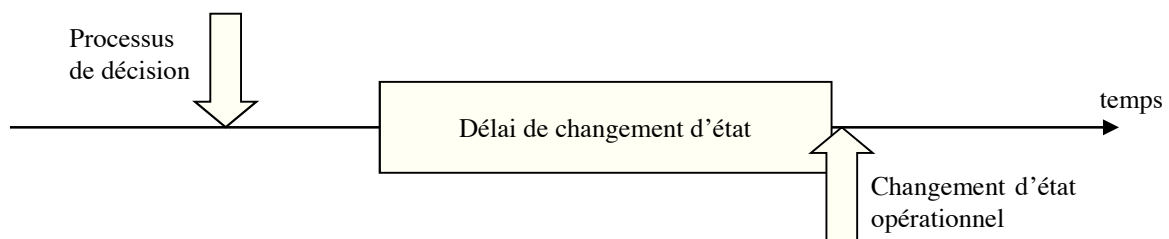


Figure 27 : Processus de décision et changement d'état

6. Méthodologie proposée pour concevoir un système à flexibilité souhaitée

L'intégration actuelle de la flexibilité au processus de conception d'un système peut être modélisée comme un processus de décision dans lequel la flexibilité interviendrait en aval comme critère de sélection de la solution. Or, cette approche a montré ses limites en favorisant les solutions surdimensionnées, en réduisant de ce fait l'efficacité des systèmes conçus.

L'objectif de la méthodologie présentée est de concevoir un système à flexibilité souhaitée en définissant successivement les paramètres de la partie opérante puis

décisionnelle et en intégrant la flexibilité en amont du processus de décision comme un objectif en termes de potentialités du système.

Concevoir un système à flexibilité souhaitée nécessite tout d'abord de se doter d'un référentiel visé. La flexibilité désigne la capacité d'un système à réagir face aux perturbations dont celui-ci peut être l'objet. Le premier élément à définir est l'objectif assigné au système.

Dans un deuxième temps, il s'agit de graduer les sources de variations ainsi que leur amplitude et leur criticité pouvant écarter le système de son objectif sans évolution vers un nouvel état voisin. Une méthode type AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) convient parfaitement comme support pour cette première phase.

Ensuite, il s'agit d'associer à chaque risque identifié un état atteignable pouvant répondre à ce risque. L'ensemble de ces états atteignable constituera un échantillon test pour dimensionner le système. Les états concernant les risques dont le niveau de criticité est le plus élevé devront faire partie de l'espace de flexibilité du système. Bâtir ainsi un espace de potentialité cible à partir de cet échantillon d'états.

Concevoir un système opérant pour lequel l'espace de potentialités est conforme aux caractéristiques définies dans l'étape précédente.

L'étape suivante s'intéresse au système décisionnel. L'objectif est de définir la palette des variables de décision adaptées à la fois à l'objectif et au système opérant afin de couvrir l'espace de flexibilité défini.

Enfin, il s'agit de déterminer la matérialisation du système décisionnel et sa position par rapport au flux d'information existant.

L'objectif du processus de décision induit par la méthodologie ci-dessus n'est pas simplement d'atteindre un état du système mais bien de définir les modalités d'une certaine accessibilité à un ensemble d'états. Cette approche revient à définir un barycentre dans l'espace des potentialités d'un système. La prise en compte de la structure de coût au-delà de l'espace des solutions défini par les variables de décision permet de s'intéresser également à ce qui est nommée dans d'autres études de la littérature « la flexibilité potentielle ». Cette démarche n'est pas possible si l'on ne considère que l'espace des solutions.

Pour répondre à une certaine stratégie, il est possible de souhaiter réduire le coût d'accessibilité d'un état voire même de l'inclure dans l'espace de flexibilité alors que le cadre de décision actuel ne permet pas de définir un moyen d'y parvenir puisque le jeu des variables actuelles suffit pour atteindre l'objectif. Cette faculté permet de planifier une évolution du système de proche en proche et ainsi de déplacer l'espace de flexibilité selon le besoin. Cette aptitude pourra être rapprochée de la notion d'agilité.

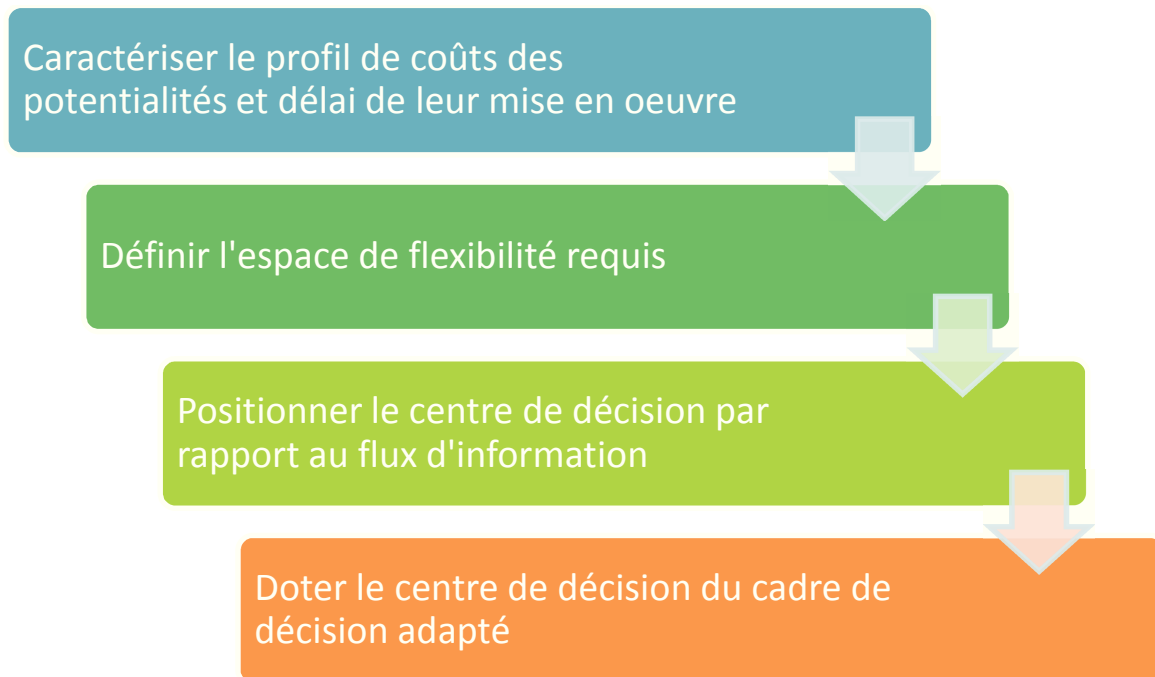


Figure 28 : Méthodologie de conception d'un système à flexibilité souhaitée

La conception d'un système à flexibilité souhaitée suppose d'avoir la capacité de définir le besoin et donc de déterminer l'objectif en termes de flexibilité à atteindre pour le concepteur. Cette étape initiale a été rendue possible par l'introduction du concept de potentialité qui a valeur de dénominateur commun et d'unité de gestion pour la flexibilité. En l'absence de ce concept, les différentes approches pour analyser ou développer la flexibilité d'un système restaient particulières et contingentes.

Nous utiliserons cette méthodologie à travers deux applications industrielles distinctes à la fois par l'objet et l'horizon temporel. En effet, dans le chapitre V, nous étudierons la conception du système d'évacuation des eaux lors de la construction de la nouvelle usine en Seine-et-Marne de la société EUROFARAD. A travers ce projet, nous concentrerons et limiterons notre étude à la conception de la partie opérante compte tenu de son aspect

déterminant pour le fonctionnement futur du nouveau site industriel. L'horizon temporel de l'utilisation de ce système ne permettant pas de tester empiriquement de façon significative l'exploitation des potentialités par sa partie décisionnelle, nous utiliserons le cadre temporel du management de l'équipe du département logistique à cette fin à travers le chapitre VI. Nous verrons donc dans cette dernière partie que le positionnement adapté de la partie décisionnelle constitue l'élément déterminant dans la mise en œuvre d'un système flexible.

CHAPITRE IV. Dimensionnement de la partie opérante, Application à la conception du système d'évacuation des eaux du nouveau site industriel EUROFARAD de Chanteloup-en-Brie

Ce chapitre applique la méthodologie basée sur le concept de potentialité pour concevoir la partie opérante d'un système à flexibilité souhaitée. L'application industrielle portera sur la conception du réseau d'évacuation des eaux de la nouvelle usine EUROFARAD en Seine-et-Marne. Nous utiliserons la valeur actualisée nette comme critère d'efficience à travers une simulation de Monte-Carlo pour comparer les scénarii alternatifs selon le principe du bilan différentiel.

Dans une première partie nous exposerons les différentes problématiques inhérentes aux systèmes ouverts sur leur environnement et par conséquent soumis à leurs évolutions.

La seconde partie rappelle le contexte théorique ayant conduit à l'approche proposée.

Dans une troisième partie, nous présenterons le contexte industriel.

La quatrième partie présente l'approche classique qui a servi à concevoir les infrastructures du nouveau site industriel et d'en exposer les limites.

La cinquième partie propose comme alternative la méthodologie basée sur la morphologie de l'espace des potentialités.

La dernière partie compare les résultats des deux approches.

1.	PROBLEMATIQUES INHERENTES AUX SYSTEMES OUVERTS.....	97
2.	LA FLEXIBILITE, UNE APTITUDE NECESSAIRE EN UNIVERS INCERTAIN	98
2.1.	UNE NOTION MULTIDIMENSIONNELLE.....	99
2.2.	LA POTENTIALITE, VECTEUR DE FLEXIBILITE	101
3.	OPTIMISATION DE LA FLEXIBILITE DES INFRASTRUCTURES DU NOUVEAU SITE INDUSTRIEL EUROFARAD	103
3.1.	MESURE DE L'EFFICIENCE.....	104
3.2.	EVALUATION DES SCENARII	105
4.	APPROCHE CLASSIQUE : LA FLEXIBILITE COMME CRITERE DE SELECTION	106
4.1.	L'INTEGRATION DE LA FLEXIBILITE EN AVAL DU PROCESSUS DE DECISION	106
4.2.	COLLECTE DES INFORMATIONS	109
4.3.	PRISE DE DECISION.....	111
4.4.	SELECTION PAR RAPPORT AU CRITERE DE FLEXIBILITE	112
4.5.	PERFORMANCE ECONOMIQUE DU RESULTAT	113
5.	APPROCHE PAR LE DIMENSIONNEMENT DE L'ESPACE DES POTENTIALITES	118
5.1.	L'INTEGRATION DE LA FLEXIBILITE EN AMONT DU PROCESSUS DE DECISION ...	118
5.2.	MORPHOLOGIE DE L'ESPACE DES POTENTIALITES PAR ECHANTILLONNAGE DES ETATS ATTEIGNABLES	119
5.3.	PERFORMANCE ECONOMIQUE DU RESULTAT	122
5.4.	BILAN DE LA METHODE APPLIQUEE A LA PARTIE OPERANTE D'UN SYSTEME	123

1. Problématiques inhérentes aux systèmes ouverts

La littérature récente sur les systèmes de production identifie un besoin de plus en plus pressant pour un système en parfaite symbiose avec son environnement. Dès 1961, certains auteurs des théories des organisations comme Burns et Stalker (Burns & Stalker, 1961) s'inspirent de systèmes biologiques pour modéliser la structure organique de celles-ci. On assiste ensuite, au début des années 80, à l'introduction du concept de « *Supply Chain* » par des auteurs comme Oliver et al. (Oliver & Webber, 1982) aux Etats-Unis. Ces approches illustrent le changement radical de perception d'un système productif indépendant et autonome en un élément constitutif d'un tout et en interaction avec celui-ci. De plus, l'analyse de l'environnement économique dont les principales caractéristiques reflètent la structure du marché, montre de profondes mutations durant cette période. Ainsi, l'un des enjeux majeurs devient : la conception d'un système adapté aux environnements turbulents, aux évolutions incertaines.

Dans ce cadre, c'est l'ensemble de l'entreprise qui a cessé de se concevoir comme un système isolé depuis que les rapports entre l'offre et la demande se sont inversés. En effet, depuis le passage de l'aire de la standardisation avec F. W. Taylor et H. Ford à l'aire de la variété, l'entreprise se doit d'établir un lien étroit avec son marché bien sûr mais également avec les maillons en amont et en aval de la chaîne logistique. L'apparition de cette notion illustre le fait que l'entreprise s'intègre dans un système plus vaste et que ses performances dépendent intimement des performances des autres maillons de la chaîne et de l'articulation de ces derniers.

Un des principaux leviers d'action dont dispose l'entreprise pour obtenir le niveau optimum requis du triplet « Coût, Qualité, Délai » est le traitement et la maîtrise du flux d'information. Ces flux sont aussi bien internes qu'externes. Ces derniers permettent aux décideurs de percevoir avec plus ou moins de précision les évolutions de son environnement et de se positionner par rapport à eux.

En effet, l'entreprise a le choix entre plusieurs types d'actions par rapport à ces événements. Elle peut tout d'abord changer ou non son fonctionnement en fonction de l'ampleur du changement constaté. Elle peut également anticiper les évolutions extérieures en extrapolant à partir des processus observables à un instant t . Enfin, elle peut préférer une réponse réactive plutôt que proactive. Le choix entre ces différents types d'action dépend à la

fois des caractéristiques de l'information disponible et des choix des décideurs comme le décrivent les méthodes de prise de décision sous incertitude (Munier, 2003) ou le concept de rationalité limitée en micro-économie (Simon, 1997).

Que ce soit au niveau stratégique, tactique ou encore opérationnel et quelle qu'en soit sa fréquence, le processus décisionnel intègre à chaque itération les données nouvelles et les évolutions dans la perception du décideur des risques et de leur évaluation. Ce processus a pour but de piloter le système considéré à travers les variables de décision.

Or, comme nous l'avons rappelé, la recherche de l'exhaustivité des données nécessaires à une décision comme la recherche de l'exactitude de celles-ci paraît illusoire. L'identification des limites intrinsèques du pilotage a conduit naturellement les auteurs à s'intéresser aux aptitudes du système à piloter. Ainsi, différentes notions ont été introduites pour caractériser l'aptitude du système à s'adapter comme la fiabilité, la flexibilité, l'agilité, la résilience, la robustesse, la stabilité ou encore la sensibilité (Durieux-Paris, Genin, & Thierry, 2007).

Nous nous intéresserons donc dans un premier temps aux caractéristiques de la partie opérante d'un système pour permettre une prise de décision lors des modifications de l'information et des données disponibles. Toute prise de décision peut être perçue comme une illustration de la capacité d'un système à évoluer. En effet, toute décision suppose l'existence d'alternatives. Or, ceci implique des évolutions différentes dépendant des caractéristiques propres au système. Pour cela, un système doit être doté d'un espace de potentialités adapté aux situations qu'il rencontre. Ainsi, les dirigeants ou concepteurs de ce système doivent dimensionner l'espace de flexibilité selon leur besoin.

2. La flexibilité, une aptitude nécessaire en univers incertain

La nature des facteurs clés de succès propres aux systèmes de production poursuit son évolution en se déplaçant toujours plus des problématiques de réduction des coûts, aux problématiques de réduction des délais de réaction souvent assimilés à la notion de « Time to market » (Griffin, 1997; Ittner & Larcker, 1997).

Cette transformation traduit le degré de complexité de l'environnement économique actuel qui ne peut être appréhendé de façon pertinente sans distinguer les différents types de données à disposition du décideur. Nous pouvons nous représenter les limites inhérentes à toute prise de décision liée à la qualité de l'information à travers la classification des qualités d'information à disposition du décideur (Tableau 19).

Chronologie	Événement	Données	Qualité
Passé	Produit	Etablies	Certain
Futur	Considéré	Estimées	Incertain
	Non considéré	Absentes	Imprévisible

Tableau 19 : Classification des qualités d'information à disposition du décideur

Nous retiendrons pour cette étude la terminologie employée par les auteurs comme Gunasekaran (Gunasekaran, 1999) et Sharifi et Zhang (Sharifi & Zhang, 2001) dont les travaux portent sur la notion d'agilité. Ainsi, nous distinguerons de façon usuelle les données dites certaines et incertaines comme dans les travaux de Luce et Raiffa (Luce & Raiffa, 1967), mais nous expliciterons également comment notre méthodologie ayant pour objet la conception d'un système à flexibilité souhaitée s'articule avec la notion d'agilité. En d'autres termes, comment intégrer au processus de décision le caractère imprévisible d'événements auxquels tout système doit faire face ?

En ce qui concerne le système d'évacuation des eaux, un événement imprévisible lors de la conception peut correspondre à une évolution du cadre législatif. Il existe alors à ce moment deux alternatives concernant l'évolution de la morphologie de l'espace des potentialités. Soit cet événement nécessite un déplacement vers une potentialité de l'espace de flexibilité ou encore la potentialité à atteindre a un coût acceptable pour le système. Soit, les dirigeants ou concepteurs sont dans l'obligation de faire évoluer le système pour déplacer son espace de flexibilité et changer la morphologie de son espace des potentialités. Cette capacité à faire évoluer l'espace des potentialités est propre au concept d'agilité.

2.1. Une notion multidimensionnelle

La notion de flexibilité a fait l'objet de nombreuses études depuis la définition proposée par Stigler (Stigler, 1939). Elle est perçue comme l'un des facteurs clés de la compétitivité à privilégier selon Cox (Cox, 1989). En effet, dans un environnement économique où la

concurrence par le coût cède la place aux stratégies de différenciation et de spécialisation comme le décrit Porter (Porter, 1985) et aux stratégies de réduction des délais présentées par Holzwarth (Holzwarth, 1993), la flexibilité d'un système productif apparaît comme le levier idoine pour acquérir un avantage concurrentiel.

La flexibilité est définie par Upton (Upton, 1994) dans son acception globale comme la capacité d'un système à réagir ou à se transformer en minimisant : le délai de réaction, les coûts et la perte de performance liés à cette évolution. Cependant, la littérature abondante sur le sujet tend à particulariser les différents aspects de la flexibilité par rapport au domaine étudié et au contexte retenu. Par conséquent, la variété des approches en fait une notion multidimensionnelle dont la complexité rend difficile une compréhension globale unifiée. Shewchuk et Moodie (Shewchuk & Moodie, A framework for classifying flexibility types in manufacturing, 1997) expliquent cette situation par « le fait que les chercheurs aient défini en général les différents types de flexibilité, sous un angle de vue limité du système de production, reflétant ainsi leur propre domaine de recherche et les biais qui leur sont propres ».

Apter (Apter, 1985), Cohendet et Llerena (Cohendet & Llerena, 1990) et Carlsson (Carlsson, 1992) distinguent deux types de flexibilité en fonction de l'environnement économique. La flexibilité statique est liée à un environnement dont les caractéristiques d'évolution sont incertaines alors que la flexibilité dynamique se rapporte à un environnement dont les caractéristiques d'évolution sont imprévisibles. Si l'introduction de l'imprévisible nécessite vraisemblablement la définition d'une aptitude nouvelle pour les systèmes de production, cette approche restreint la portée du concept de flexibilité en la rendant contingente et relative. Nous retrouvons le même relativisme dans la description méthodique de Parker et Wirth (Parker & Wirth, 1999) qui référencent huit types de flexibilité : « *machine flexibility* », « *routing flexibility* », « *volume flexibility* », « *expansion flexibility* », « *process flexibility* », « *product flexibility* », « *operation flexibility* » et « *production flexibility* ».

D'autres auteurs se sont également exprimés sur le manque évident d'unité au sein de la littérature traitant de la flexibilité. Gerwin (Gerwin, 1993) expose ainsi sa position et appelle à une théorie unifiée de la flexibilité : « La plupart des études sur la flexibilité supposent l'approche multidimensionnelle de ce concept mais ne fournissent aucune base théorique pour trouver sa dimension essentielle ». De même, D'Souza et Williams (D'Souza & Williams,

2000), Toni et Tonchia (Toni & Tonchia, 1998) et Volberda (Volberda, 1998) expriment un besoin identique.

Nous rappellerons dans la partie suivante le rôle du concept de potentialité comme dénominateur commun aux différentes approches de la flexibilité.

2.2. La potentialité, vecteur de flexibilité

La flexibilité se distingue de l'agilité par la nature des événements pris en compte pour permettre au système d'assurer sa fonction au sein de son environnement et ainsi de maintenir un équilibre. La conception d'un système à flexibilité souhaitée ne peut prendre en compte que les incertitudes puisque, par définition, aucune donnée n'est disponible sur les événements imprévisibles lors de ce processus de conception. L'attitude qui consiste à développer, maximiser la flexibilité traduit implicitement la volonté sous-jacente de prémunir plus largement le système en s'appuyant sur l'aversion aux risques des dirigeants.

Mais cette attitude à un coût. C'est à travers la maîtrise de la morphologie de l'espace des potentialités que le concepteur peut à la fois dimensionner la flexibilité de son système et faire face aux événements imprévisibles lorsque les données changent de nature et deviennent disponibles quand elles étaient absentes. Ainsi, les événements imprévisibles se transforment donc en événements incertains voire certains. Ce moment peut alors requérir et initier une re-conception totale ou partielle du système en faisant évoluer la morphologie de l'espace des potentialités. Cette dernière compétence correspond à l'agilité d'un système.

Malgré la diversité des définitions et approches présentées, le concept de flexibilité laisse apparaître un invariant. En effet, la reconfiguration d'un système, quel qu'il soit, requiert de façon implicite l'existence d'un espace de réalisation. L'évolution d'un système est souvent bornée par les conditions initiales issues de sa configuration primaire. Notre hypothèse est donc la suivante : l'événement perturbateur endogène ou exogène qui aura pour conséquence la reconfiguration du système ou le changement de ses objectifs n'est pas un test pertinent pour mesurer la flexibilité d'un système. Il permet tout au plus de mesurer l'adéquation du champ des possibles de celui-ci avec les évolutions de son environnement.

La potentialité d'un système de production n'est pas toujours clairement identifiée a priori et l'apparition d'un événement perturbateur peut constituer à la fois un catalyseur et un révélateur de celle-ci. Cependant, la notion de potentialité montre qu'il faut distinguer notre

état de connaissance des aptitudes réelles du système. Ce principe change à la fois la perception du concept de flexibilité, la manière de la développer et de la mesurer.

Comme nous l'avons décrit au cours du chapitre précédent, la potentialité est un vecteur de flexibilité pour le système. En effet, une entreprise est dite flexible si sa potentialité est adaptée à son environnement et si elle l'exploite convenablement. Le rôle de la potentialité dans la recherche de la flexibilité est central et structure notre méthodologie pour concevoir un système à flexibilité souhaitée pour la partie opérante. En effet, c'est en amont, durant la phase de conception du système que la potentialité sera déterminée.

Analysons brièvement le cas de la polyvalence du personnel qui est souvent citée dans la littérature comme une composante intéressante de la flexibilité d'un système productif. Ce concept évoque la possibilité de moduler la capacité des différents postes de charge le long de la chaîne logistique en fonction du besoin. La flexibilité opérationnelle ainsi recherchée est fondée sur les savoirs et savoir-faire à partir desquels le personnel réunit des compétences. La définition de Le Boterf (Le Boterf, 1995) selon laquelle « La compétence est la mobilisation ou l'activation de plusieurs savoirs, dans une situation et un contexte donnés » permet de caractériser la potentialité d'un individu. En effet, l'ensemble des compétences qu'un individu est en mesure de mobiliser à partir de ses savoirs et savoir-faire correspond à sa potentialité telle qu'elle a été définie précédemment. Il est possible d'accroître dans ce cas la potentialité par sa formation dont le coût doit être rapproché de la probabilité d'utiliser cette extension.

L'identification de la potentialité comme vecteur de la flexibilité modifie profondément l'approche traditionnelle de la flexibilité. Non seulement elle permet de franchir une première étape vers l'unification au sein de ce domaine d'étude, mais elle permet également de considérer la flexibilité comme une véritable variable de décision. En effet, la flexibilité ne doit pas être perçue comme un objectif absolu qu'il faudrait maximiser mais bien comme un paramètre à optimiser. Nous choisissons comme critère d'optimisation l'efficacité. Nous retiendrons la définition de Bouquin (Bouquin, 2004) selon laquelle « l'efficacité est le fait de maximiser la quantité obtenue de produits ou de services à partir d'une quantité donnée de ressources ». Dans ce cadre, la prochaine partie de notre étude sera consacrée à l'optimisation de la flexibilité d'une infrastructure : le réseau de plomberie d'un site industriel.

3. Optimisation de la flexibilité des infrastructures du nouveau site industriel EUROFARAD

L'entreprise EUROFARAD a été fondée en 1965 et s'est rapidement développée par la mise au point et l'introduction sur le marché de composants électroniques passifs de haute technologie. Plus de 10% du chiffre d'affaires par an est consacré à la Recherche et au Développement de technologies nouvelles. Parallèlement, une croissance externe par le rachat de sociétés complémentaires ou concurrentes a permis de compléter les gammes de produits proposés.

L'activité d'EUROFARAD repose sur l'étude et la fabrication de produits « haut de gamme » destinés aux secteurs industriel, professionnel, ferroviaire, médical, militaire et spatial. À partir des diverses technologies maîtrisées par EUROFARAD, les laboratoires développent des produits en accord avec les exigences techniques des clients. Ainsi, pour soutenir la stratégie de différenciation adoptée, dans un environnement marqué par l'innovation, l'entreprise doit développer sa capacité d'adaptation.

Dans ce contexte, la flexibilité constitue un véritable facteur clé de succès que l'entreprise EUROFARAD recherche à tous les niveaux : opérationnel, tactique et stratégique. La construction en 2008 d'un nouveau site industriel en Ile de France pose l'enjeu de la flexibilité de l'implantation de la zone de production. Les potentialités de configurations des ateliers de production seront déterminées lors de la conception des différents réseaux : informatique, électricité, air comprimé, extraction d'air ou encore arrivée et évacuation d'eau.

Le réseau d'évacuation d'eau présente une double spécificité. Tout d'abord, le process industriel d'EUROFARAD inclut des opérations pour lesquelles le rôle de l'eau est capital. C'est le cas du traitement de surface qui utilise des solutions aqueuses et des nombreuses opérations chimiques des gammes de fabrication qui utilisent de l'eau désionisée. Ensuite, les choix concernant ce réseau doivent être pris très tôt dans le projet de construction de l'usine et ne peuvent plus être remis en cause par la suite. En effet, l'option d'un réseau enterré s'arrête avec le coulage de la dalle. Nous étudierons donc dans cette perspective deux alternatives techniques pour la conception du réseau d'évacuation d'eau, le système gravitaire et le système en dépression.

Comme cette décision intervient en amont du projet du transfert du site industriel, toutes les données de l'évolution du système ne sont ni connues ni figées sur un horizon suffisant. Le concepteur souhaite laisser un degré de liberté au système pour lui permettre d'évoluer en fonction des aléas endogènes et exogènes. Ce comportement face à l'incertitude qui consiste à retarder tout ou partie de la décision revient à doter le système d'une flexibilité souhaitée.

3.1. Mesure de l'efficience

La conception d'un réseau d'évacuation d'eau repose tout d'abord sur le choix de la technologie utilisée (Tableau 20). En effet, il faut distinguer le réseau gravitaire traditionnel d'un réseau mécaniquement mis en dépression par une pompe à vide. Pour comparer la rentabilité économique de ces deux solutions alternatives, nous avons retenu le principe du bilan différentiel (Giard, 2005). Cette méthode permet d'analyser les conséquences économiques des différents scénarii retenus par rapport à une solution de référence. On s'intéresse donc aux variations physiques ou financières induites par la ou les solutions nouvelles. La mise en relief des éléments qui sont modifiés par les décisions prises, présente également l'avantage de limiter le recueil des données.

	<i>Installation du réseau</i>	<i>Evolutions du réseau</i>
Système en dépression	Centrale et boîtiers collecteurs	Boîtier collecteur
Système gravitaire	Tranchées	Raccordement
		Nouvelle Tranchée

Tableau 20 : Description des deux technologies

Or, comme le soulignent Cohendet et Llerena (Cohendet & Llerena, 1990) « Chaque décision importante (investissement en capacité, en automatisation...) devra incorporer ces différents éléments de gains et de coûts « potentiels » ou « virtuels » liés au processus temporel et à l'incertitude sous-jacents à chaque décision ». En effet, les données disponibles au moment de la décision ne sont pas homogènes et leur traitement doit tenir compte de leur caractère incertain.

Pour cette raison, nous utiliserons une méthode de simulation de Monte-Carlo qui permet d'introduire une approche statistique du risque dans une décision financière. Nous

distinguerons les variables du projet qualifiées d'incertaines que nous pouvons approcher par une distribution de probabilité comme le coût d'évolution de chacune des technologies, des variables dites imprévisibles, comme l'utilisation de la flexibilité du système que nous modéliserons par un coefficient aléatoire, c'est à dire suivant une loi de probabilité uniforme continue sur l'intervalle $[0 ; 1]$.

3.2. Evaluation des scénarii

Le choix technologique entre un réseau gravitaire traditionnel, considéré comme non-flexible et un réseau mis en dépression, offrant une flexibilité totale sur le positionnement des évacuations d'eau grâce à un système de boîtier, est rarement fondé sur un calcul économique. En effet, cette formulation du problème oppose radicalement les possibilités des deux systèmes, légitimant de ce fait le surcoût lié à la recherche de flexibilité. Sur le terrain comme dans la littérature, le paradigme actuel est bien de maximiser la flexibilité.

Cependant, la variété des solutions n'est pas limitée à ces deux choix extrêmes. Il existe un gradient de solutions plus ou moins flexibles allant du réseau gravitaire répondant strictement au besoin actuel au réseau en dépression. Ce gradient peut être obtenu par l'optimisation du réseau gravitaire en quadrillant plus ou moins finement l'espace de production. Le nombre d'attentes non utilisées à l'instant initial ainsi que le coût de ce réseau augmentera avec le degré de finesse du quadrillage mais les caractéristiques de l'espace des potentialités obtenues s'approcheront de celles du réseau en dépression.

En effet, les deux systèmes offrent le même espace d'états atteignables au sens où il est possible d'implanter dans les deux cas autant d'évacuations que nécessaire aux emplacements souhaités. C'est bien la fonction C du coût de déplacement et donc la morphologie de l'espace des potentialités qui diffèrent de l'un à l'autre.

Dans le cas du système en dépression, cette fonction coût est uniforme sur l'ensemble de l'espace puisque l'ajout comme la suppression de boîtiers collecteurs a un coût directement proportionnel au nombre de boîtiers posés quel que soit leur position dans la zone de production. Le cas du système gravitaire se distingue par le fait qu'il présente deux types d'évolution différents suivant les contraintes. Leur coût respectif est inférieur au coût d'un boîtier pour un simple raccordement à une attente du réseau d'évacuation, alors qu'il est supérieur pour le creusement d'une nouvelle tranchée dans la dalle. Le choix entre ces deux

évolutions possibles est déterminé par la distance entre le point à raccorder et l'attente la plus proche. En effet, si celle-ci est inférieure à 10 mètres, la pente permet d'envisager un simple raccordement alors que si elle est supérieure à 10 mètres, il est nécessaire de creuser une nouvelle tranchée.

La définition selon laquelle la flexibilité d'un système résulte de l'adéquation de la morphologie de son espace de potentialités avec son environnement puis de l'exploitation de celle-ci subordonne la recherche de potentialités aux caractéristiques de l'environnement. C'est donc ce paramètre que nous optimiserons pour la partie opérante du système selon un critère d'efficacité : la valeur actualisée net.

4. Approche classique : la flexibilité comme critère de sélection

4.1. L'intégration de la flexibilité en aval du processus de décision

La conception d'un système met en œuvre un nombre plus ou moins important d'itérations de la séquence suivante : Phase de collecte d'information sur les besoins et solutions alternatives envisagées puis Processus de décision pour sélectionner les paramètres permettant au système ainsi caractérisé de répondre à l'objectif qui lui a été assigné.

Selon la modélisation du processus de décision par le modèle GRAI, ce qui permet à ce processus d'aboutir à une solution unique est le rôle respectif de l'objectif et du ou des critères de sélection. En effet, pour être retenue, une solution doit naturellement répondre à l'objectif mais en cas d'équivalence sur la performance de plusieurs solutions, il est nécessaire de faire appel à des critères qui permettent de restreindre les alternatives jusqu'à une solution unique.

L'approche classique propose de faire jouer ce rôle au concept de flexibilité en l'intégrant par conséquent en aval du processus de décision. Or, en l'absence de cadre conceptuel permettant d'intégrer la flexibilité à l'objectif du cadre de décision, il n'est pas possible de percevoir ce processus, non plus comme un simple déplacement d'une potentialité à une autre, mais bien comme une sélection d'un ensemble de potentialités.

En effet, l'approche classique actuelle décrit le processus de décision comme une fin en soi dont l'issue est déterminée par la qualité de l'information disponible alors que l'approche basée sur les potentialités propose de le décrire comme une ouverture sur des prises de décision ultérieures lorsque la qualité de l'information n'est pas jugée suffisante par le décisionnaire. Pour cela, il est nécessaire de faciliter cette ouverture en dotant le système de la capacité de décision par rapport à l'évolution des données disponibles. C'est donc un ensemble de potentialités qu'il s'agit de sélectionner et non seulement un état figé.

Par conséquent, l'approche classique conduit à sur-dimensionner les possibilités offertes par un système en proposant comme critère de sélection la flexibilité, c'est-à-dire, la maximisation des axes d'évolution du système (Lelièvre, Durieux, & Lamouri, 2009). Cette phase du processus de décision peut être modélisée par le concept d'espace des potentialités en considérant que le décisionnaire évalue la flexibilité de la solution par le nombre de potentialités incluses dans la partie de l'espace au sein duquel le coût de déplacement est inférieur à son seuil d'acceptabilité. Ce raisonnement simplifié ne prend pas en compte l'aspect qualitatif nécessaire à l'élaboration de tout espace de flexibilité.

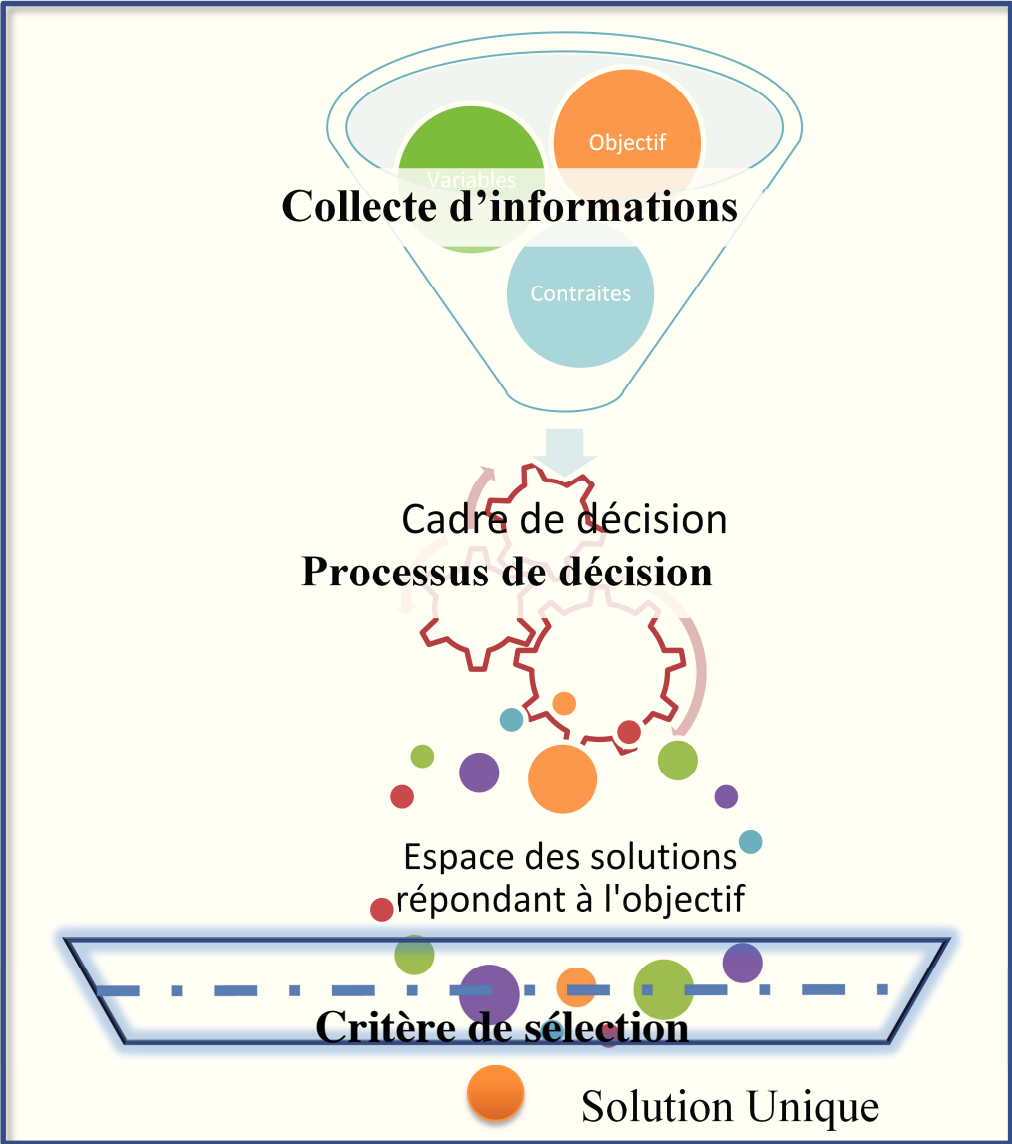


Figure 29 : Place du critère de sélection dans le processus de décision

4.2. Collecte des informations

La collecte des informations en amont du processus de décision doit permettre de déterminer le cadre de décision selon le modèle GRAI. Tout d'abord, l'objectif assigné au système d'évacuation d'eau est de permettre l'implantation des ateliers de production suite au transfert du site à partir des plans établis en amont du projet.

Dans un premier temps les équipements nécessitant une évacuation d'eau sont référencés et localisés sur le plan de l'usine :



EUROFARAD **CONSTRUCTION D'UNE USINE DE** **PRODUCTION**

N°Salle	Désignation	Nombre Equipements
0.4	Essais qualité cycles longs	1
0.5	Laboratoire Photo Qualité	2
0.10	Haute Tension	1
1.6	Atelier Coulage/Imprégnation	1
2.0	Traitement de Surface	4
2.1	Préparation Barbotine PM	1
2.13	Rodage	3
2.15	Atelier DL	1
2.2	Préparation Barbotine DL	1
2.26	Préparation Résine	1
2.28	Atelier Filtres	1
2.30	Médical	1
2.5	Coulage PM	1
2.8	Sérigraphie / Encollage	1
3.0	Traitement de Surface	1
3.1	Mécanique CSA	1
3.4	Atelier CSA	2
3.9	Potting / Pistolage	3

Tableau 21 : Référencement du besoin

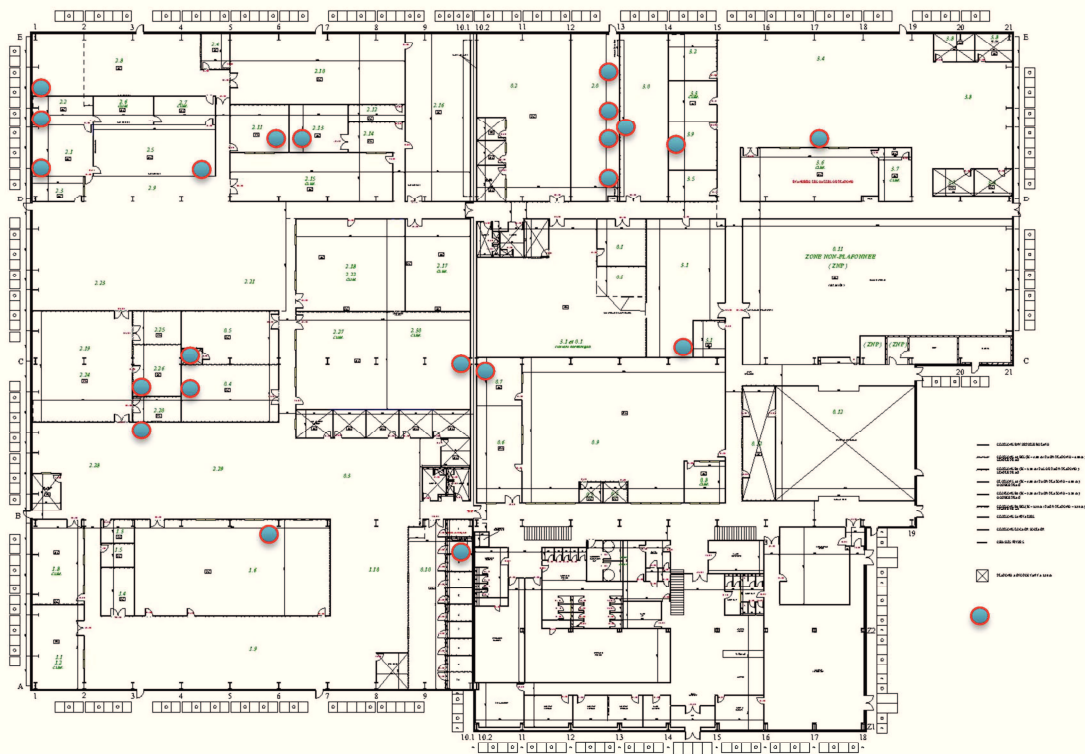


Figure 30 : Localisation des points d'évacuation

Pour répondre à ce besoin, l'architecte propose deux systèmes alternatifs basés respectivement sur deux technologies : le premier système repose sur une évacuation gravitaire des eaux quand le second intègre une pompe à vide pour permettre le relevage de ces eaux.

Le cadre de décision ainsi obtenu est le suivant :

Cadre de décision pour la conception du système d'évacuation de la nouvelle usine	
OBJECTIF	Permettre l'implantation définie sur le plan
VARIABLES DE DECISION	Variable de la technologie : en dépression ou gravitaire Variables liées au système gravitaire : nombre d'attentes, nombre de tranchées et position Variables liées au système en dépression : capacité de la pompe à vide, nombre de boîtiers et position
CONTRAINTES	Pour le système gravitaire, une attente ne peut pas être à plus de 10m d'une tranchée Pour le système en dépression, le nombre de boîtier est limité par la capacité de la pompe retenue
CRITERE	Maximiser la flexibilité

Tableau 22 : Cadre de décision pour le choix du système d'évacuation

4.3. Prise de décision

L'espace des solutions qui répondent à l'objectif consistant à permettre l'implantation des ateliers de production est constitué de 2 alternatives basées respectivement sur chacune des deux technologies.

L'utilisation des variables de décision liées au nombre d'attentes pour le système gravitaire et leur position ou encore le nombre de boîtiers collecteurs associés aux équipements reliés au système d'évacuation aboutit aux deux solutions suivantes :

L'architecte propose une première solution s'appuyant sur le système gravitaire composé d'une tranchée principale et de 6 tranchées secondaires pour permettre de collecter l'eau des 22 points référencés le long du process industriel :

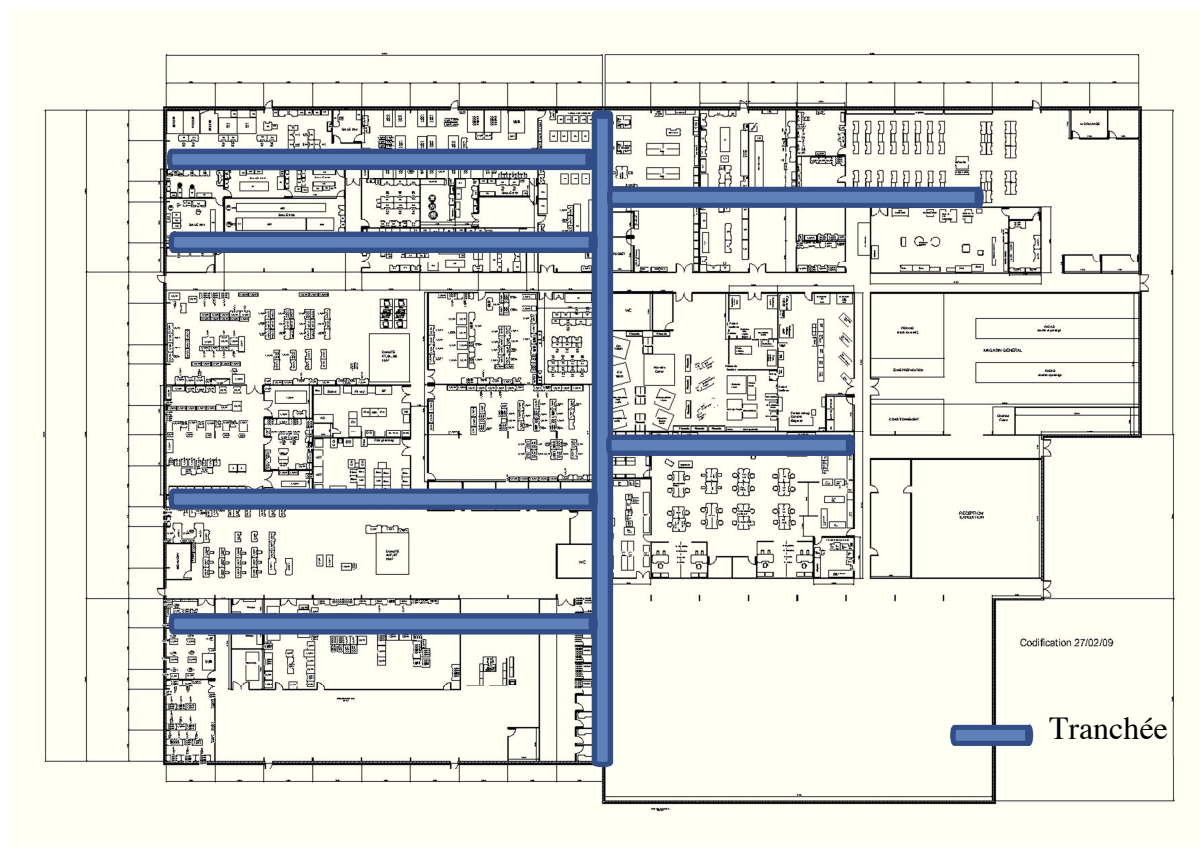


Figure 31 : Réseau d'évacuation gravitaire

Une seconde solution est représentée le réseau suivant basé sur un système en dépression :

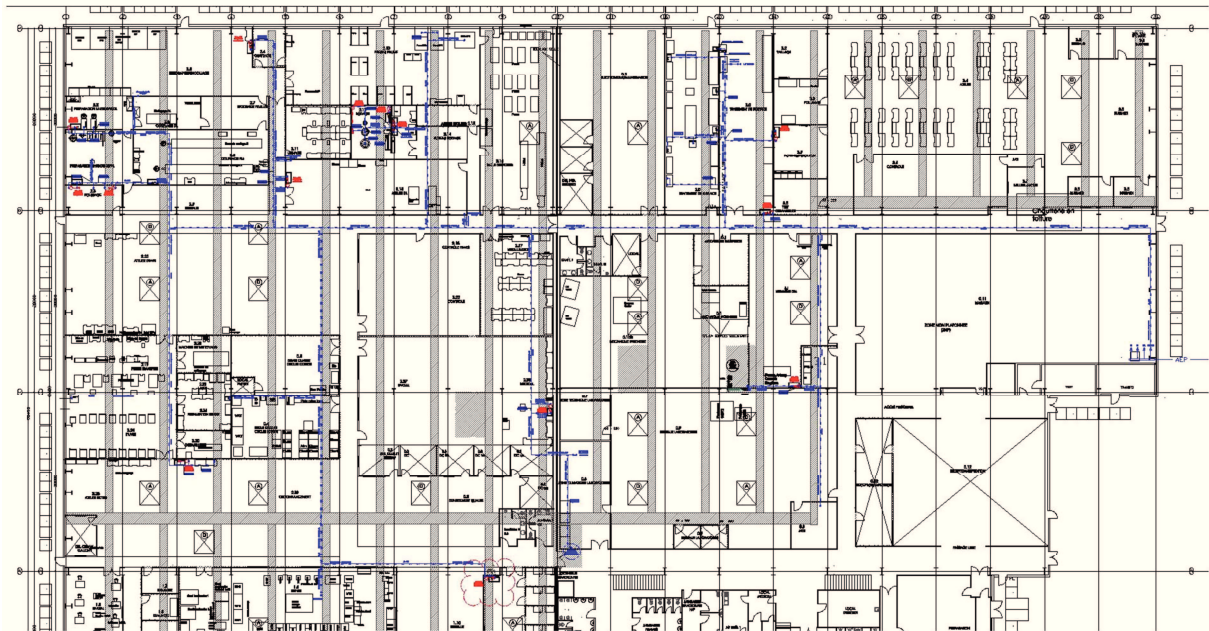


Figure 32 : Réseau d'évacuation en dépression

4.4. Sélection par rapport au critère de flexibilité

Les possibilités du système sont estimées par l'aire couverte par les deux possibilités d'évolution les moins onéreuses. En effet, le décisionnaire écarte a priori la solution qui consiste à creuser une nouvelle tranchée car son coût est supérieur à son seuil d'acceptabilité.

Ainsi présenté, le système en dépression couvre l'ensemble des 10 000m² de l'usine pour des évolutions futures alors que le système gravitaire ne couvre localement qu'un disque de 10m de rayon autour de chacune des attentes ce qui représente une aire totale de 3 800m² pour 12 attentes prévues. Bien que la possibilité de creuser une tranchée permettrait de couvrir la même superficie que le système en dépression.

Le choix se porte donc sur le système en dépression suite au critère de flexibilité ainsi évalué en fin de processus de décision. Cependant, deux questions peuvent être posées à la suite de ce résultat :

- 1) L'ensemble des possibilités offertes par le système en dépression est-il nécessaire ?

- 2) Intégrer la flexibilité en amont du processus de décision et inclure dans l'objectif une caractérisation de la flexibilité souhaitée à travers une certaine morphologie de l'espace des potentialités, c'est-à-dire des espaces à couvrir pour un coût d'évolution en dessous du seuil d'acceptabilité du décisionnaire aboutirait-il au même résultat ?

4.5. Performance économique du résultat

La valeur actualisée nette permet de prendre en compte la composante temporelle dans le calcul économique d'un investissement. Nous limiterons notre horizon temporel à celui de la période d'amortissement de la centrale du système en dépression, c'est à dire à 10 ans. D'une part, nous évaluons le coût d'installation des deux réseaux respectifs : le réseau gravitaire (Tableau 23) et le réseau en dépression (Tableau 24).

Poste	Quantité	Prix Unitaire	Total
<i>Tranchées</i>	200	52,84 €	10 568,00 €
<i>Regards</i>	10	171,33 €	1 713,30 €
			6 997,30 €

Tableau 23 : Coût d'installation du système gravitaire

Poste	Quantité	Prix Unitaire	Total
<i>Centrale</i>	1	43 761,05€	43 761,05€
<i>Boîtier</i>	24	2 601,12 €	2 601,12 €
<i>Réseau</i>	1	7 098,19 €	7 098,19 €
			53 460,36 €

Tableau 24 : Coût d'installation du système en dépression

D'autre part, nous évaluons le coût d'évolution de ces systèmes :

- Ce coût correspond, pour le réseau en dépression, à celui de l'installation d'un boîtier supplémentaire (Tableau 25 & Figure 33).

Poste	Quantité	Prix Unitaire
Boîtier	1	2 601,12 €
Raccordement	Loi Normale N(1 ;0,1)	400,00 €
Main d'œuvre	Loi Exponentielle E(0,7) majorée de 7 unités	400,00 €

Tableau 25 : Coût pour l'installation d'un boîtier supplémentaire

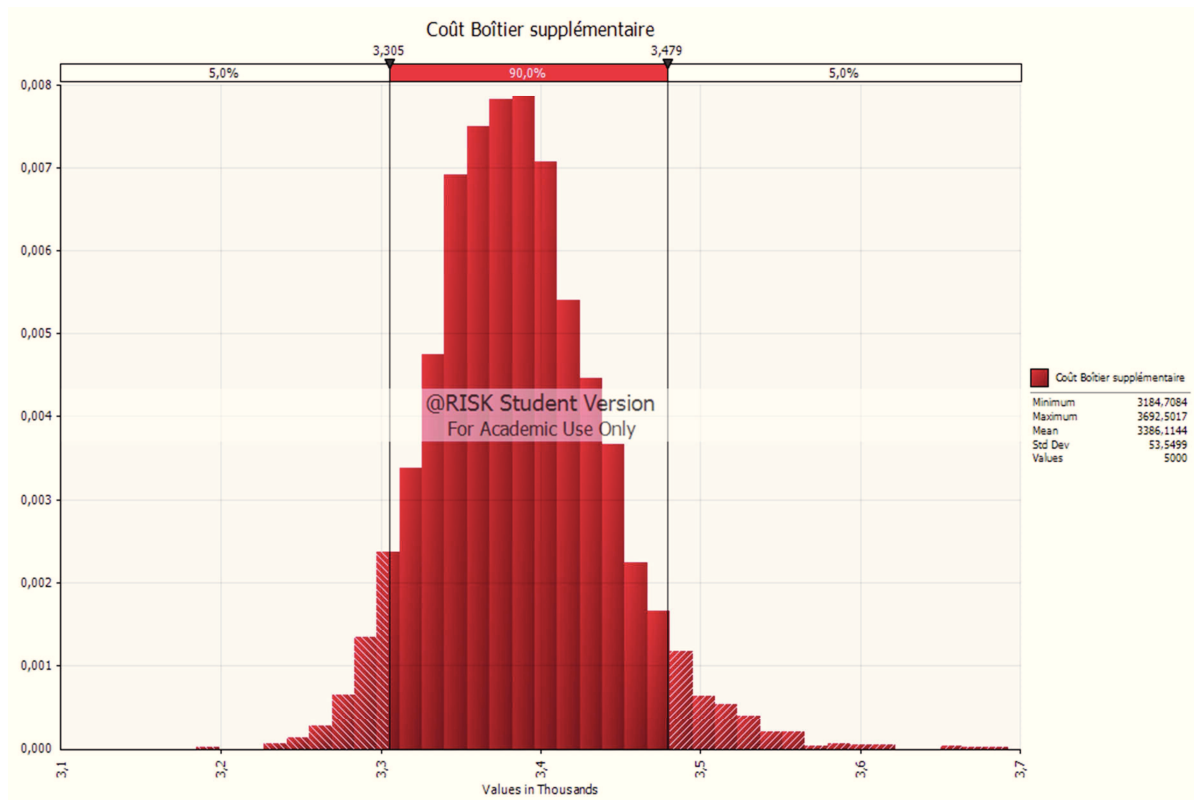


Figure 33 : Coût d'évolution du système en dépression

- Par contre, le réseau gravitaire présente deux alternatives : soit un raccordement simple à une attente (Tableau 26 & Figure 34), soit une modification du réseau lui-même (Tableau 27 & Figure 35).

Poste	Quantité	Prix Unitaire
<i>Raccordement</i>	1	40,00 €
<i>Main d'oeuvre</i>	Loi Exponentielle E(0,3) majorée de 3 unités	50,00 €

Tableau 26 : Coût d'un raccordement à une attente

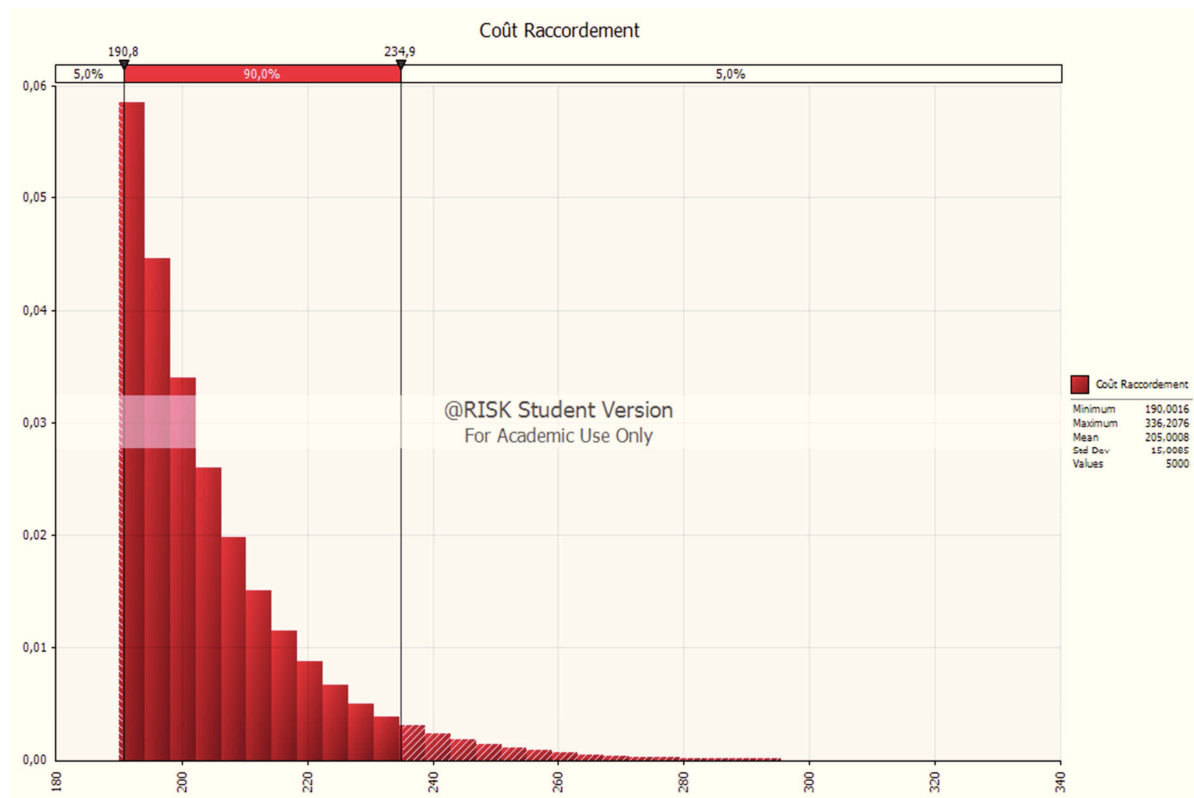


Figure 34 : Coût d'évolution du système gravitaire dans le cas d'un raccordement

Poste	Quantité	Prix Unitaire
<i>Location Matériel</i>	Loi Discrète P(1) = 0,7 P(2) = 0,2 P(3) = 0,1	200,00 €
<i>Matériaux</i>	Loi Normale (1 ;0,1)	600
<i>Main d'oeuvre</i>	Loi Exponentielle E(5) majorée de 50 unités	50,00 €
<i>Perte d'exploitation</i>	Loi Exponentielle E(0,5) majorée de 5 unités	2 000,00 €

Tableau 27 : Coût d'une tranchée supplémentaire

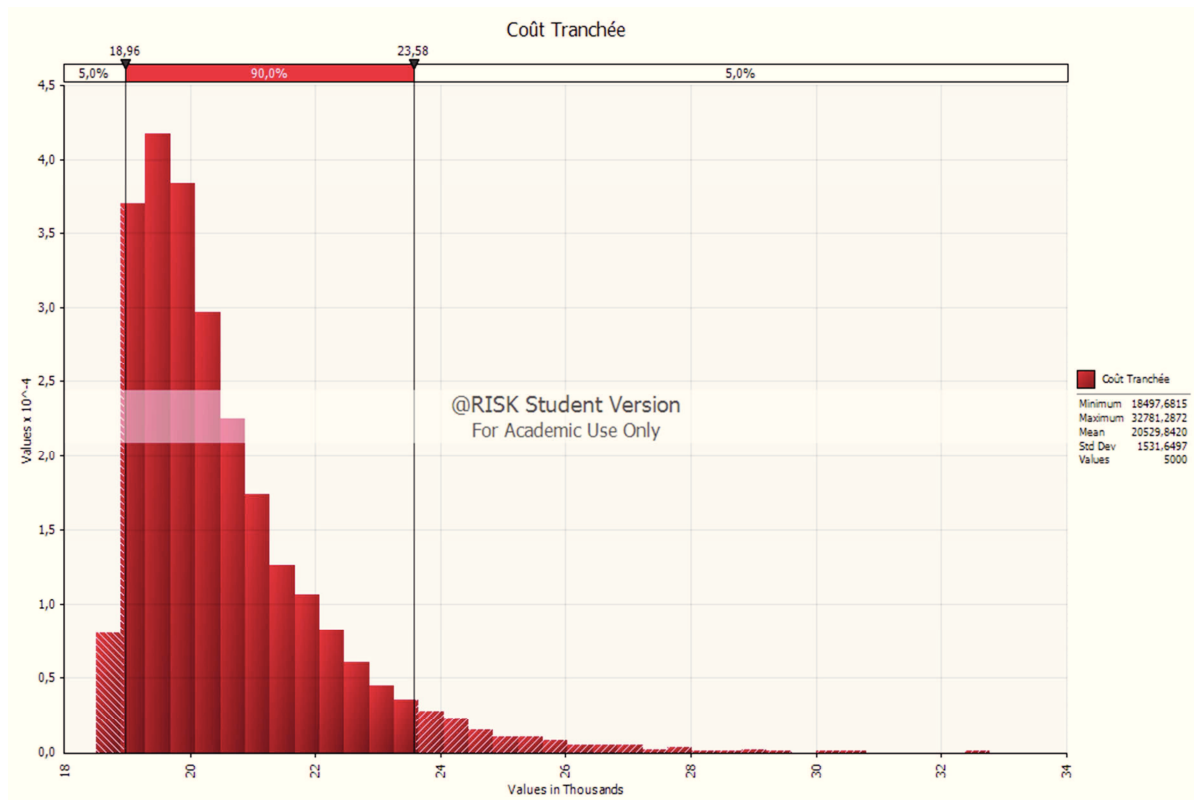


Figure 35 : Coût d'évolution du système gravitaire dans le cas du creusement d'une nouvelle tranchée

Dans ce dernier cas, les décideurs favoriseront en pratique le raccordement simple même si cela implique des contraintes supplémentaires sur le positionnement des équipements. Seuls des événements imprévisibles peuvent conduire les décideurs à opter pour la modification du réseau. Nous avons choisi d'introduire une variable aléatoire A suivant une loi de probabilité uniforme continue sur l'intervalle [0 ;1], dans un premier temps, afin de modéliser le caractère incertain de ce phénomène. Ensuite, nous verrons quels impacts peuvent avoir les décisions concernant les paramètres des réseaux sur cette incertitude.

$$\text{Coût d'une évolution du réseau gravitaire} = A \cdot CR + (1-A) \cdot CT$$

Avec CR = coût du raccordement et CT = coût d'une nouvelle tranchée

D'autre part, nous évaluons également le nombre d'évolutions du réseau par année par une loi de poisson de paramètre $\lambda=3$. Ce nombre a été obtenu par l'expérience des dirigeants de l'usine actuelle d'EUROFARAD qui estiment à 3 le nombre de modifications du réseau d'évacuation d'eau par an.

La modélisation des différentes composantes intervenant dans le calcul économique est intimement liée à la manière dont ont été collectées les données chiffrées. Afin de rester au

plus proche de la problématique des décideurs d'EUROFARAD et de leur perception de leur environnement, nous avons agrégé des données de deux natures différentes :

- 1) Les données propres aux installations des deux systèmes, issues des consultations auprès des entrepreneurs pour leurs prix unitaires et dont les quantités sont des variables de décision. Ces données sont considérées comme certaines.
- 2) Les données propres aux coûts d'évolution de ces deux systèmes pour lesquelles il est nécessaire de recourir à l'expérience des décideurs d'EUROFARAD pour les estimer.

Ainsi, pour modéliser l'incertitude de ces données par une loi de probabilité réaliste en ce qui concerne le coût d'un raccordement aux attentes du système gravitaire ou bien pour le creusement d'une nouvelle tranchée, nous avons choisi comme variables les quantités de chacun des postes intervenant dans ces coûts.

Dans un premier temps, nous comparons les deux systèmes proposés pour répondre au besoin actuel d'EUROFARAD en matière d'évacuation d'eau. Le système en dépression est constitué d'une centrale et de 24 boîtiers. Le système gravitaire se résume quant à lui en une centaine de mètres de tranchées.

La différence des valeurs actualisées nettes $\Delta VAN = VAN_{\text{système gravitaire}} - VAN_{\text{système en dépressio}}$ sur une période de 10 ans à un taux de 5% de ces deux scénarii montre que le système en dépression est plus efficient avec une probabilité de 78% d'avoir un ΔVAN positif (Figure 36).

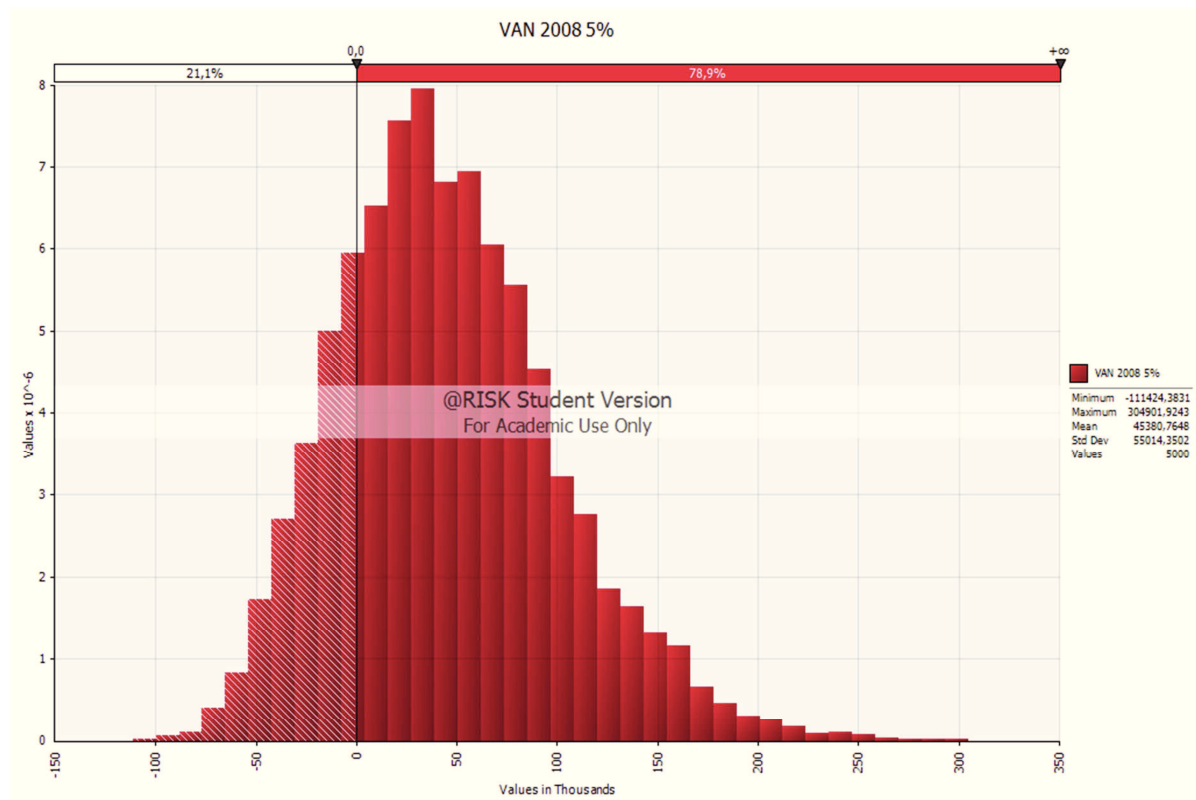


Figure 36 : Δ VAN sans optimisation du réseau gravitaire

5. Approche par le dimensionnement de l'espace des potentialités

5.1. L'intégration de la flexibilité en amont du processus de décision

La prise en compte de la flexibilité en amont du processus de décision nécessite de pouvoir caractériser la flexibilité souhaitée au niveau de l'objectif. Or, cet exercice n'est pas réalisable à partir des définitions particulières de la flexibilité existantes, ni même à partir des mesures proposées pour lesquelles il est extrêmement difficile de définir un niveau souhaité a priori. En effet, ces outils permettent essentiellement une analyse comparative entre différents systèmes évalués sur le même type de flexibilité.

Pour éviter d'aboutir à une maximisation des possibilités offertes par le système il faut offrir la possibilité de décrire son besoin sous la forme d'un objectif. Le concept de potentialité permet alors de caractériser le besoin en décrivant une certaine morphologie de

l'espace des potentialités. Celle-ci s'articule autour de l'espace de flexibilité au sein duquel le coût de déplacement d'une potentialité à l'autre est considéré comme nul pour le décisionnaire.

Dans notre exemple, cela revient à privilégier l'utilisation de raccordements à la création de nouvelles tranchées pour le système gravitaire. Ceci suppose dans la conception du système de transformer le coefficient aléatoire A utilisé précédemment en une constante dépendant des caractéristiques intrinsèques du système.

5.2. Morphologie de l'espace des potentialités par échantillonnage des états atteignables

L'exemple du système d'évacuation des eaux permet de représenter facilement l'espace des potentialités et en particulier l'espace de flexibilité de façon spatiale à l'aide du plan de l'usine. En effet, l'espace des états atteignable est composé des n -uplets décrivant le nombre de points d'évacuation du réseau et la position de chacun d'eux.

Pour la création de cette infrastructure, l'espace de flexibilité souhaité doit permettre au système d'évoluer en cas de modification de l'implantation des équipements et de leur nombre. Celui-ci comprend tous les états comportant de 0 à 30 points d'évacuation avec la possibilité de les localiser n'importe où sur le plan du site. Ceci revient à dire que le système en dépression doit avoir une pompe à vide dont la capacité permette une augmentation de 8 points supplémentaires et dans le cas du système gravitaire, que la conception du réseau permette des évolutions en utilisant des raccordements uniquement.

Les espaces de flexibilité des réseaux conçus précédemment sont les suivants pour un nombre de points d'évacuation de 0 à 30 :

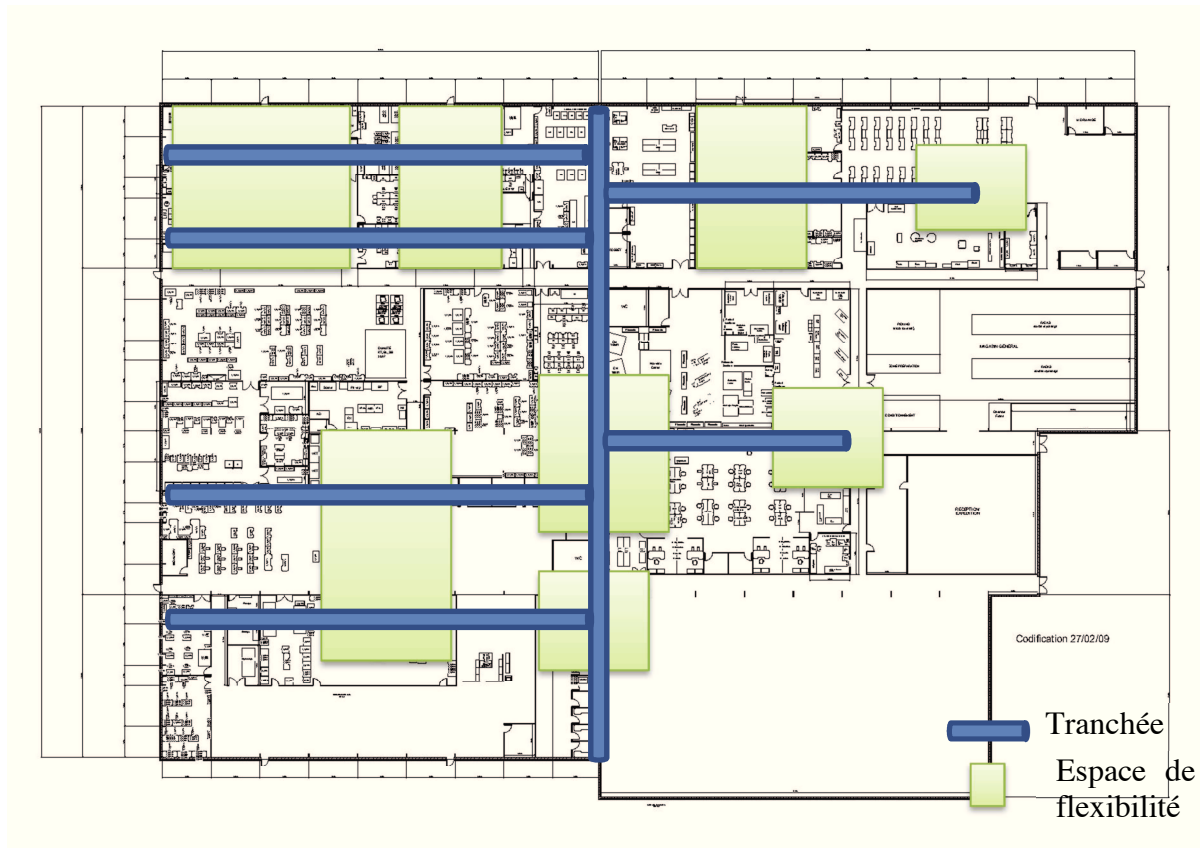


Figure 37 : Espace de flexibilité du réseau gravitaire initial

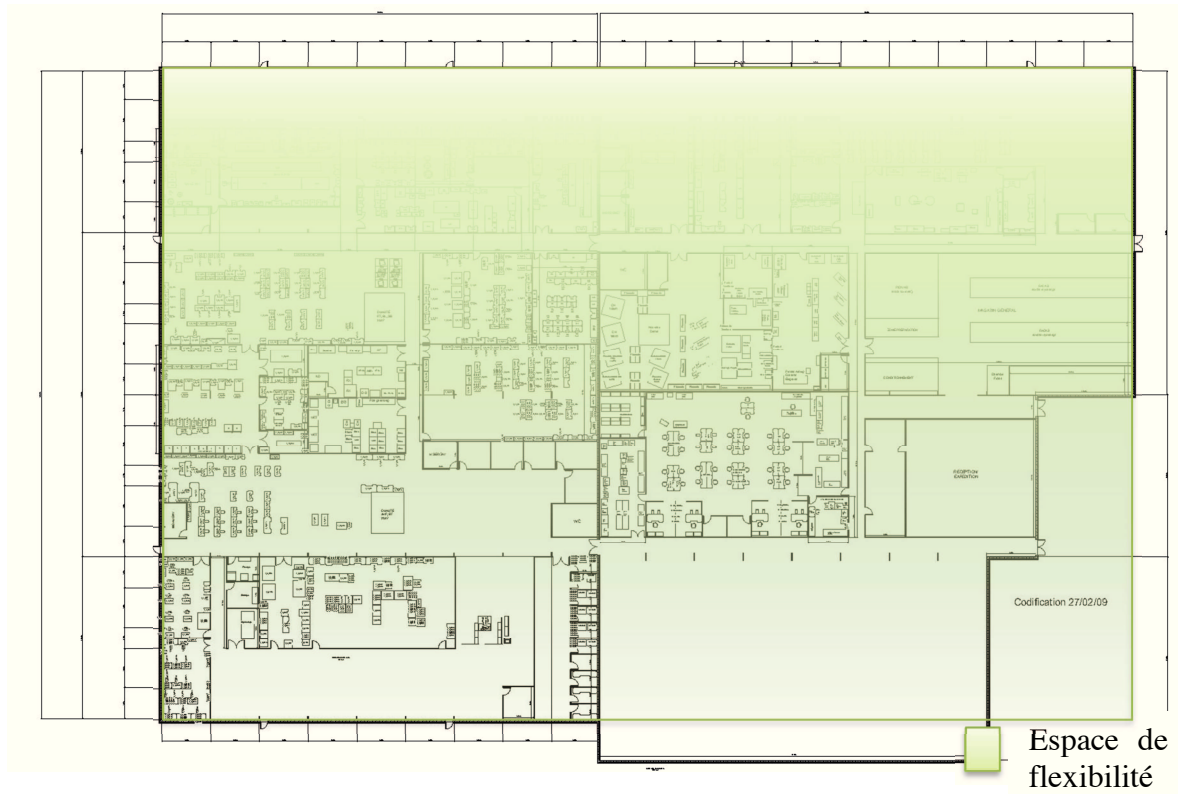


Figure 38 : Espace de flexibilité du système en dépression

La représentation des espaces de flexibilité respectifs des deux réseaux fait apparaître que le système gravitaire ainsi conçu n'atteint pas l'objectif assigné. L'architecte aurait donc fait évoluer l'instanciation des variables de décision propres à ce réseau pour obtenir un maillage plus fin et la solution suivante :

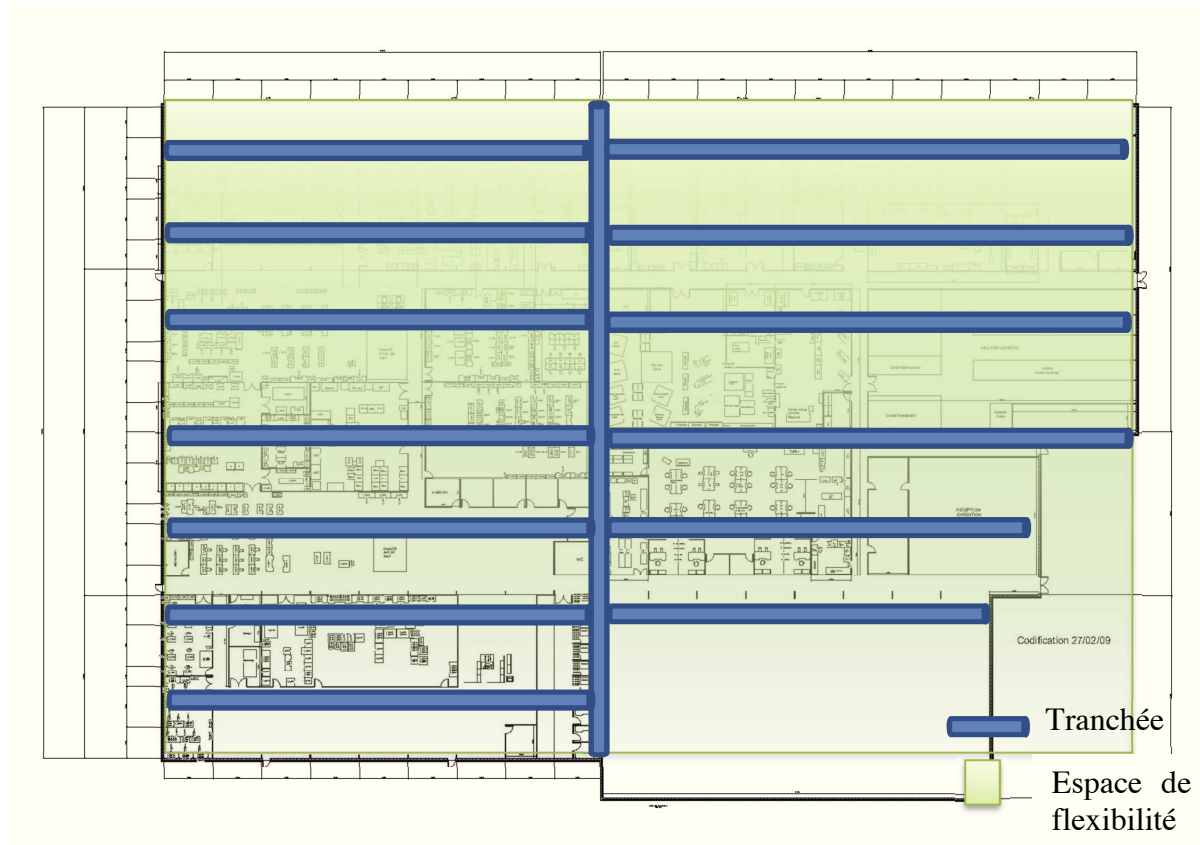


Figure 39 : Espace de flexibilité du réseau gravitaire pour répondre à l'objectif

On peut visualiser facilement la morphologie de l'espace des potentialités dans ce problème car les variables de décision à remettre au système pour lui permettre d'évoluer en fonction du flux d'information traduisent un problème dans l'espace qui correspond à l'implantation de l'usine (cf. plan support des Figures 37 à 39). On remarque que dans cette approche l'objet n'est pas de viser une situation mais bien un ensemble de potentialités. Le critère devient un critère de coût d'où l'introduction de la notion d'efficacité pour ce problème de flexibilité.

La description ou morphologie de l'espace de décision peut être complétée par les profils de coût suivants pour ne pas se limiter à l'espace de flexibilité. Cet outil, permet notamment d'agir si nécessaire sur cette morphologie dans une perspective d'agilité au sens d'évolution de l'espace des potentialités et en particulier de l'espace de flexibilité.

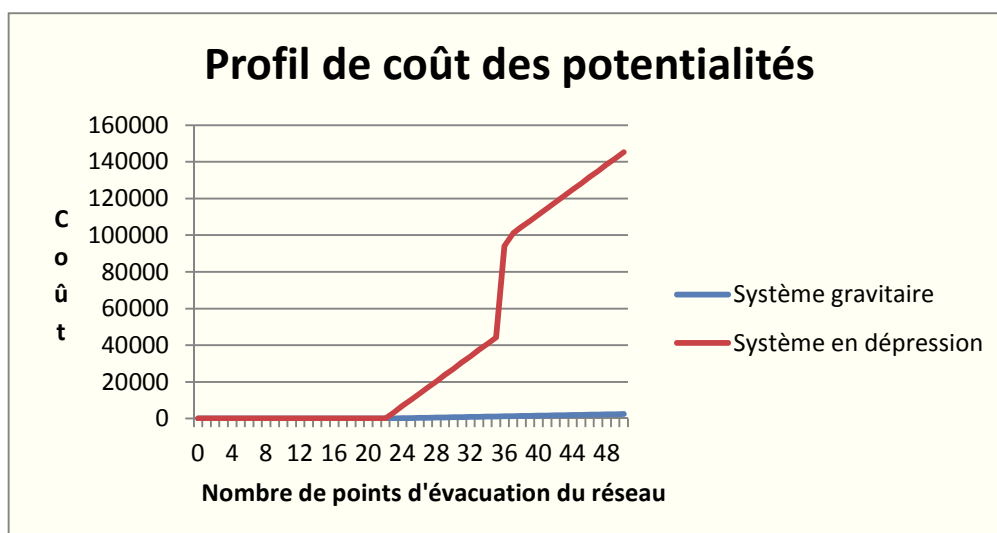


Figure 40 : Comparaison des profils de coût des potentialités

5.3. Performance économique du résultat

Nous avons vu dans le paragraphe précédent qu'il est possible de modifier la limite entre les deux types de coûts de déplacement au sein de l'espace des potentialités du système gravitaire en concevant un réseau avec un maillage plus fin. Cette option a pour conséquence d'augmenter le nombre de mètres linéaires de tranchées à l'installation du réseau et donc d'en augmenter le coût (Tableau 28), mais elle permet également de privilégier le raccordement à une attente du réseau pour les évolutions futures du système. En effet, un réseau munit d'attentes espacées de 20 mètres permet de se raccorder à celui-ci sans avoir à creuser de tranchées sur l'ensemble de la zone de production. Ainsi, le coefficient A peut être perçu, non plus comme une variable aléatoire, mais comme un coefficient que nous prendrons égal à 0,8 :

Coût d'une évolution du réseau gravitaire = $0,8*CR+0,2*CT$

Poste	Quantité	Prix Unitaire	Total
<i>Tranchées</i>	1000	52,84 €	52 840,00 €
<i>Regards</i>	30	171,33 €	5 139,90 €
			57 979,90 €

Tableau 28 : Nouveau coût d'installation du système gravitaire

Dans cette nouvelle configuration, la différence des valeurs actualisées nettes $\Delta VAN = VAN_{\text{système gravitaire}} - VAN_{\text{système en dépressio}}$ sur une période de 10 ans à un taux de 5% de ces deux scenarii montre que le système gravitaire est plus efficient avec une probabilité de 99% d'avoir un ΔVAN négatif (Figure 41).

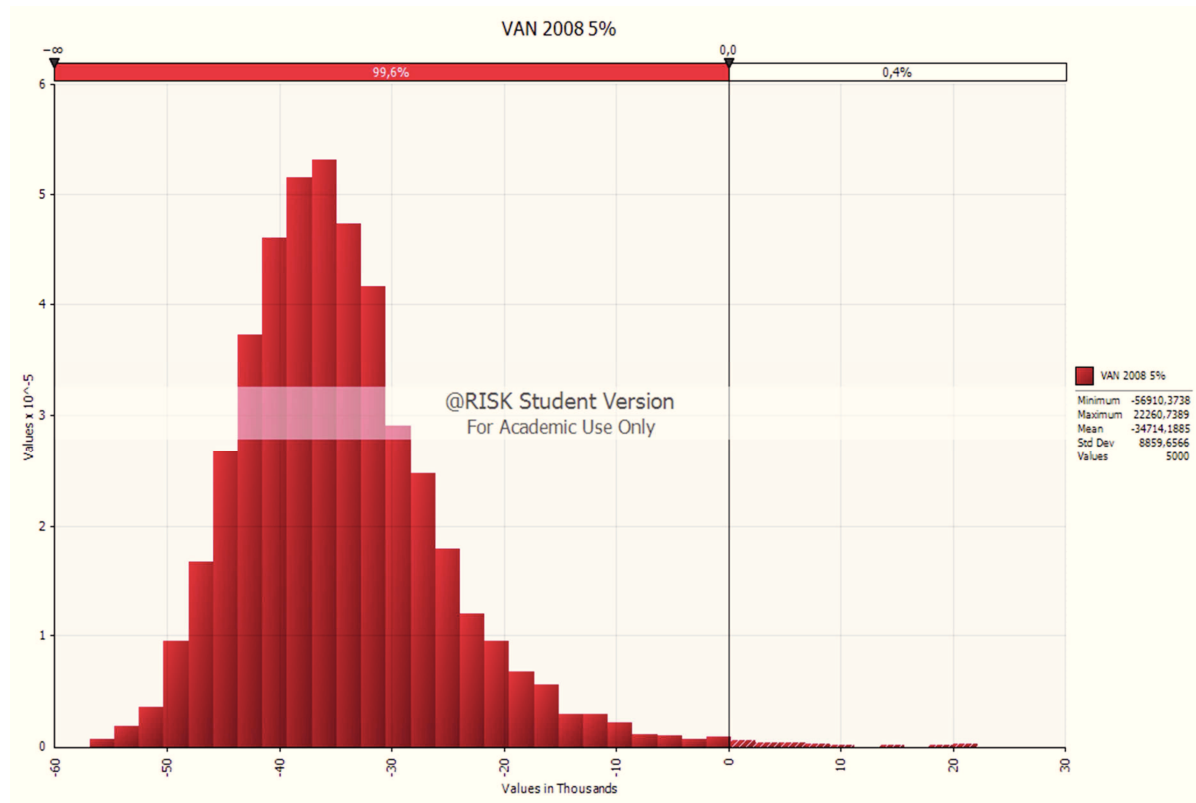


Figure 41 : ΔVAN après optimisation du réseau gravitaire

5.4. Bilan de la méthode appliquée à la partie opérante d'un système

Après avoir proposé la notion de potentialité comme dénominateur commun à la diversité des définitions de la flexibilité, nous avons utilisé le principe du bilan différentiel et une méthode de simulation de Monte-Carlo pour optimiser la flexibilité d'un réseau d'évacuation d'eau pour le nouveau site industriel d'EUROFARAD.

Nous avons proposé une alternative au paradigme actuel selon lequel la flexibilité devait être maximisée en tant que facteur clé de succès pour les systèmes productifs en univers incertain. Nous préférons concevoir la flexibilité comme un levier d'action du système productif qui mérite d'être dimensionné par rapport à un besoin exprimé en termes de

potentialités et d'espace de flexibilité. Nous avons choisi pour cette étude le calcul de la valeur actualisée nette comme critère d'efficience.

Après avoir étudié la conception de la partie opérante d'infrastructures à travers le chapitre précédent, nous allons maintenant nous intéresser au rôle de la partie décisionnelle dans la conception et l'utilisation d'un système flexible. La périodicité du processus de décision étudié et lié au management de l'équipe logistique permet, après avoir suivi l'année de démarrage de ce nouveau service, de valider empiriquement notre méthodologie et souligner l'importance de la fonction décisionnelle dans la mise en œuvre de la flexibilité. Cette étude montre qu'être flexible, ce n'est pas seulement disposer de potentialités adaptées, mais c'est également savoir les exploiter à bon escient.

CHAPITRE V. Dimensionnement de la partie décisionnelle, Application à la conception du département logistique de l'usine EUROFARAD de Chanteloup-en-Brie

Ce dernier chapitre intègre le flux d'information comme composante à part entière d'un système mettant en œuvre sa flexibilité.

Dans une première partie nous nous attacherons à établir un état des lieux de la structure préexistante.

La deuxième partie décrira le processus de dimensionnement des principales composantes du département logistique créé sur le nouveau site industriel.

La troisième partie s'intéresse à la dimension fonctionnelle de chacune des activités du département logistique.

La quatrième partie dimensionne la partie opérante à l'instar du chapitre V pour le système d'évacuation des eaux avant de poursuivre vers l'intégration du flux d'information comme composante du système pour mettre en œuvre sa flexibilité souhaitée. Puis, nous validerons notre démarche par la présentation de quelques indicateurs de performance propres au département logistique.

1.	APPLICATION INDUSTRIELLE : LA CONSTITUTION D'UN DEPARTEMENT LOGISTIQUE	127
1.1.	LA STRUCTURE PREEXISTANTE	127
1.2.	DES PROCESSUS DE PRODUCTION HETEROGENES	129
2.	DIMENSIONNEMENT DU MAGASIN CENTRAL.....	131
2.1.	LA CAPACITE DE STOCKAGE.....	131
2.2.	LES CONFIGURATIONS DE RANGEMENT	135
2.3.	LES MOYENS DE MANUTENTION	136
3.	DESCRIPTION DES ACTIVITES OPERATIONNELLES DU DEPARTEMENT LOGISTIQUE	137
3.1.	LA RECEPTION	139
3.2.	LA PREPARATION DES MATIERES POUR LES ATELIERS	140
3.3.	LE CONDITIONNEMENT	140
3.4.	L'EXPEDITION.....	141
4.	DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE OPERANTE	141
4.1.	L'EQUIPEMENT DE STOCKAGE.....	142
4.1.1.	<i>Analyse des risques</i>	<i>142</i>
4.1.2.	<i>Définition de l'espace de flexibilité.....</i>	<i>144</i>
4.1.3.	<i>Choix lors de la conception.....</i>	<i>145</i>
4.2.	DIMENSIONNEMENT DE L'EFFECTIF	145
4.2.1.	<i>Analyse des risques</i>	<i>145</i>
4.2.2.	<i>Définition de l'espace de flexibilité.....</i>	<i>147</i>
4.2.3.	<i>Choix lors de la conception.....</i>	<i>148</i>
5.	VALIDATION EMPIRIQUE.....	150

1. Application Industrielle : La constitution d'un département Logistique

1.1. La structure préexistante

La crise mondiale de 2008 a mis une nouvelle fois en évidence la stabilité en termes de performances économiques de la société EUROFARAD et plus largement maintenant, celle du groupe EXXELIA. Cette stabilité résulte essentiellement de deux facteurs principaux complémentaires à commencer par la nature du marché sur lequel notre groupe se positionne mais également par la diversité des technologies et gammes de produits développées au sein de la mosaïque de business models qui le compose.

Chaque centre de profits d'EUROFARAD était constitué à l'usine de Lagny sur Marne de 5 fonctions principales dont l'importance et le développement était relatif aux différents business models :

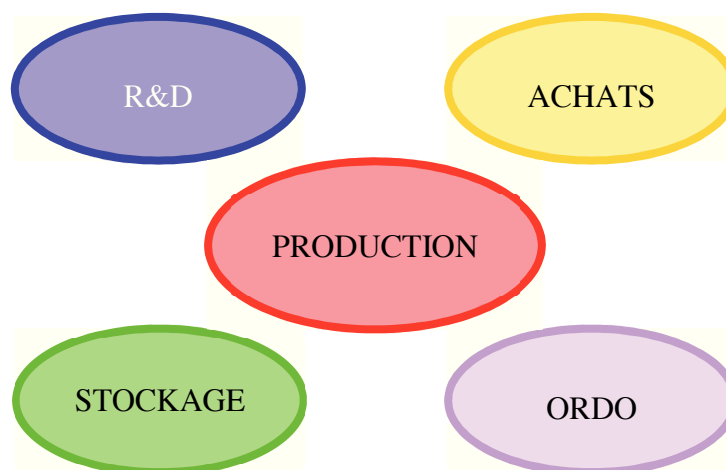


Figure 42 : Fonctions des centres de profits

Ainsi, l'implantation des différents ateliers de production au sein de l'usine EUROFARAD de Lagny sur Marne traduisait sur le plan spatial l'organisation de la société en Business Unit autonomes. Cette structure était historiquement liée aux fusions-acquisitions successives de PME/PMI ayant jalonné et soutenu la croissance de l'entreprise. Si à l'échelle du groupe, les performances économiques témoignent de la flexibilité de la structure face aux fluctuations des paramètres environnementaux du marché, les contraintes organisationnelles

résultant de la juxtaposition des différents centres de profits en limitait leur flexibilité opérationnelle.

L'absence de fonctions transversales, en dehors du département Qualité et de la fonction Commerciale, a longtemps entretenu l'herméticité des frontières entre les différentes Business Unit centrées sur leur ligne de produit. Chacune des fonctions supports aux activités de production était dédiée et orientée produit ce qui a inévitablement entraîné une multiplication de ces micro-structures. Les services administratifs de ces secteurs devaient traiter indifféremment les problèmes d'approvisionnement, d'ordonnancement, et plus largement la gestion de la *supply chain* sans véritable spécialisation et montée en compétences du personnel chargé de ces fonctions pourtant distinctes. Ce phénomène a empêché durant des années la société EUROFARAD d'atteindre une taille critique pour certaines de ces fonctions comme la logistique.

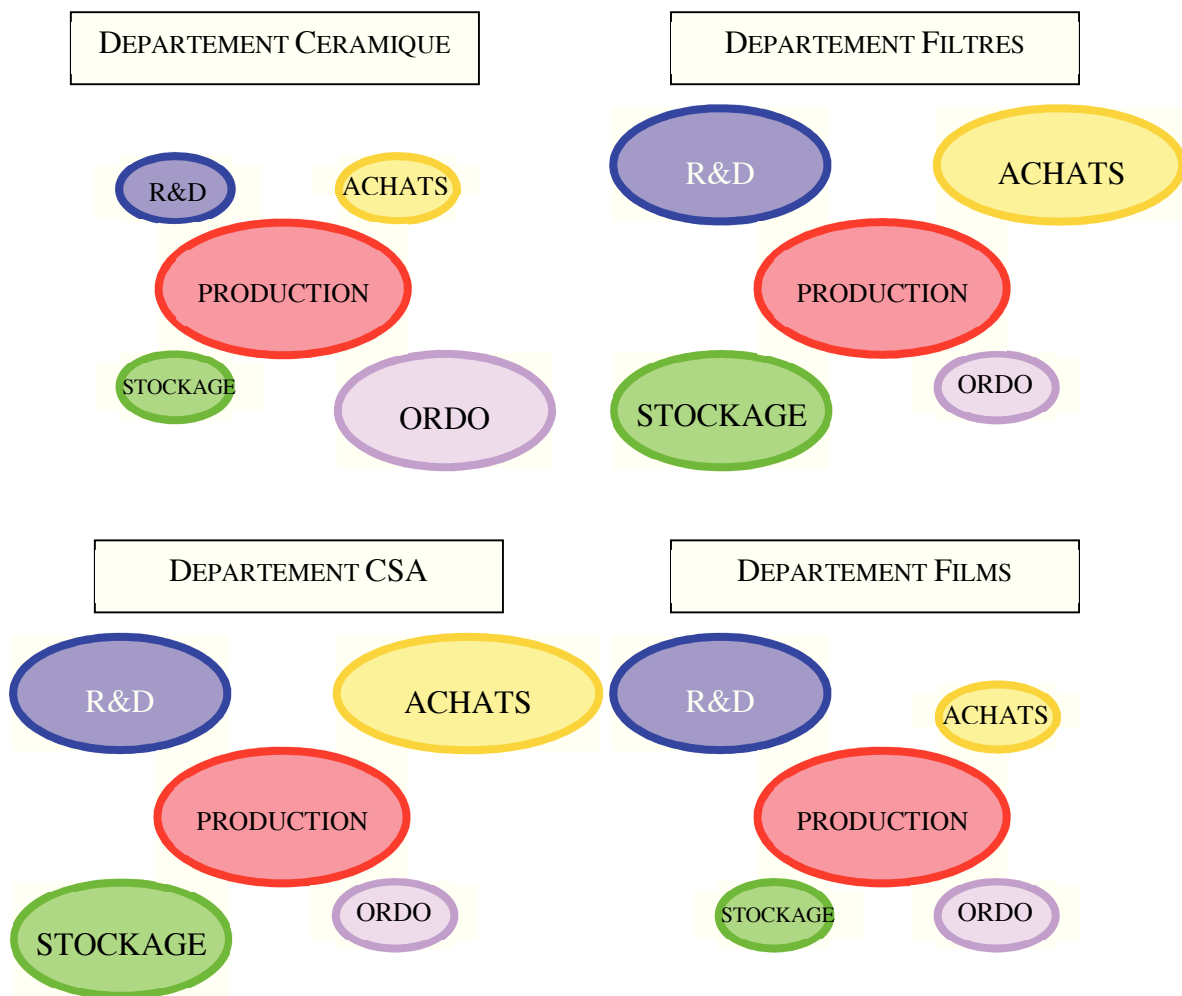


Figure 43 : Importance relative des fonctions au sein des différents centres de profits

Nous verrons par la suite que la constitution d'un département logistique unique et l'homogénéisation des méthodes de gestion des flux physique et d'information permettra une massification des flux de nature à minimiser l'amplitude des fluctuations de charge, augmenter la stabilité du fonctionnement de cette fonction et diminuer le gaspillage des ressources à travers l'élargissement de l'espace de flexibilité par la suppression de contraintes organisationnelles.

1.2. Des processus de production hétérogènes

En 1996, Pittiglio Rabin Todd & McGrath (PRTM) and AMR Research créèrent le Supply Chain Council (SCC). Cette organisation à but non lucratif, composé à l'origine de 69 sociétés américaines et qui regroupe aujourd'hui près de 1 000 sociétés internationales, a mis au point le modèle SCOR (Supply Chain Operations Reference model) qui s'attache à décrire sur la base de 5 processus le fonctionnement de toute Supply Chain qu'il s'agisse d'une entreprise industrielle ou bien d'une société de services.

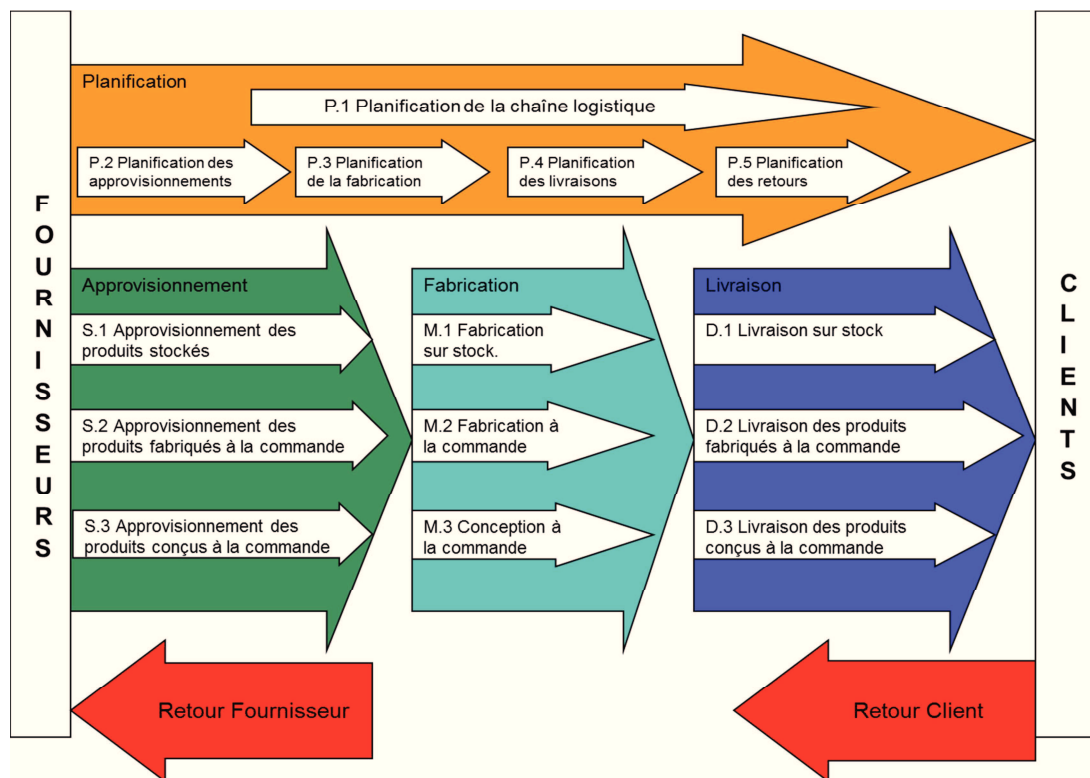


Figure 44 : Niveau 2 du modèle SCOR

Au regard de cette grille de lecture, nous nous apercevons que le processus prépondérant dans l'activité de la société EUROFARAD est celui de la fabrication. En effet,

ce processus va parfois jusqu'à se substituer au processus de planification et dans tous les cas rythme les autres processus. Ce déséquilibre a conduit à deux réactions diamétralement opposées :

- a) Soit une atrophie des organes supports faute de développement suffisant (Figure 43)
- b) Soit un surdimensionnement de ceux-ci pour absorber les fluctuations résultant du processus de fabrication, source de gaspillage.

Cette réaction, loin d'être aléatoire, est le fruit de l'adaptation des business units par rapport à leur cycle de production et de leur business model. En effet, nous nous apercevons que la typologie présentée par le modèle SCOR pour le processus de fabrication se manifeste dans sa diversité au sein de l'entreprise EUROFARAD. Tout le gradient de la fabrication sur stock à la conception sur cahier des charges est présent non seulement entre les différents centres de profits mais au sein de ceux-ci également.

Ainsi, les départements comme le CSA et les Filtres qui ont un nombre de références par nomenclature plus de dix fois supérieur à ceux des départements Céramique et Films, ont développé la fonction stockage afin de faciliter l'approvisionnement des ateliers de production sur la base de listes à servir. Quant aux départements Céramique et Films, cette fonction a historiquement fusionné avec le processus de fabrication lui-même en considérant la préparation des matières dans le cycle de fabrication. Les conséquences sur les équipements de stockage et leurs potentialités sont importantes comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

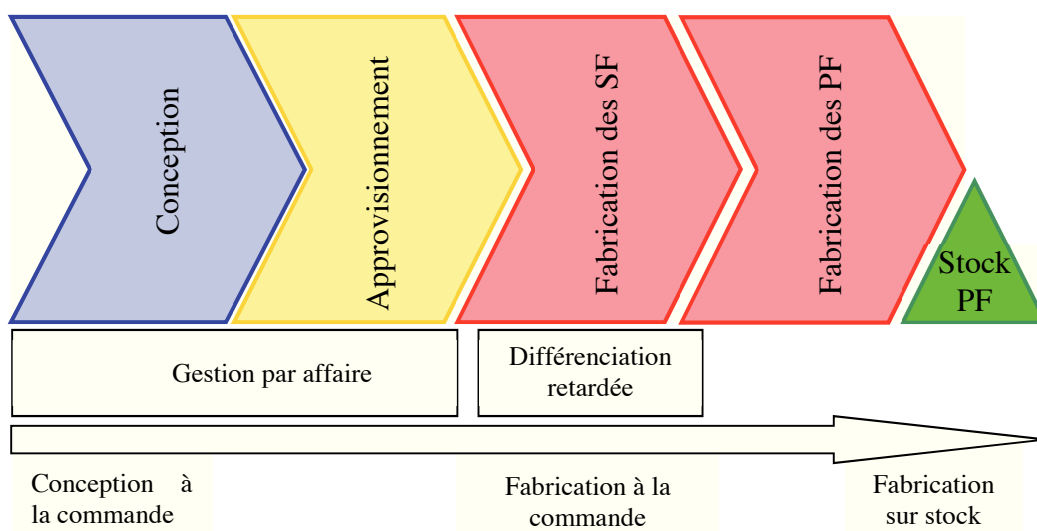


Figure 45 : Processus

EUROFARAD regroupe au sein de ces BU les différents types de cycles de production :

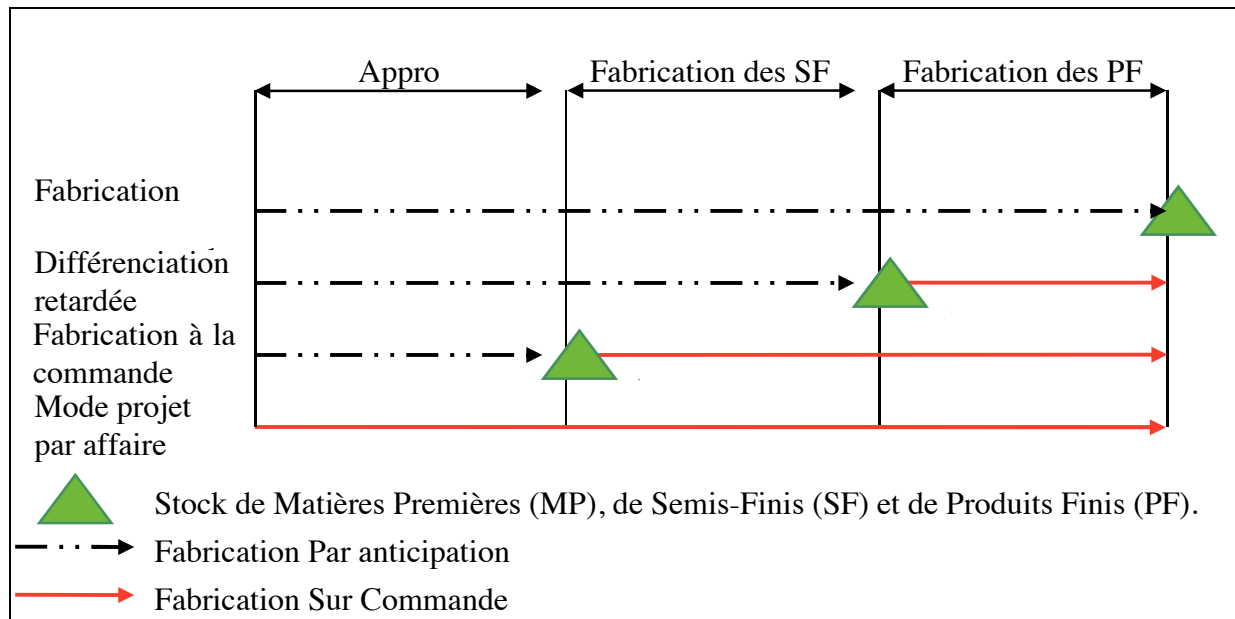


Figure 46 : Cycles de production

2. Dimensionnement du magasin central

Les potentialités d'un système de stockage peuvent être décrites selon 3 dimensions principales, à savoir : la capacité de stockage, les configurations possibles pour le rangement des références et les moyens de manutention. Nous représenterons donc chaque potentialité de ce système par un triplet [a ; b ; c] conformément à la modélisation décrite dans le chapitre précédent avec a, la capacité de stockage, b, le nombre de configurations et c le nombre de conditionnements gérés par les moyens de manutention.

2.1. La capacité de stockage

En ce qui concerne le premier élément du triplet décrivant l'espace des potentialités, la capacité de stockage, le besoin actuel a été estimé à travers le volume stocké dans les différentes unités de stockage existantes au sein de l'usine de Lagny sur Marne.

<i>Département</i>	<i>Volume des stocks</i>
CSA	65m ³
Films	180m ³
Céramique	280m ³
Filtres	80m ³
Total :	605m³

Tableau 29 : Capacité de stockage utilisée

Ce volume était réparti sur près de 1 000m² au sein de l'usine soit près de 10% de la surface de production qui représentait 10 000m² :

- 450m² pour le département céramique
- 200m² pour le département film
- 100m² pour le département CSA
- 200m² pour le département Filtres

D'autre part, le nombre de références stockées éclaire sur la nature de l'activité et le business model associé à ces différentes unités (Tableau 31).

STOCK MP		CHANTELOUP									
Secteur	Céramique	CSA		Filtres Miniatures		Films		Filtres Puissance		TOTAL	
Nombre de références stockées	805	4793		718		1837		2808		10 961	
Nombre de références sans consommations	334 41%	2641 55%	320 45%	905 49%	1356 48%	5 556 51%					
Nombre de références sans mouvements	223 28%	1764 37%	82 11%	541 29%	705 25%	3 315 30%					
Nb réf. Rotation > 12 MOIS	215 27%	681 14%	303 42%	369 20%	362 13%	1 930 18%					
Nb réf. Rotation < 12 MOIS	260 32%	1487 31%	98 14%	664 36%	1094 39%	3 603 33%					

Tableau 30 : Nombre de références stockées et niveau de rotation des stocks par secteur

Le tableau précédent fait apparaître des natures de stock profondément différentes d'un secteur à l'autre. Ces différences résultent de la nature de l'activité. En effet, les activités du CSA comme des Filtres sont principalement basées sur la gestion d'affaires ou encore sur un pilotage de type conception à la commande sur des produits composés d'une centaine de composants. Ainsi, le nombre de références stockées est important mais en quantité limitée car ceux-ci correspondent essentiellement aux reliquats des affaires. Ceci explique que la surface utilisée soit réduite. 80m² sont nécessaires pour stocker les 4793 références du CSA contre 450m² pour les 805 références de la Céramique.

Cependant, une description du pilotage du processus de fabrication par business unit masquerait l'intérêt essentiel de la fusion de ces unités de stockage. En effet, si chacun des business unit présente un mode de pilotage prépondérant, toute la palette se côtoie au sein d'un même département. De fait, cette complexité ne peut être gérée par chacune des unités logistiques prise isolément. C'est pour cette raison, que pour chaque département un mode unique de gestion a été privilégié en se privant des avantages présentés par les autres modes de gestion des flux existants dans les autres secteurs. Ainsi, au lieu d'offrir une gestion

adaptée aux caractéristiques des références, celle-ci était induite par le pilotage du processus de fabrication du secteur concerné (MTS pour « Make-to-Stock » ou Fabrication sur stock, MTO pour « Make-to-Order » ou Fabrication à la commande et ETO pour « Engineer-to-order » ou conception à la commande).

Département	MTS	MTO	ETO
CERAMIQUE	1	2	3
FILMS		1	2
CSA		2	1
FILTRES	3	1	2

1 : haute importance, 2 : importance moyenne, 3 : faible importance relative

Tableau 31 : Répartition des modes de pilotage entre les business unit par ordre d'importance

Le dimensionnement du stockage pour le nouveau site de production a exploité une des potentialités du nouveau bâtiment, à savoir la hauteur sous plafond. Quand celui-ci était limité à une hauteur standard de 2,8m à Lagny sur Marne, la nouvelle structure offrait la possibilité de monter jusqu'à 8m ce qui a permis de disposer d'un volume suffisant sur une surface réduite privilégiant ainsi l'espace de production.

Ainsi, la répartition actuelle des moyens de stockage offre un volume de 500m³ sur une surface de 500m², soit 2 fois moins que la surface occupée à Lagny sur Marne, entre un palettier dédié aux volumes et masses importantes ainsi qu'aux références à faible taux de rotation, un palettier dédié aux produits inflammables, une surface de rayonnages accessible aux magasiniers sans moyen de manutention particulier pour les références de petite taille et à forte rotation ainsi qu'une chambre froide.

Par conséquent, l'évolution des caractéristiques de la capacité de stockage induit une modification de la structure de coûts de l'espace des potentialités tout en conservant un espace de flexibilité similaire par rapport à ce premier élément. En effet, la capacité totale reste la même, mais le coût associé à la demande d'un besoin croissant en volume est réduit par rapport à la configuration antérieure. Quand à Lagny sur Marne il était nécessaire de construire un autre bâtiment pour augmenter le volume de stockage pour ne pas empiéter sur la surface de production, il est suffisant à Chanteloup-en-Brie de transformer les rayonnages existants pour utiliser la hauteur sous plafond non encore exploitée. Réciproquement, une

réaffectation des locaux pour les ateliers de production est facilitée en cas de diminution du volume de stockage nécessaire.

Les profils de coût des deux systèmes illustrent cette évolution :

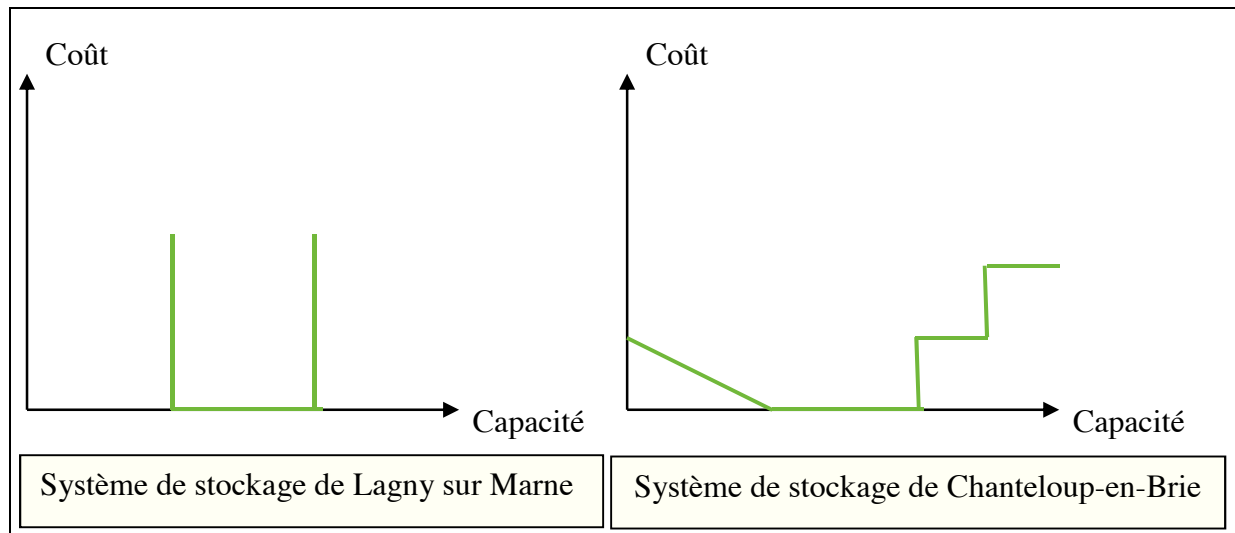


Figure 47 : Profils des coûts des capacités de stockage

Ces profils illustrent une nouvelle fois la distinction à apporter entre les variables de décision et l'analyse par les potentialités. L'absence d'échelle souligne cet aspect en rappelant que le moyen importe peu, c'est bien les caractéristiques propres au système qui sont importantes ici. Les leviers d'action associés aux variables de décision sont propres à un acteur agissant sur le système. Le choix comme l'utilisation des variables de décision n'est qu'une conséquence de la préexistence des potentialités du système.

2.2. Les configurations de rangement

Le second élément du triplet fait référence à l'aptitude du système à réagir aux flux physiques et aux évolutions des modes de gestions de ces derniers. En effet, la liberté à travers le choix des configurations de rangement permet d'optimiser le stock au fur et à mesure des évolutions des caractéristiques des références stockées.

Les unités de stockages présentes à Lagny sur Marne étaient soit organisées par un seul et même individu, le magasinier, soit confiées ponctuellement à des intervenants extérieurs aux fonctions de magasinage, c'est à dire les opérateurs. Ainsi, la stabilité du rangement était une condition indispensable au bon fonctionnement de cette organisation. Des modifications successives auraient réduit l'efficacité des acteurs, le système reposant essentiellement sur

leur mémoire et de choix historiques dans le rangement (par affaire ou bien par famille de références).

L'enjeu du nouveau système de stockage est de permettre d'introduire des règles de gestion dynamique selon les taux de rotation actualisés par référence par exemple et faciliter un réagencement en cas de fluctuation dans les volumes relatifs des références.

Pour cela, nous avons eu recours à une fonctionnalité offerte par l'ERP récemment mis en place à l'époque. L'enjeu était de transformer la connaissance individuelle en savoir collectif à travers la base de données de cet outil. Ainsi, un adressage informatique des références à travers les codes articles a été réalisé en associant à chaque emplacement physique un emplacement informatique. Grâce à ce procédé, le coût d'un réagencement est devenu nul puisque la continuité de l'information est assurée.

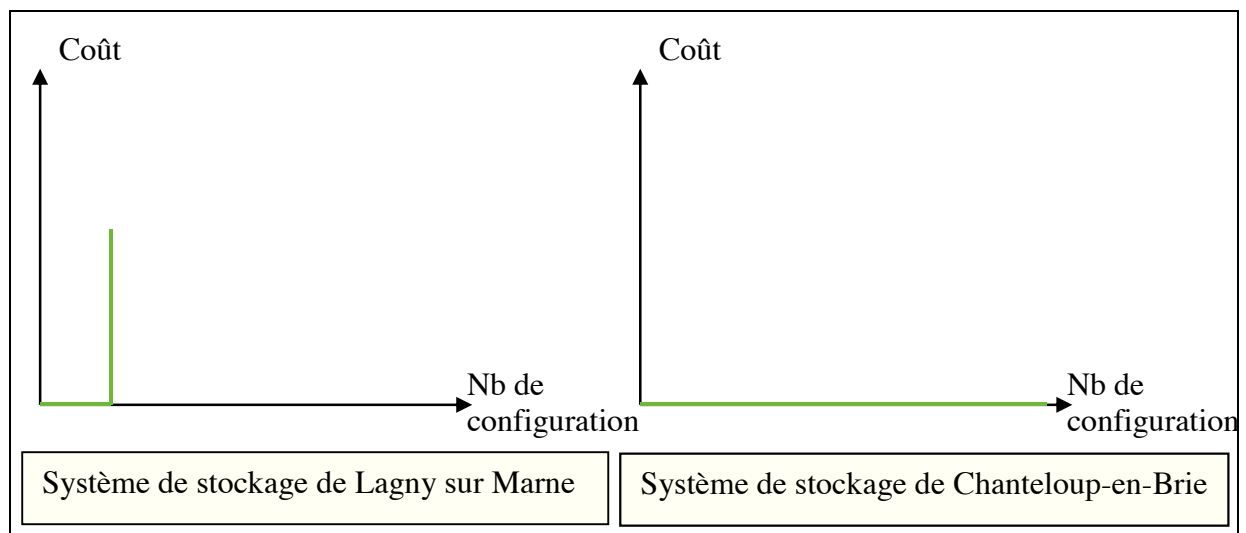


Figure 48 : Profils des coûts des nombres de configuration

2.3. Les moyens de manutention

Le dernier élément du triplet décrivant l'espace des potentialités traduit la capacité du système de stockage à s'adapter aux différentes références gérées et par conséquent de mettre en œuvre les moyens de manutention idoines.

Sur le site de Lagny sur Marne, la configuration des locaux interdisait l'utilisation d'équipements encombrants comme les matériels de levage, chariots élévateurs ou encore palans. Ceci nécessitait de découper les volumes en unités manipulables par les magasiniers, quand cela était possible. Ces contraintes réduisaient l'efficacité du système mais surtout, le

manque de flexibilité de cette fonction avait une conséquence directe sur les politiques d'approvisionnement en interdisant les économies de volumes.

Le magasin central à Chanteloup-en-Brie utilise les 8m sous plafond de la structure grâce à la présence d'un palettier et bénéficie ainsi de la possibilité de manipuler facilement l'unité de stockage universel qui est la palette. L'efficacité du traitement des flux physiques est augmentée et l'éventail des conditionnements gérés accru.

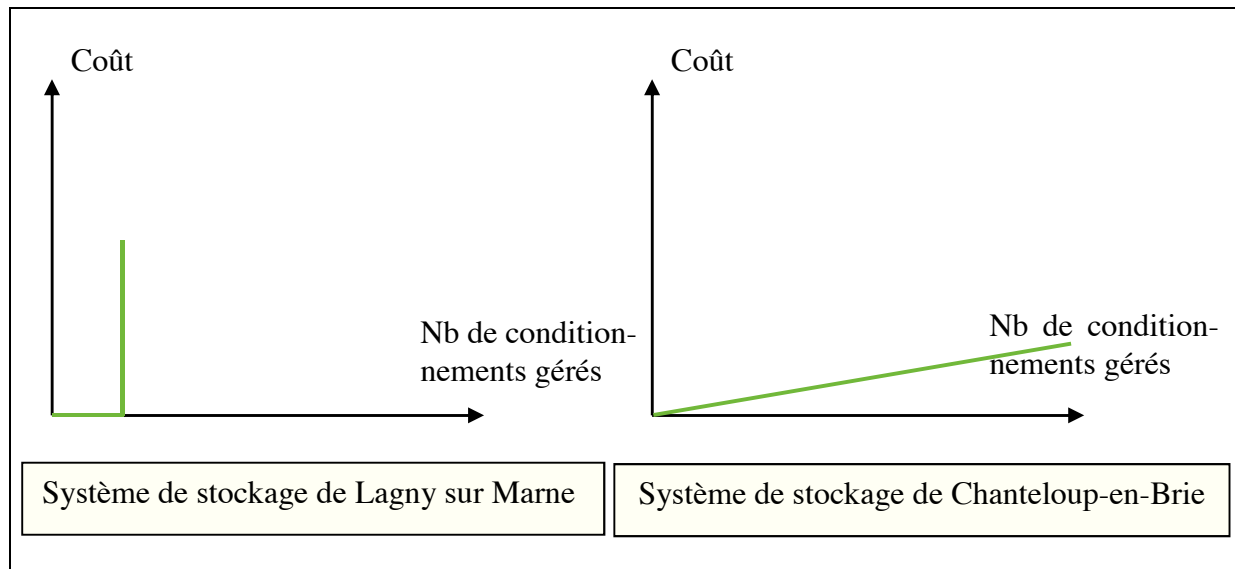


Figure 49 : Profils des coûts des moyens de manutention

3. Description des activités opérationnelles du département logistique

Le département logistique créé lors du transfert du site industriel de la société EUROFARAD à Chanteloup-en-Brie est constitué d'un service administratif et d'une équipe opérationnelle composée respectivement de 4 et 16 salariés. Le service administratif est chargé d'organiser les expéditions des produits finis vers les clients en garantissant le cheminement des produits à l'export notamment en se conformant aux exigences des douanes, mais également les transferts entre les différents sites du groupe. Que ce soit pour des composants, des composés ou encore des équipements et enfin pour organiser le transport afin d'assurer les échanges avec les différents sous-traitants. Ce service administratif constitue donc un carrefour et un centre de traitement de l'information afin de piloter les flux physiques entre le site industriel de Chanteloup-en-Brie et les différents acteurs économiques avec lesquels il est en relation.

Quant au flux physique, il est traité en amont et aval de la production par l'équipe opérationnelle constituée de 13 agents de magasin, 1 coordinateur par flux amont et aval par rapport à la production et 1 responsable des flux. L'activité de cette équipe se décompose en 4 étapes placées comme suit par rapport au cœur d'activité de l'usine qui est la fabrication de composants électroniques :

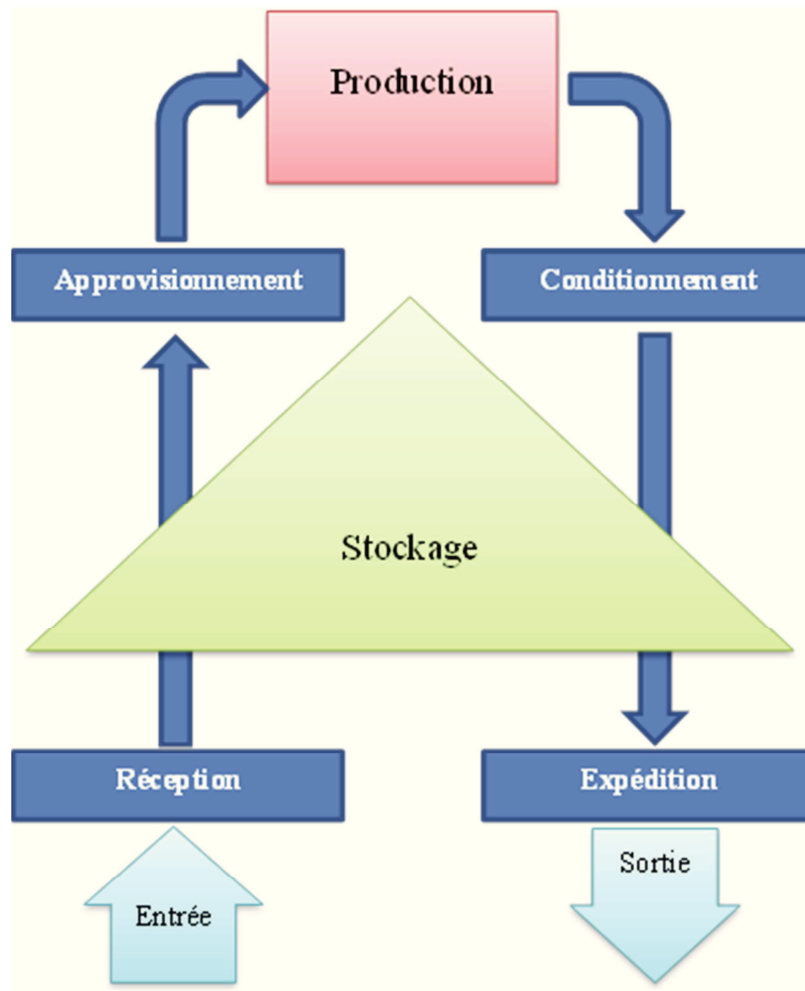


Figure 50 : Processus Logistique

Cependant, il est important de noter que l'activité de production n'est pas unique et est décrite par 4 secteurs basés sur des technologies distinctes orientées sur des marchés différents. Par conséquent, la fusion des activités logistiques permet, par la mutualisation des ressources, d'atteindre une taille critique et facilite l'absorption des aléas comme les variations d'effectif mais également les fluctuations de la charge. La proportion de la charge générée par chacun des secteurs fluctue tout comme la proportion de la charge entre les activités de la chaîne logistique elle-même. Nous verrons donc que cette possibilité a été

donnée par le dimensionnement de la partie opérante mais que l'utilisation de celle-ci est rendue possible par un positionnement adapté de la partie décisionnelle de ce système.

Un des outils complémentaires pour réguler ces flux et leurs fluctuations est le magasin général regroupant à la fois la matière première, les semis-finis jusqu'aux produits finis. Nous verrons également comment la fusion de ces unités de stockage devient une composante à part entière de la flexibilité du département logistique et permet d'absorber les fluctuations en termes de volumes de stockage utilisés par les secteurs à capacité de stockage constante.

3.1. La réception

La réception est située à l'interface des acteurs et des flux externes et internes par rapport à l'usine. La valeur ajoutée de cette opération est d'intégrer les éléments du flux externe au flux interne en permettant leur reconnaissance par le système global. Ainsi, la réception reçoit les différentes marchandises et établit le lien avec la ligne de commande d'achat du secteur concerné et à l'origine de cette entrée. Lors de cette opération, cette marchandise est également identifiée selon les règles propres à l'entité. Cette identification est matérialisée à travers une étiquette qui est le point d'entrée de sa traçabilité dans le flux physique interne.

D'autre part, l'opération de réception génère parallèlement un flux d'information à travers l'ERP dont les éléments vont être simultanément transmis aux 4 acteurs suivants :

- 1) L'acheteur qui est averti du déroulement de l'opération de réception qui soldera la commande ou bien entrainera une mise en contact avec le fournisseur.
- 2) Le service comptabilité pour déclencher le processus de paiement du fournisseur.
- 3) La qualité pour déclencher un contrôle technique de la marchandise si besoin pour rendre la matière disponible pour la fabrication.
- 4) Le reste de l'équipe logistique qui est informé du rangement de la matière à travers l'adressage informatique. Ce mécanisme permet ainsi de localiser la matière au moment des préparations pour les ateliers de production sans que la personne ayant rangé soit nécessairement celle qui prépare les matières pour l'OF (Ordre de Fabrication).

La réception effectuée également un contrôle administratif en reliant les informations de la commande fournisseur, du BL (Bon de Livraison) fournisseur avec la désignation des marchandises et leur quantité réelle.

3.2. La préparation des matières pour les ateliers

La matière nécessaire pour la fabrication d'un OF est principalement acheminée par l'intermédiaire de préparations dédiées à un OF. Ces préparations regroupent les références de la nomenclature du produit en respectant le coefficient de nomenclature. Cette activité est déclenchée par le secteur de production par l'intermédiaire d'un bon de préparation (BSM pour Bon de Sortie Matière) qui indique les références nécessaires, leur quantité et la position de celles-ci dans le stock grâce au système d'adressage informatique. L'activité de préparation extrait donc du stock les matières nécessaires pour un OF et se charge de distribuer celles-ci aux différents ateliers concernés. Cette activité a un rôle également essentiel dans le traitement du flux d'information. En effet, lors de la préparation, la matière est consommée informatiquement ce qui permet de connaître en temps réel l'état du stock et sa valorisation. Enfin, la consommation informatique assure un rôle majeur dans la traçabilité de l'information en liant une référence à un OF donné et permet ainsi de déterminer la part matière dans le coût direct du produit.

3.3. Le conditionnement

Culturellement à EUROFARAD, le conditionnement était considéré comme une opération de la gamme de fabrication. Or, avec la constitution d'un département logistique, la question s'est posée du rattachement de cette activité. La distribution des responsabilités a été faite sur la base du caractère spécifique ou standard du conditionnement considéré. Ainsi, la réalisation des conditionnements standards a été confiée au département logistique en tant qu'activité de distribution. Les conditionnements spécifiques ont été conservés par les différents secteurs de production lorsque ce conditionnement est constitutif et caractéristique du produit fini et ainsi intégré à la gamme de fabrication de ce produit. L'opération de conditionnement participe au flux d'information en permettant au service administratif de distinguer et d'identifier les lignes de commandes client prêtes à être expédiées. Seulement alors, le Bon de Livraison (BL) peut être édité associé à son bon de préparation pour le colisage.

3.4. L'expédition

L'activité de colisage ou expédition constitue le dernier maillon de la chaîne logistique interne. Son objectif principal est lié au flux physique et vise à garantir l'acheminement des produits finis commandés par un client à la bonne adresse de livraison dans les bons délais et assurer l'intégrité des produits lors du transport. Cette activité est pilotée et déclenchée par le service administratif à travers l'édition des bons de préparation pour le colisage.

D'autre part, cette activité d'expédition assume un double rôle dans le traitement de l'information en mettant à jour le stock en sortant de celui-ci les références et quantités livrées. De plus, en associant ces références aux lignes de commande client, la traçabilité est assurée tout au long de la chaîne. Enfin, cet événement permet de déclencher la facturation qui est gérée par le service administratif du département logistique.

4. Dimensionnement de la partie opérante

La partie opérante du département logistique est avant tout constituée de 2 composantes majeures que sont les équipements de stockage et l'équipe opérationnelle qui traite les flux physique et d'information. La rareté des données disponibles sur le système logistique précédent, pourtant très hétérogène, contraint de dimensionner ce nouveau système lors de la conception sur des données agrégées macroscopiques. Celles-ci relativement stables ne traduisent pas toute la complexité de ce système et encore moins son caractère dynamique face à la variation de nombreux paramètres. En effet, pour le volume de stockage comme pour l'effectif de l'équipe opérationnelle, la seule donnée fiable et donc considérée comme certaine est la majoration de ces variables de décision lors de la conception de ce nouveau département.

Pourtant, tout l'enjeu de la création de ce nouveau département logistique réside dans le développement de synergies basées sur l'estimation d'un coefficient de foisonnement. Dans cette perspective, la définition de la flexibilité souhaitée est une nécessité absolue. Majorer l'effectif de l'équipe peut donner l'illusion d'une certaine flexibilité par rapport aux variations de charge. Pourtant, ce genre de flexibilité ne répond pas à un critère d'efficience et ne correspond pas à notre recherche d'une flexibilité souhaitée autour d'un état initial.

4.1. L'équipement de stockage

Le magasin général est soumis de la même façon à ces contraintes. Il est donc important de se demander si le besoin en flexibilité de cet outil de régulation des flux physiques concerne le volume disponible de stockage ou bien une autre caractéristique. La caractérisation de l'espace de flexibilité permettra de définir la flexibilité souhaitée.

4.1.1. Analyse des risques

Effectuer une analyse des risques liés aux données disponibles revient à en apprécier la stabilité, la fiabilité et donc d'une certaine manière leur degré de certitude ou inversement d'incertitude. En effet, prendre une photo à un instant t n'est pas suffisant et doit être complétée par une étude orientée vers les évolutions. Or, appréhender l'avenir est un processus qui repose essentiellement sur les hypothèses retenues par le concepteur de tout système ce qui relève nécessairement d'un caractère subjectif prépondérant. C'est la raison principale pour laquelle notre méthodologie repose sur la caractérisation d'une flexibilité souhaitée. Cette terminologie souligne justement la partie subjective inhérente à toute projection dans l'avenir.

L'utilisation non généralisée de l'ERP, qui était en cours d'implantation lors de la conception du département logistique, pour décrire et gérer les flux a rendu indispensable le développement d'une approche dynamique complémentaire à l'analyse de l'existant pour permettre la fusion des différentes unités de stockage. En effet, l'accès limité à des données historiques liées au contexte de gestion a conduit à nous intéresser aux évolutions propres à la nature des paramètres et non seulement de se cantonner aux évolutions passées et avérées pour s'en servir pour décrire les évolutions futures.

Ainsi, un volume de stockage qui aurait cru de manière continue durant des années de fonctionnement du système actuel aurait pu conduire à reproduire cette tendance et à développer ce degré de liberté pour accroître ce volume dans le futur et ainsi prévoir un espace de flexibilité en conséquence. Or, les évolutions passées ne doivent pas occulter les alternatives d'évolution futures. Ainsi, la nature de ce paramètre peut être soumise tout autant à un accroissement, une stabilisation ou encore une diminution. Cette grille de lecture conduit naturellement à compléter l'approche descriptive par une analyse des causes ou facteurs déclenchant et donc de permettre une approche normative.

L'étude de l'existant montre que le volume total occupé par les références stockées au sein des différents secteurs de production peut être majoré par les volumes disponibles des locaux dédiés puisque dans le fonctionnement actuel, la forte interdépendance entre l'atelier de production, les achats et le stockage a fait considérer la place comme une contrainte régulant l'approvisionnement. Ce niveau n'a donc jamais été dépassé. Ce phénomène est interprété comme l'illustration de la capacité des approvisionneurs à échelonner les entrées selon le besoin de la production malgré la saturation localement de la capacité de stockage.

D'autre part, les références stockées peuvent être segmentées selon leur taux de rotation. On constate qu'une partie importante du stock (environ 60%) n'a pas été utilisée depuis quelques années (2ans). Ainsi, malgré l'absence de données historiques accessibles, un des enjeux du système futur doit consister à répartir ces références de façon à privilégier l'accès à la partie tournante du stock et s'adapter aux évolutions de sa part relative. De même, l'évolution à considérer touche à la proportion du volume occupé par les différents secteurs. En effet, le business model reposant sur la fabrication de petites séries variées, les parts relatives peuvent être soumises à des variations régulières dans le temps que le système futur devra absorber. Cette capacité du système permettra également d'éviter les tensions liées à la répartition d'une ressource désormais mutualisée.

Enfin, la structure et l'organisation du stockage a un impact important sur l'utilisation des ressources qui lui seront dédiées pour sa gestion opérationnelle. En effet, la décomposition actuelle des unités de stockage par ligne de produits autorise une gestion basée sur la connaissance individuelle de la localisation des références. Les volumes limités permettent un repérage des articles basé sur la mémoire des magasiniers qui sont dédiés à une activité. Cette organisation n'a ainsi jamais eu recours à la formation d'équipes pour assumer les activités logistiques. Les règles de rangement sont donc très différentes d'une ligne de production à l'autre. Par conséquent, dans une configuration centralisée de ce stock, ce mode de gestion est appelé à être homogénéisé et donc évoluer.

Le nombre d'emplacements gérés étant multiplié par 4 par une même structure et le travail d'équipe requièrent un partage de l'information. Cette nécessité vient également du besoin nouveau de structurer l'espace et répartir les références selon leur taux de rotation et leur secteur de consommation pour affecter au mieux la ressource qui devient commune en instaurant de nouvelles règles.

Risques	Evolutions envisagées	Option retenue et besoin associé
Fluctuation du volume stocké	Augmentation, diminution ou stabilisation	Stabilisation : estimation du volume stocké actuel
Fluctuation des parts respectives des volumes de stockage par secteur	Augmentation ou diminution de la part pour chacun des secteurs	Données limitées : il est donc nécessaire de donner la possibilité au système de s'adapter aux différentes évolutions envisagées

Tableau 32 : Synthèse de l'analyse des risques

Ainsi, contrairement à l'approche probabiliste qui consiste à évaluer le gain espéré des différentes options, nous proposons d'utiliser les probabilités de réalisation des événements pour structurer l'espace des potentialités sans pour autant les confondre dans une mesure synthétique. La flexibilité consiste à trouver un état atteignable capable de répondre à chacun des aléas envisagés ou réalisés en travaillant sur le coût de déplacement pour les probabilités les plus élevées jusqu'à en dégager un espace de flexibilité. Pour piloter les déplacements au sein de cet espace, il s'agit de positionner convenablement la partie décisionnelle sur le flux d'information.

4.1.2. Définition de l'espace de flexibilité

Pour répondre à l'analyse du risque établie dans la partie précédente pour l'équipement de stockage, l'espace de flexibilité de la partie opérante doit donc permettre une reconfigurabilité du mode de rangement des références au sein du magasin général dans un volume de stockage constant. Cette dernière contrainte a été retenue de façon normative pour maîtriser les stocks et en freiner l'accroissement. Les états atteignables inclus dans l'espace de flexibilité doivent donc décrire tout le gradient des possibilités entre : d'une part les évolutions dans les proportions entre les différentes catégories de références segmentées par taux de rotation et d'autre part toutes les combinaisons de parts relatives entre les secteurs de production.

Cette approche qui tend à maximiser l'utilisation des potentialités du système dans une logique d'efficacité contribue à développer une flexibilité qui peut être qualifiée d'intensive par opposition à une vision extensive de la flexibilité. En effet, à ressources données, ici le volume disponible, l'objectif est d'en maximiser l'utilisation en dotant le système d'une

capacité d'évolution de son état initial et donc de la configuration du rangement des références stockées.

Etats	Coût de déplacement à partir de l'état initial
l'ensemble des états correspond à un arrangement de n références stockées	0 = espace de flexibilité
Diminution de la capacité Augmentation jusqu'à 50% de la capacité de stockage	> 0 = potentialités considérées

Tableau 33 : Description de l'espace des potentialités et de l'espace de flexibilité

4.1.3. Choix lors de la conception

La flexibilité souhaitée caractérisée par l'espace de flexibilité décrit dans la partie précédente induit une décision déterminante lors de la conception de la partie opérante des équipements de stockage. Cette décision réside dans l'énoncé du principe suivant : tout emplacement au magasin doit être équivalent et ne doit donc pas être affecté à une catégorie spécifique d'articles. Ce principe peut naturellement être complété des règles conjoncturelles de rangement dont l'identification facilite l'utilisation de l'outil. Cependant, le système opérant doit être conçu pour permettre l'évolution de ces règles.

Ainsi, la capacité de stockage du nouveau système est de 500m^3 et le stockage des références repose sur un adressage informatique qui décrit les emplacements physiques. Ceci permet de ne pas lier une référence à un emplacement physique, de supprimer cette contrainte et par conséquent de respecter l'espace de flexibilité requis en donnant comme espace de réalisation l'ensemble des emplacements du magasin à la variable de décision de l'agent de magasin lors du rangement d'une référence. Le coût du passage d'un état à l'autre est donc nul ce qui répond à l'espace de flexibilité souhaité.

4.2. Dimensionnement de l'effectif

4.2.1. Analyse des risques

Le dimensionnement de l'effectif qui sera chargé de gérer les flux à travers les 4 activités principales du département logistique repose naturellement sur une analyse de la charge. Or, cela pose immédiatement encore une fois la question du degré de certitude de l'information disponible et directement accessible durant la phase de conception.

L'étude pour la composition de l'équipe s'est donc articulée autour de deux axes majeurs : le premier s'est intéressé à la description des activités afin de définir les compétences nécessaires attendues du personnel. Le second a consisté à évaluer la charge liée aux différents flux selon l'activité et le secteur de production à l'origine du flux.

Face à l'absence de données historiques archivées, l'analyse s'est appuyée essentiellement sur un relevé par observation durant une période de 6 mois. A l'instar de l'approche pour les équipements de stockage, l'évaluation de la charge a été déduite d'une étude des ressources affectées pour traiter celle-ci. Ainsi, nous avons répertorié les ressources dédiées au sein de chacun des secteurs. En effet, jusqu'à présent, les systèmes logistiques étaient indépendants. La difficulté réside dans le processus pour estimer un coefficient de foisonnement. Par conséquent, le niveau d'information macroscopique obtenu a permis d'établir à la fois une moyenne des effectifs mobilisés et une majoration à un instant t .

Pourtant cette évaluation de la capacité initiale constitue le principal risque et enjeu lors de la conception du département logistique. L'état initial du système ainsi visé risque de compromettre la performance du système lui-même si cette capacité est sous-dimensionnée. Une vision extensive de la flexibilité préconiserait de sur-dimensionner légèrement ce paramètre de la partie opérante pour absorber les éventuels pics. Or, cette approche vraisemblablement efficace s'éloigne de l'efficience. D'autre part, dans le cas d'EUROFARAD, qui est composée de 4 centres de profits sur le site de Seine-et-Marne, cette perte d'efficience peut aisément être mesurée par la baisse de la marge industrielle de ceux-ci à productivité constante.

L'équipe du département logistique est en effet constituée à partir d'un recrutement interne et par conséquent à ressources constantes au global sur le site. Ainsi, une évaluation erronée de la part d'activités logistiques au sein des centres de profit conduirait soit à une sur-capacité du système logistique au détriment de celle des centres de profits ce qui réduirait le niveau de production, soit à une sous-capacité qui entraînerait une mauvaise gestion des flux avec une baisse de productivité.

Il faut cependant distinguer la capacité moyenne affectée par les centres de profit à l'activité logistique de l'aptitude de ce nouveau département à absorber les fluctuations autour de cet état initial. Par conséquent, il ressort un second risque lié à l'évolution du système lui-même par rapport à la charge à traiter. Si la moyenne de la capacité dédiée à cette activité

n'est déjà pas aisée à estimer, déterminer un écart type caractérisant les fluctuations relève d'une véritable gageure en l'absence de données archivées suffisantes.

Enfin, un dernier risque est lié à la part relative des 4 activités logistiques (Réception-Approvisionnement-Conditionnement-Expédition). Ces proportions sont parfaitement inconnues lorsque ces 4 activités sont assumées par la même personne dans un secteur de production.

4.2.2. Définition de l'espace de flexibilité

Les 3 principaux risques identifiés dans la partie précédente présentent des degrés d'incertitude croissants. S'il est possible d'estimer la charge globale afférente à l'activité logistique à travers l'étude des ressources qui y sont affectées, les données disponibles sont plus limitées lorsque l'on cherche à progresser dans le niveau de détail et connaître la répartition entre les 4 activités distinctes au sein de la logistique. Compte tenu d'un volume de stock important par rapport à l'activité économique du site, les cycles propres à ces 4 activités sont indépendants. Par conséquent, la proportion relative de chacune de ces activités dans la charge logistique globale est particulièrement difficile à approcher. L'espace de flexibilité du système opérant doit donc regrouper tous les états décrivant l'ensemble des affectations possibles du personnel sur les 4 activités en permettant de varier leur part relative dans le traitement du flux.

D'autre part, l'espace de flexibilité doit offrir la possibilité d'ajuster l'effectif de l'équipe sur une plage d'incertitude liée à l'imprécision des données disponibles lors de la conception. Ainsi, l'effectif nécessaire est estimé entre 14 et 17 salariés suivant la comparaison de l'évaluation du coefficient de foisonnement avec la charge réelle constatée au démarrage du nouveau département. Ensuite, les perspectives de croissance requièrent la possibilité d'accroître l'effectif de 10%, soit 2 personnes à court et moyen termes. Cependant, les états du système correspondant à ce dernier point ne sont pas inclus dans l'espace de flexibilité car la courbe d'expérience permet d'espérer accompagner la croissance par les gains de productivité.

On remarque donc un caractère temporel de l'espace de flexibilité qui peut se traduire par la définition de 2 espaces qui se succèdent chronologiquement. En effet, la flexibilité souhaitée n'est pas identique entre le démarrage du département et la gestion opérationnelle. Cette distinction provient de la nature des risques et de leur incertitude associée. Dans le cas

de la capacité globale, celle-ci est jugée stable et corrélée avec l'activité économique mesurable par le Chiffre d'Affaires, mais l'incertitude résulte de la difficulté à apprécier le coefficient de corrélation. Le besoin de flexibilité traduit donc le besoin de retarder une partie de la décision lors de la conception du système opérant pour la déclencher lorsque le constat sera possible, c'est-à-dire après le démarrage. Cette option pourra donc s'arrêter avec l'obtention de cette information devenue certaine.

Le besoin en flexibilité suivant résulte essentiellement des fluctuations de charges respectives sur les 4 activités. Or, cette incertitude est inhérente à l'activité elle-même et dans ce cas, il ne s'agit pas d'une prise de décision unique qui est retardée, mais une série qui est actualisée par un flux d'information continu.

Etats	Coût
Effectif global de 14 à 17 salariés	0
Répartition de l'effectif sur les différentes activités	0
Augmentation de la capacité de 10% ponctuellement	0
Augmentation de la capacité de 10% durablement	>0

Tableau 34 : Espace de flexibilité n° 1

Etats	Coût
Répartition de l'effectif sur les différentes activités	0
Augmentation de la capacité de 10% ponctuellement	0
Augmentation de la capacité de 10% durablement	>0

Tableau 35 : Espace de flexibilité n°2

4.2.3. Choix lors de la conception

Pour correspondre aux espaces de flexibilité décrits ci-dessus, deux décisions ont été essentielles lors de la conception de ce système opérant. La première a consisté à créer un poste unique pour les 4 activités regroupées sous le nom d'agent de magasin (Tableau 36).

INTITULE DU METIER	Agent de magasin
SERVICE	Service logistique
ETABLISSEMENT	Usine de Chanteloup-en-Brie
OBJECTIFS	Participer à la fonction logistique de l'entreprise en assurant la réception, le stockage, la préparation et la distribution des marchandises ainsi que la gestion du stock.
DESCRIPTION DU METIER : TACHES A ACCOMPLIR	<ul style="list-style-type: none"> - Réception de marchandises des fournisseurs, - Rangement et organisation dans le stock des matières premières, semi-finis et produits finis, - Prélever dans le stock les articles demandés par la production, - Approvisionnement des ateliers de production, - Réception des reliquats de production, des semi-finis et produits finis, - Conditionnement des produits et des marchandises en fonction des exigences clients en assortiments ou en emballage individuel, - Préparation des marchandises pour l'expédition au sous-traitant ou au client final.
COMPETENCES REQUISES	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau BEP ou CAP logistique - CACES cariste - Connaissances de base de l'informatique
QUALITES REQUISES	<ul style="list-style-type: none"> - Sens de l'organisation - Méthode - Attentif - Adroit - Précision - Polyvalence - Rigueur - Rapidité - Bonne condition physique - Respect des normes de sécurité
NIVEAU DE RESPONSABILITE	<ul style="list-style-type: none"> - Optimiser le flux des marchandises, - Garantir l'état du stock - Assurer la satisfaction du client.

Tableau 36 : Fiche de poste de l'agent de magasin

La seconde a été de recruter en interne la valeur supérieure de la plage d'incertitude pour l'effectif initial et d'instaurer parallèlement une période d'essai pour chacun des membres retenus pour constituer la première équipe logistique de l'usine EUROFARAD en Seine-et-Marne. De cette façon, il est possible d'ajuster si besoin l'effectif par rapport à la charge constatée. L'ajustement dans ce sens est en effet moins coûteux pour l'organisation

que celui qui aurait consisté à élargir la première sélection suite aux entretiens de recrutement de l'équipe.

5. Validation empirique

La création du département logistique s'est accompagnée d'une utilisation systématique de l'ERP pour modéliser, décrire et gérer les flux. Ainsi, à chaque flux physique correspond un flux informatique. Ce mode de fonctionnement qui a pour but d'assurer la synchronisation du flux d'information avec le flux physique permet également de constituer une base de données de nature à éclairer les décisions futures. Il est ainsi possible de mesurer le déplacement de la charge relative entre les 4 activités logistiques. Pour être en mesure d'absorber cette charge quotidiennement sans utiliser le lissage comme levier d'action, l'affectation des ressources sur les 4 activités doit nécessairement accompagner l'évolution décrite à travers la Figure 51 ci-dessous.

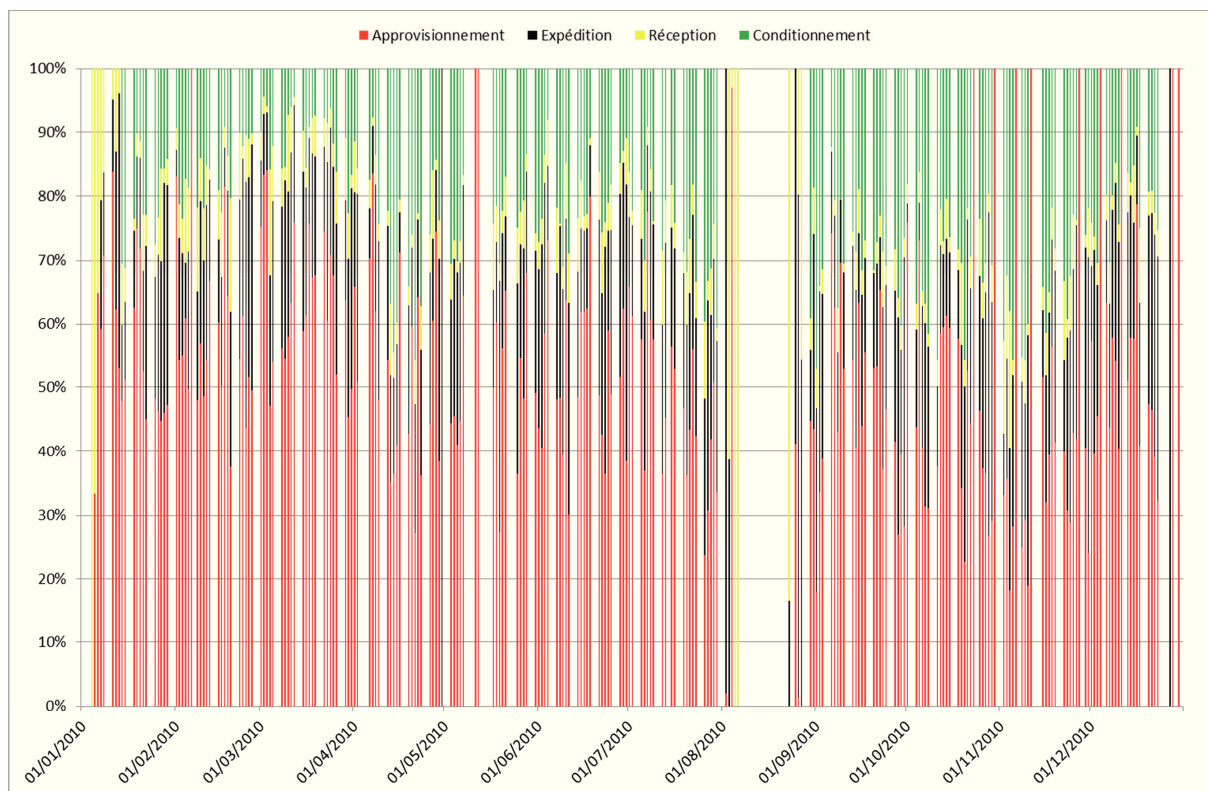


Figure 51 : Variabilité de la charge entre les activités logistiques sur l'année 2010

Le graphique de la Figure 51 montre que l'espace de flexibilité offert lors du dimensionnement de la partie opérante du système logistique à travers la définition du poste d'agent de magasin répond au besoin. Les potentialités correspondant à l'affectation libre des

ressources entre les 4 activités sont équivalentes et atteignables à partir de tout état initial pour un coût considéré comme nul. Pour autant, ces potentialités sont-elles exploitées ? Et permettent-elles d'atteindre la performance attendue, à savoir l'absorption de la charge par chacune des activités quotidiennement, c'est-à-dire sans retard généré par un éventuel lissage ?

Prenons l'exemple de l'activité d'approvisionnement des ateliers de production à travers la préparation des matières. Celui-ci est représentatif du fonctionnement des autres activités. Isoler ce sous-système du département logistique permet d'étudier sa consommation de ressources et par conséquent de mesurer sa contribution à la flexibilité du système. En effet, si une activité s'approprie durant une période donnée une capacité supérieure au besoin induit par sa charge, elle prive mécaniquement les autres d'une partie de la ressource commune et peut ainsi nuire à la performance globale en empêchant, par une contrainte artificielle, le déplacement du système depuis son état initial vers une potentialité de l'espace de flexibilité.

La conception du département logistique permet à toute activité d'utiliser l'ensemble de l'effectif de la partie opérante si le besoin apparaît. Ainsi, l'équipe affectée à cette activité est comprise entre 0 et 16 agents de magasin. On observe cependant sur la figure 52 que le maximum atteint est de 7 agents simultanément. L'effectif est compris la majorité du temps entre 2 et 4 agents.

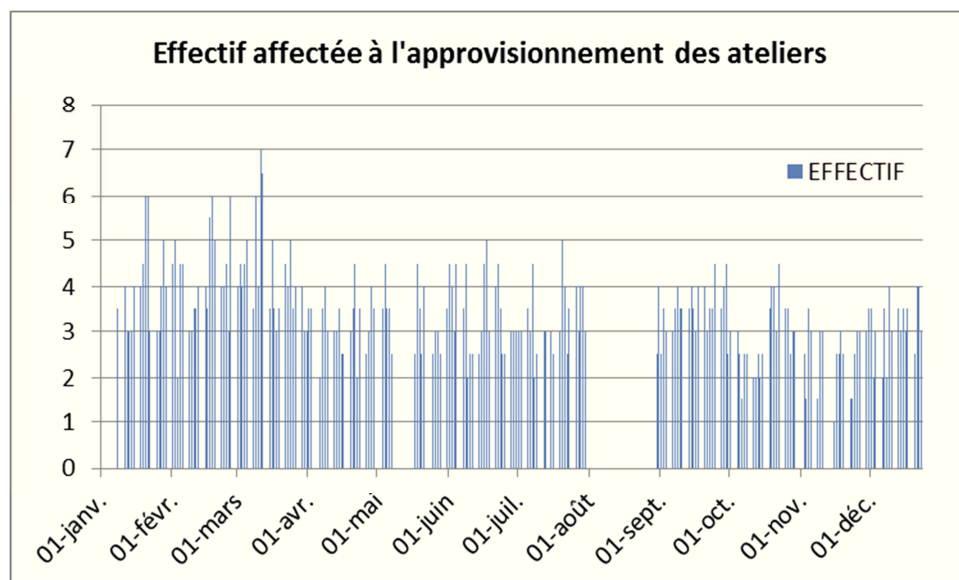


Figure 52 : Affectation des ressources à l'activité sur l'année 2010

A moins d'un sous-dimensionnement initial de la partie opérante du système logistique ou encore d'un conflit dans les priorités d'affectation localement entre les 4 activités, la capacité maximale n'ayant jamais été atteinte par la consommation de l'activité d'approvisionnement, on peut alors supposer que la charge ait été traitée quotidiennement sans effet de lissage et sans générer de retard par conséquent. Or, on constate sur la Figure 53 que les retards sont réguliers durant le premier trimestre 2010 et s'estompent ensuite.

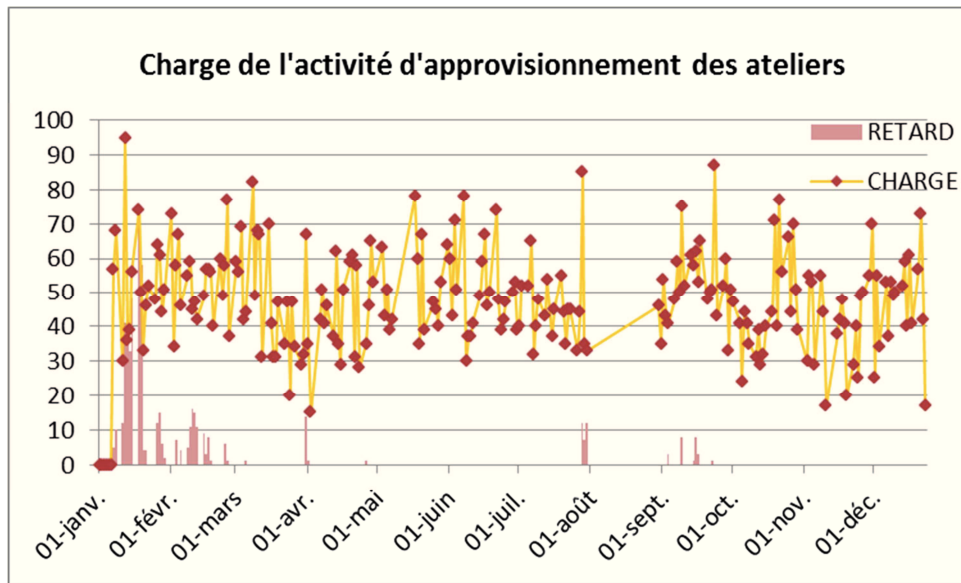


Figure 53 : Charge de l'activité d'approvisionnement sur l'année 2010 et retards générés

Durant cette période, ni les ressources, ni la charge ni encore les potentialités du système logistique n'ont connu d'évolution. Pourtant, la performance obtenue s'est améliorée à partir du 2^e trimestre grâce à une meilleure exploitation des potentialités de l'espace de flexibilité du système. Or, l'exploitation des potentialités est assurée par la partie décisionnelle du système. Ainsi, à partir du 2^e trimestre 2010, le centre de décision de chacune des activités a été positionné sur le flux d'information entrant. Un fonctionnement par centre de décision décentralisé au sein de chacune des activités a remplacé un système d'affectation centralisé pour l'ensemble des activités (Figures 54 & 55).

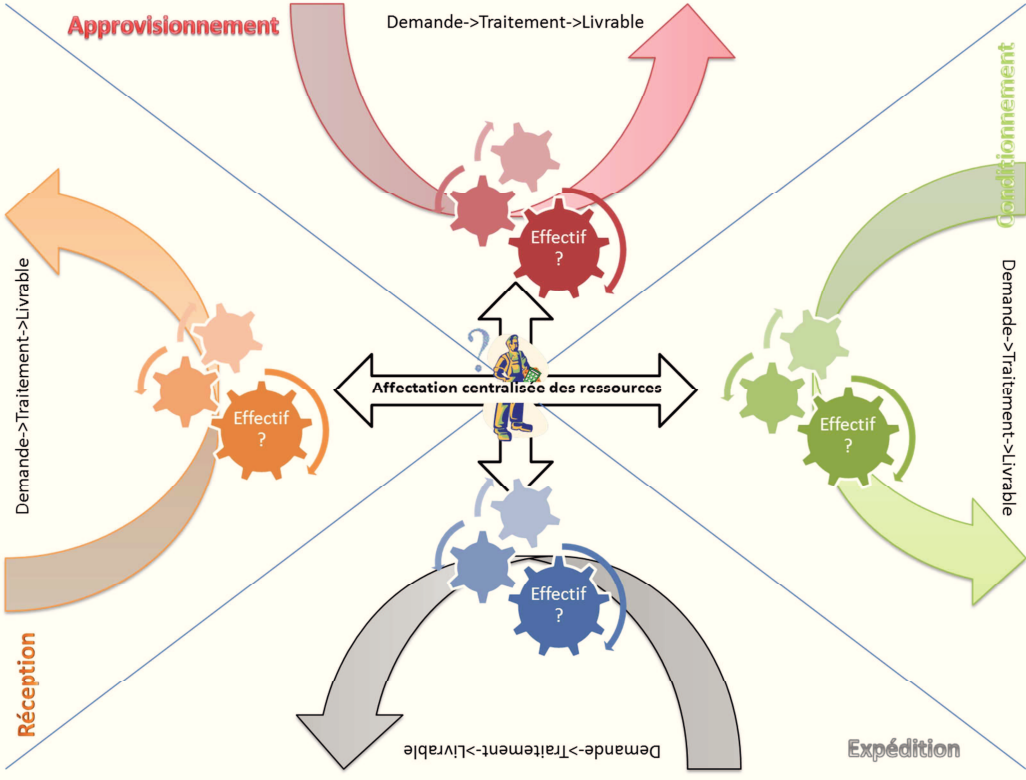


Figure 54 : Partie Décisionnelle centralisée

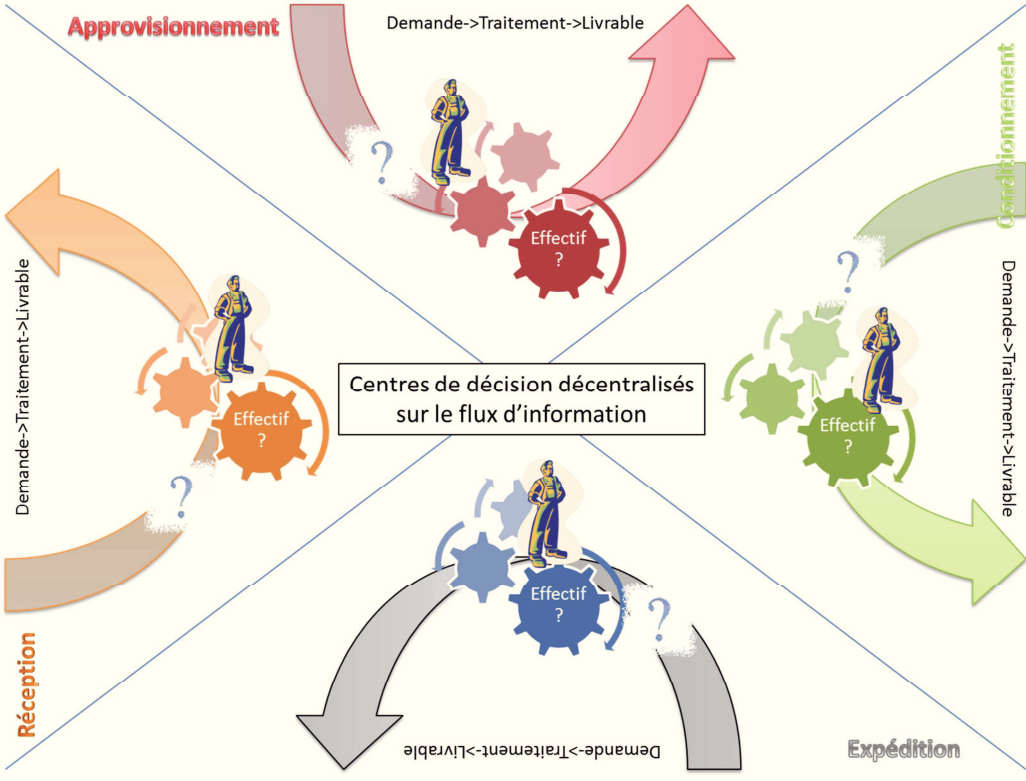


Figure 55 : Partie Décisionnelle décentralisée

Ce résultat se distingue à la fois d'une amélioration de la productivité et d'une diminution de la période du cycle du processus de décision. En effet, la réduction de l'horizon de validité de la décision dans le cadre d'un centre de décision centralisé n'est pas de nature à garantir la synchronisation avec les événements déclenchants du flux d'information. Ce décalage s'observe sur la Figure 56 durant le premier trimestre de l'année 2010 où la réponse aux retards est un surdimensionnement de l'effectif. La décentralisation de la partie décisionnelle au niveau de chacune des activités permet une stabilisation du temps consacré par demande quel que soit l'effectif dédié à cette activité à partir du 2^e trimestre.

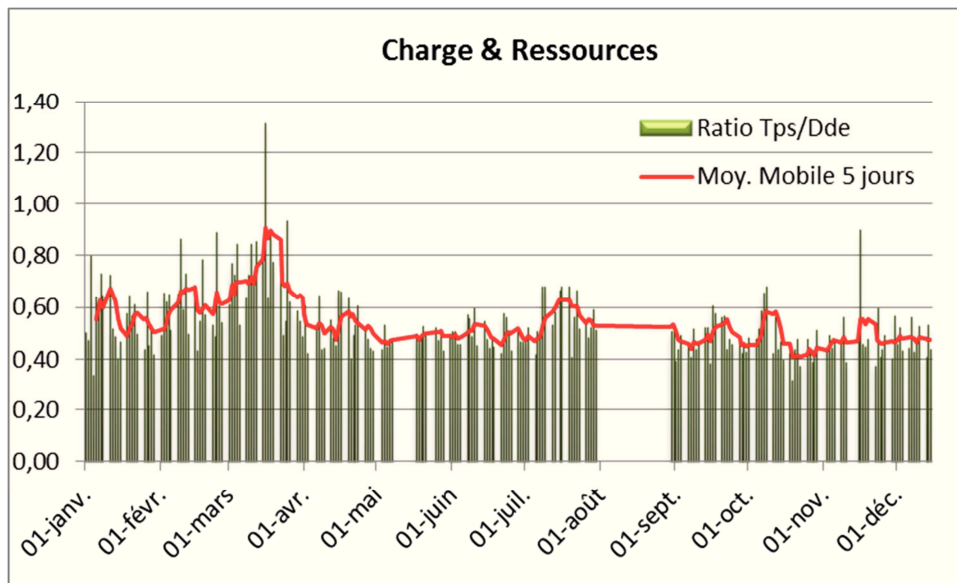


Figure 56 : Consommation des ressources par rapport à la charge sur l'année 2010

La flexibilité du système logistique est obtenue par l'exploitation des potentialités de sa partie opérante grâce à un positionnement de la partie décisionnelle sur le flux d'information.

CONCLUSION

Pour répondre au sujet initial qui a marqué le point de départ de ces travaux sous le signe de l'utilitarisme, comme le favorise le cadre de la convention CIFRE, il a pourtant été nécessaire d'accorder une importance toute particulière à la redéfinition du cadre conceptuel avant de pouvoir faire émerger une méthodologie véritablement destinée aux managers et dirigeants d'entreprises telle EUROFARAD. Le résultat obtenu couvre le besoin initial sur le périmètre de la reconfigurabilité des outils de production soumis aux évolutions du mix produits mais ne se limite pas à celui-ci en proposant une approche unique pour traiter les problèmes liés à la flexibilité d'un système.

Positionné sur un marché de niche dans un secteur où l'innovation est un facteur clé de succès, le besoin spécifique retenu à l'origine comme support pour nos travaux de recherche au sein de la société EUROFARAD a été l'adaptation de l'outil industriel face aux évolutions du mix produits. Ce paramètre, dont dépend directement la performance de l'outil de production, est une résultante de phénomènes extérieurs conjoncturels et propres à l'environnement dans lequel s'inscrit la société. Si l'organisation peut suivre ces évolutions, elle est cependant démunie de tout pouvoir d'action sur celles-ci, sauf à considérer une sélection des commandes à traiter. Cette option n'est envisageable qu'en situation de pénurie, dans le cas où la demande dépasse l'offre. Or, dans un secteur innovant comme celui des composants électroniques, le risque est de se couper rapidement du véritable besoin du marché.

Dans un contexte où les variations des différents paramètres (internes comme externes) sont de nature à perturber le fonctionnement et la performance d'un système, la flexibilité est une caractéristique proposée par la littérature pour garantir sa pérennité. Pourtant, si la réponse présente des similitudes à travers la diversité des cas traités, sa mise en œuvre reste très hétérogène et le développement de ce concept restait essentiellement consacré à l'analyse. En effet, la principale difficulté à surmonter dans le cadre d'une aide à la décision pour accompagner la mise en œuvre de cette aptitude réside dans le statut particulier de la flexibilité vis-à-vis du processus de décision. La caractérisation des critères d'évaluation d'une prise de décision sous incertitude présenté dans notre premier chapitre a révélé le

CONCLUSION

besoin d'une meilleure compréhension de l'articulation entre prise de décision et flexibilité pour dépasser sa fonction d'analyse et ouvrir le champ de son application.

Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps à ces deux champs d'études séparément, à savoir la prise de décision sous incertitude d'une part et la flexibilité d'autre part. Les états de l'art respectifs font apparaître une différence majeure sur le moment où est traitée l'information. Les travaux consacrés à la prise de décision sous incertitude positionnent le traitement de l'information en amont du fonctionnement du système qui est concerné par cette prise de décision. Cet acte constitue le point de départ de l'horizon considéré et conditionne le niveau de performance futur du système jusqu'à une éventuelle remise en cause du résultat. L'exercice consiste essentiellement à transformer de l'information incertaine en une information considérée comme certaine et de nature à permettre la prise de décision. Cette approche offre ainsi une vision statique du système et décorrélée de l'occurrence réelle des événements futurs.

Dans le cadre de la flexibilité, le traitement de l'information se situe en aval, lorsqu'un événement vient perturber le fonctionnement du système. Le traitement de l'information repose sur la comparaison des hypothèses émises sur l'occurrence d'événements et de la réalisation de ceux-ci. Ce traitement permet alors de mesurer la pertinence des décisions prises antérieurement en observant la capacité du système à répondre aux perturbations. La flexibilité du système est donc perçue comme une résultante des différentes décisions prises qui impactent l'état et la nature du système. Cette vision est dynamique au sens où elle accompagne le flux d'information.

D'autre part, la diversité des définitions et approches liées au concept de flexibilité limite la portée des études de cas existantes. Chaque nouvelle configuration nécessite une étude spécifique voire le développement d'un modèle particulier. Pour répondre au besoin d'homogénéisation exprimé à la fois dans la littérature et par les utilisateurs potentiels, nous avons défini un cadre conceptuel faisant apparaître le concept de potentialité. Ce concept permet de distinguer le caractère flexible d'un système de sa mise en œuvre. De plus, il offre une unité commune de mesure et de gestion de la flexibilité. En l'absence d'unité de référence, la dérive constatée en pratique comme dans la littérature a été de considérer la flexibilité comme un objectif à maximiser plutôt qu'un moyen au service d'une organisation et de sa stratégie. La potentialité facilite l'intégration de la notion d'efficience aux problématiques de flexibilité.

CONCLUSION

Nous nous sommes attachés à définir le concept de potentialité puis à articuler la conception d'un système à flexibilité souhaitée avec le processus de décision à travers une méthodologie destinée aux managers et dirigeants d'entreprise pour accompagner la gestion de la flexibilité de leurs organisations. Cette méthodologie place en amont du processus de décision la définition du besoin en flexibilité. Le concept de potentialité sert de support pour caractériser la flexibilité souhaitée et évaluer selon ce critère les différentes alternatives envisagées. Cette étape permet de dimensionner la partie opérante du système par rapport au besoin. Cependant, le système ne peut être considéré comme flexible sans une utilisation appropriée de ses capacités. Afin d'exploiter au mieux les potentialités offertes par le système, nous intégrons à la conception la partie décisionnelle afin de la positionner sur le flux d'information idoine.

Le cadre de la convention CIFRE nous a permis de valider empiriquement nos hypothèses à travers des applications industrielles. Ainsi, nous avons disposé de deux supports, l'implantation d'un nouveau site industriel puis la création d'un département logistique, pour valider la méthodologie proposée en distinguant le dimensionnement de la partie opérante d'une part et le positionnement de la partie décisionnelle du système d'autre part. Ces applications industrielles illustrent la richesse d'un travail de recherche en partenariat avec une structure de type PME comme EUROFARAD. Si l'équilibre dans la répartition du temps comme le rythme approprié entre production et rédaction ne sont pas toujours évidents à trouver, ce partenariat constitue un incubateur exceptionnel pour les idées. Le terrain d'expérimentation offert par EUROFARAD extrêmement réactif facilite la validation des concepts et hypothèses. D'autre part, la proximité entre cadre théorique et environnement industriel favorise les échanges et alimente la réflexion constamment dans une dynamique d'amélioration continue. Dans cet environnement, la confiance accordée par mon responsable m'a donné une liberté d'action propice au développement de solutions à l'écoute des besoins industriels avec un éclairage théorique et scientifique.

CONCLUSION

Ainsi, les principaux apports théoriques et industriels de nos travaux sont :

Théoriques	Industriels
Définition du concept de Potentialité	Méthodologie pour concevoir et utiliser un système à flexibilité souhaitée
Articulation entre Flexibilité et Prise de décision à travers une méthodologie pour concevoir un système à flexibilité souhaitée	Création d'un département Logistique Flexible car doté de potentialités adaptées et exploitées.
Distinction entre partie opérante et décisionnelle qui permet de différencier dimensionnement et exploitation du système	Transforme le concept de flexibilité d'un outil d'analyse vers un outil d'adaptation et d'efficience

Tableau 37 : Apports Théoriques et Industriels de la thèse

Dans la continuité de ces travaux, la méthodologie proposée pourra être complétée par une étude sur la définition du besoin afin de réduire la part de subjectivité inhérente à la « flexibilité souhaitée » et se déplacer vers la définition d'une « flexibilité adaptée ». Mais au-delà du cadre limité à la prise de décision, le concept de la potentialité pose les bases pour le développement d'une véritable politique de gestion des risques et de leur couverture.

Comment déterminer les potentialités à acquérir pour une organisation donnée ? Comment développer une gestion d'un portefeuille de potentialités ? Les potentialités sont à la flexibilité ce que les stocks sont à la réactivité. Pourquoi ne pas s'inspirer des outils développés dans ce domaine comme la matrice CDF (Blacklock, Cottonnec, & Lamouri, 1999) ? L'expérience acquise dans ce domaine mature ainsi que les nombreux travaux sur les stocks ont montrés que la clé du problème ne réside pas tant sur le niveau de stock que sur la gestion et la maîtrise des approvisionnements. Ainsi, pour développer une flexibilité adaptée à un contexte donné pour un système, il serait intéressant de quitter une vision statique consistant à déterminer les potentialités disponibles à un instant t pour s'orienter vers une approche dynamique en permettant de définir une politique d'acquisition de ces potentialités.

CONCLUSION

Comme le rappelle le livre « Operations Rules » de (Simchi-Levi, 2010), au-delà de tous les concepts et principes comme le juste à temps, le lean manufacturing ou encore l'offshoring, les entreprises doivent avant tout développer leur maîtrise de la flexibilité.

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

A

- Abele, E., Liebeck, T., & Wörn, A. (2006). Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* vol. 55.
- Abernathy, W. (1978). *The productivity dilemma: roadblock to innovation in the automobile industry*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Adler, P. S., Goldoftas, B., & Levine, D. I. (1999). Flexibility versus Efficiency? A Case Study of Model Changeovers in the Toyota Production System. *Organization Science*, 43-68.
- Affonso, R. (2008). Proposition d'un cadre de modélisation pour la coordination d'entreprises dans la chaîne logistique. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Al-Othman, W., Lababidi, H., Alatiqi, I., & Al-Shayji, K. (2008). Supply chain optimization of petroleum organization under uncertainty in market demands and prices. *European Journal of Operational Research*(189(3)), 822-840.
- Andreasen, M. (1984). *Creative Methods*. IKpublication, 84.09-A.
- Apter, J. (1985). *Maîtriser la flexibilité de l'entreprise – Une méthode de gestion et ses applications*. Paris: Masson.

B

- Baldwin, C., & Clark, K. (2000). *Design Rules: The Power of Modularity*. MIT Press.
- Barney, J. (1986). Strategic factormarkets: expectations, luck, and business strategy. *Manage Sci*, 32(10), 1231-1240.
- Barzi, R. (2007). Le concept de l'agilité à l'épreuve de la PME : Cas de l'industrie de l'habillement. XVIème Conférence Internationale de Management Stratégique.

BIBLIOGRAPHIE

- Beach, R., Muhlemann, A., Price, D., Paterson, A., & Sharp, J. (2000). A review of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research*, 122(1), 41-57.
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55, 281-294.
- Beamon, B. M. (1999). Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations and Production Management*, 19(3), 275-292.
- Ben Naylor, J., Naim, M., & Berry, D. (1999). Leagility : Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics*(62(1-2)), 107-118.
- Bendell, A., & Disney, J. (1989). *Taguchi Methods : Applications in World Industry*. Springer-Verlag.
- Bernardo, J., & Mohamed, Z. (1992). The measurement and use of operational flexibility in the loading of Flexible Manufacturing Systems. *European Journal of Operational Research*, 60, 144-155.
- Beskese, A., Kahraman, C., & Irani, Z. (2004). Quantification of flexibility in advanced manufacturing systems using fuzzy concept. *Production Economics*, 89, 45-56.
- Billaut, J., Moukrim, M., & Sanlaville, E. (2005). *Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement*. Ed. Hermès.
- Bititci, U., Suwignjo, P., & Carrie, A. (2001). Strategy management through quantitative modeling of performance measurement systems. *International Journal of Production Economics*, 69, 15-22.
- Blacklock, D., Cotonnec, G., & Lamouri, S. (1999). Synchronisation des composants par l'approche CDF. *Techniques de l'ingénieur. L'entreprise industrielle*.
- Boisot, M., & Child, J. (1999). Organizations as adaptive systems in complex environments: the case of China. *Organ Sci*, 10(3), 237-252.
- Bouchon-Meunier, B. (1995). *La logique floue et ses applications*. Ed. Addison-Weyley.

BIBLIOGRAPHIE

- Bouquin, H. (2004). *Le contrôle de gestion*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Bouyssou, D., Dubois, D., Piriot, M., & Prade, H. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision (Vol. II)*. Ed. Hermes.
- Brill, P., & Mandelbaum, M. (1989). On measures of flexibility in manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 27, 747-756.
- Browne, Dubois, J., Rathmil, D., Sethi, K., & Stecke, K. E. (1984). Classification of Flexible Manufacturing Systems. *FMS Magazine*, 2, 114-117.
- Burns, T., & Stalker, G. (1961). *The management of innovation*. London: Tavistock.orgанизations.
- Buzacott, J. (1999). The structure of manufacturing systems: Insights on the impact of variability. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11, 127-146.
- Buzacott, J., & Shantikumar, J. (1990). Models for understanding flexible manufacturing systems. Dans *Modeling and control of automated manufacturing systems* (pp. 84-95). IEEE Press.

C

- Carlsson, B. (1989). Flexibility and the theory of the firm. *Int J Ind Organ*, 7(2), 179-203.
- Carlsson, B. (1992). Management of Flexible manufacturing: An international comparison. *OMEGA*, 20(1), 11-22.
- Carter, M. (1986). Designing flexibility into Automated Manufacturing Systems. K.E. Stecke and R. Suri (eds.), *Proceedings of the Second ORSA / TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems Operations Research Models and Applications*, Elsevier, 107-118.
- Chan, H., & Chan, F. (2010). Comparative study of adaptability and flexibility in distributed manufacturing supply chains. *Decision Support Systems*, 95, 331-341.

BIBLIOGRAPHIE

- Chandra, P., & Tombak, M. (1992). Model for the evaluation of routing and machine flexibility. *European Journal of Operational Research*, 60, 156-165.
- Chen, I., & Chung, C. (1996). An examination of flexibility measurements and performance of flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 34, 374-394.
- Christopher, M. (1992). *Logistics and Supply Chain Management*. Ed. Pitman Publishing.
- Chryssolouris, G., & Lee, M. (1992). An Assessment of Flexibility in Manufacturing Systems. *Manufacturing Review*, 5(2).
- Cleland, D., & King, W. (1983). *Systems Analysis and Project Management*. McGraw-Hill, 3.
- Cochran, J. K., & Uribe, A. M. (2005). A set covering formulation for agile capacity planning within supply chains. *International Journal of Production Economics*, 139-149.
- Cohendet, P., & Llerena, P. (1990). Flexibilité et évaluation des systèmes de production. Dans P. Cohendet, P. Lorino, J.-H. Jacot, & ECOSIP, *Coherence, Pertinence Et evaluation* (pp. 41-60). France: Hardcover.
- Consortium AMICE. (1993). *CIMOSA : Open System Architecture for CIM*. Springer-Verlag.
- Cooper, D., & Chapman, C. (1987). *Risk analysis for large projects*. Chichester, UK: J Wiley.
- Cox, T. (1989). Toward the measurement of manufacturing flexibility. *Production and Inventory Management Journal*, 68-72.

D

- Daniel, F., Lohrke, F., Fornaciari, C., & Turner, R. (2004). Slack resources and firm performance: a meta-analysis. *J Bus Res*, 57(6), 565-574.
- Das, S. (2011). Integrating effective flexibility measures into a strategic supply chain. *European Journal of Operational Research*, 211, 170-183.
- Das, S., & Abdul-Malek, L. (2003). Modeling the flexibility order quantities and lead times in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 85, 171-181.

BIBLIOGRAPHIE

- Das, S., & Nagendra, P. (1993). Investigations into the impact of flexibility on manufacturing performance. *International Journal of Production Research*, 31, 2337-2354.
- Davis, G., & Stout, S. (1992). Organization theory and the market for corporate-control: a dynamic analysis of the characteristics of large takeover targets, 1980–1990. *Adm Sci Q*, 37(4), 605-633.
- Dierickx, I., & Cool, K. (1989). Asset stock accumulation and sustainability of competitive advantage. *Manage Sci*, 35(12), 1504-1511.
- Diez, J. A. (1997). A hundred years of numbers an historical introduction to measurement theory 1887–1990 Part II. *Study of Historical Philosophy and Science*, 28(2), 237-265.
- Doumeings, G. (1984). Méthode GRAI : méthode de conception des systèmes en productique. Mémoire de Thèse, Université de Bordeaux I.
- D'Souza, D., & Williams, F. (2000). Toward a taxonomy of manufacturing flexibility dimensions. *Journal of Operations Management*, 18(5), 577-593.
- Dubois, D., Prade, H., & Sabbadin, R. (1998). Qualitative decision theory with Sugeno integrals. *Proceedings of the 14th Conf. Uncertainty in Artificial Intelligence*, (pp. 121-128). Madison.
- Dubois, D., Prade, H., Farreny, H., Martin-Clouaire, R., & Testemale, C. (1988). *Théorie des possibilités : applications à la représentation des connaissances en informatique*. Masson.
- Dupont, L. (1998). *La Gestion industrielle*. Hermes Sciences Publicat.
- Durieux, S. (2003). *Analyse de performance par simulation et conception de systèmes de production robustes*. Thèse de l'université Blaise Pascal de Clermont Ferrand.
- Durieux-Paris, S., Genin, P., & Thierry, C. (2007). *Prise de décision dans la chaîne logistique en monde incertain : Document de synthèse du projet GdR MACS Février 2007 – Novembre 2007*. Récupéré sur http://www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS/rapport/RapportProjet_DecisionDansLaChaineLogistiqueEnMondeIncertain_GDRMACS_2007.pdf

Dvir, D., & Lechler, T. (2004). Plans are nothing, changing plans is everything: the impacts of changes on project success. *Research Policy*, 33, 1-5.

E

Eisenhardt, K. (1989). Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, 14, 488-511.

Ellsberg, D. (1961). Risk, Ambiguity, and the Savage Axioms. *Quarterly Journal of Economics*(75), 643-669.

Evans, J. (1991). Strategic flexibility for high technology maneuvers: a conceptual framework. *J Manage Stud*, 28(1), 69-89.

F

Ferbows, K., & Meyer. (1990). Lasting improvements in manufacturing performance: in search of a new theory. *J Oper Manage*, 9(2), 168-184.

Finney, R., Campbell, N., & Powell, C. (2005). Strategies and resources: pathways to success? *J Bus Res*, 58(12), 1721-1729.

Florice, S., & Miller, R. (2011). Strategizing for anticipated risks and turbulence in large scale engineering projects. *International Journal of Project Management*, 19, 445-455.

G

Garaveli, A. (2003). Flexibility configurations for the supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 85, 141-153.

Génin, P. (2003). Planification tactique robuste avec usage d'un APS. Proposition d'un mode de gestion par plan de référence. Ecole des Mines de Paris.

Gerwin, D. (1993). Manufacturing flexibility: A strategic perspective. *Management Science*, 39(4), 395-410.

BIBLIOGRAPHIE

- Geunes, J., Shen, Z.-J., & Romejin, H. (2004). Economic ordering decisions with market choice flexibility. *Naval Research LogisticS*, 51, 117-136.
- Ghemawat, P., & Costa, J. (1993). The organizational tension between static and dynamic efficiency. *Strategy Manage*, 14(S2), 59-73.
- Giachetti, R. E., Martinez, L. D., Saenz, O. A., & Chen, C.-S. (2003). Analysis of the structural measures of flexibility and agility using a measurement theoretical framework. *International Journal of Production Economics*, 47-62.
- Giard, V. (2005). *Gestion de la production et des flux*. Paris: Economica.
- Gil, & Tether. (2010). Project risk management and design flexibility: Analysing a case and conditions of complementarity.
- Gil, N., Tommelein, I., & Schruben, L. (2006). . External change in large engineering design projects: the role of the client. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 53(3), 426-439.
- Goldman, S. (1994). Agile competition and virtual corporations. Dans *National Forum* (pp. 2-43).
- Gong, Z. (2008). An economic evaluation model of supply chain flexibility. *European Journal of Operational Research*, 184, 745-758.
- Griffin, A. (1997). PDMA research on new product development practices: Updating trends and benchmarking best practices. *Journal of Product Innovation Management*, 14(6), 429-458.
- Groover, M. (1987). *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gunasekaran, A. (1999). Agile manufacturing: a framework for research and development. *International Journal of Production Economics*, 62, 87-105.
- Gupta, Y., & Goyal, S. (1989). Flexibility of manufacturing systems: concepts and measurements. *European Journal of Operational Research*, 43, 119-130.

BIBLIOGRAPHIE

Gustaysson, S.-O. (1984). Flexibility and Productivity in Complex Production Processes. *International Journal of Production Research*, 22(5), 801-808.

H

Hamblin, D. (2002). Rethinking the Management of Flexibility-A Study in the Aerospace Defence Industry. *Performance Management*, 272-282 .

Hegland, D. (1981). Flexible Manufacturing - Your Balance Between Productivity and Adaptability. *Production Engineering*, 38-44.

Holzwarth, F. (1993). Corporate Fitness: Putting Theories into Practice. *Siemens Review*, 60(3), 7-11.

I

IDEF0. (1993). Integration definition for function modeling (IDEF0). Federal Information Processing Standards Publications.

Iskanius, P. (2006). An agile supply chain for a project-oriented steel product network. THèse de doctorat, Université de Oulu.

Ittner, C., & Larcker, D. (1997). Product development cycle time and organizational performance. *Journal of Marketing Research*, 34(1), 13-23.

J

Jaikumar, R. (1986). Post industrial manufacturin. *Harvard Business Review*, 64, 69-76.

K

Kahyaoglu, Y., & Kayaligili. (2002). Conceptualizing manufacturing flexibility: An operational approach and a comparative evaluation. *International Journal of Production Research*, 40(10), 2187-2206.

BIBLIOGRAPHIE

- Kaplan, R. (1983). Measuring Manufacturing Performance: A New Challenge for Managerial Account Research. *The Accounting Review*, LVIII(4), 38-43.
- Kaplan, R., & Norton, P. (1992). The balanced scorecard –measures that drive performance. *Harvard Business Review*, 70(1), 71-79.
- Kesen, S., Kanchanphiboon, A., & Das, s. (2010). Evaluating supply chain flexibility with order quantity constraints and lost sales. *International Journal of Production Economics*, 126(2), 181-188.
- Klein, B. (1984). *Prices, wages, and business cycles: a dynamic theory..* NewYork: Pergamon.
- Knott, A.-M. (1996). *Do Managers Matter?* Unpublished dissertation. UCLA.
- Koste, L., & Malhotra, M. (1999). A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 18, 75-93.
- Kouvelis, P., & Yu, G. (1996). *Robust Discrete Optimization and Its Applications*. Springer.
- Krantz, D., Luce, R. D., Suppes, P., & Tversky, A. (1971). *Foundations of Measurement – Additive and Polynomial Representations (Vol. 1)*. New York: Academic Press.
- Kumar, V. (1987). Entropic measures of manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research*, 25(7), 957-966.
- Kurke, L. B. (1988). Does adaptation preclude adaptability? Strategy and performance. L. G. Zucker, ed. *Institutional Patterns and Organizations: Culture and Environment.*, 199-222.

L

- Le Boterf, G. (1995). *De la compétence, essai sur un attracteur étrange*. Paris: Editions d'organisations.

BIBLIOGRAPHIE

Lelièvre, A., Durieux, S., Génin, P., & Lamouri, S. (2009). Optimisation of flexibility according to an efficiency criterion : The example of the infrastructures for the new Eurofarad industrial site. INCOM09.

Lelièvre, A., Durieux, S., & Lamouri, S. (2009). Flexibilité du réseau d'évacuation d'un site industriel, le cas EUROFARAD. JD-JN-MACCS09.

Leontief, W. (1951). Input-output economics. *Sci Am*, 15-21.

Lin, C., & Chen, Y. (2009). Hedging strategic flexibility in the distribution optimization problem. *Omega*, 37, 826-837.

Liu, X., & Chetinkaya, S. (2009). Designing supply contracts in supplier vs buyer driven channels: The impact of leadership, contract flexibility, and information asymmetry. *IIE Transaction*, 41, 687-701.

Luce, R., & Raiffa, H. (1967). *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey*. New York: Wiley.

M

Mahoney, J. (1995). The management of resources and the resource of management. *J Bus Res*, 33(20), 91-101.

Mandelbaum, M. (1990). Flexibility and decision-making. *European Journal of Operational Research*, 44, 17-27.

Mandelbaum, M., & Brill, P. H. (1989). Examples of measurements of flexibility and adaptivity in manufacturing systems. *Journal of the Operations Research Society*, 40, 603-609.

March, J. (1991). Exploration and exploitation in organizational learning. *Organ Sci*, 2(1), 71-87.

Marcotte, F. (1995). Contribution à la modélisation des systèmes de production : extension du modèle GRAI. Mémoire de thèse, Université de Bordeaux I.

BIBLIOGRAPHIE

- Marquès, G., Lelièvre, A., & Valet, B. (2009). Proposition d'un cadre de référence pour les critères d'évaluations d'une décision de planification sous incertitudes. *CIGI*.
- Mayer, R. C., James, H. D., & Shoorman, F. D. (1995). An integrative model of organizational trust. *Academy of Management Review*, 20(3), 709-734.
- McGrath, R. (1997). A real options logic for initiating technology positioning investments. *Acad Manage Rev*, 22(4), 974-996.
- Meilich, O. (1997). The flexibility–efficiency debate: review and theoretical framework. Working Paper. University of Southern California.
- Meinadier, J. (1998). *Ingénierie et intégration des systèmes*. Hermes Sciences Publicat.
- Meyer, A., Jinichiro, N., Miller, J. G., & Rerdows, K. (1989). Flexibility: The next competitive battle. The manufacturing futures survey. *Strategic Management Journal*., 10, 135-144.
- Miller, R., & Lessard, D. (2000). *Rising to the challenge of evolving high-stakes games*. MIT Press. MIT Press.
- Mishra, A. K. (1996). Organizational responses to crisis: The centrality of trust. *Trust in Organizations*, 261-287.
- Morris, P. (1994). *The Management of Projects*. London.
- Morris, P., & Hough, G. (1987). *The Anatomy of Major Projects: A Study of the Reality of Project Management*. Wisley.
- Munier, B. (2003). New models of decision next term under previous term uncertainty: next term An interpretative essay. *European Journal of Operational Research*, 38(3), 307-317.
- Muramatsu, R., Ishii, K., & Takahashi, K. (1985). Some Ways To Increase Flexibility in Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research*, 23(4), 681-703.

N

BIBLIOGRAPHIE

Nagel, R., Dove, R., Goldman, S., & Preiss, K. (1991). *21st Century Manufacturing Enterprise Strategy: An Industry Led View*. Lehigh University: Iacocca Institute.

Narens, L. (1985). *Abstract Measurement Theory*. Cambridge: MIT Press.

Neely, A., Richards, H., Mills, J., Platts, K., & Bourne, M. (1997). Designing performance measures: a structured approach. *International Journal of Operations and Production Management*, 17, 1131-1152.

O

O'Grady, P. (1987). *Controlling Automated Manufacturing Systems*. London: Chapman & Hall/Kogam Page.

Olivella, J., Corominas, A., & Pastor, R. (2010). An entropy-based measurement of working time flexibility. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 253-260.

Oliver, R. K., & Webber, M. D. (1982). *Supply Chain Management: Logistics Catches Up with Strategy*. London: Chapman & Hall.

Owen, T. (1985). *Strategic Issues in Automated Production*. Cranfield Press.

P

Palframann, D. (1987). FMS: Too much, too soon. *Manuf. Eng.*

Parker, R. P., & Wirth, A. (1998). Manufacturing flexibility: Measures and relationships. *European Journal of Operational Research*, 118, 429-449.

Parker, R., & Wirth, A. (1999). Manufacturing flexibility: measures and relationships. *European Journal of Operational Research*(118), 429-449.

Piplani, R., & Wetjens, D. (2007). Evaluation of entropy-based dispatching in flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 176(1), 317-331.

Porter, M. (1980). *Competitive strategy: techniques for analyzing industries and competitors*. New York:: Free press.

Porter, M. (1985). *Competitive advantage*. New York: The Free Press.

R

Randall, T., Morgan, R., & Morton, A. (2003). Efficient versus Responsive Supply Chain Choice : An Empirical Examination of Influential Factors. *Journal of Product Innovation Management*(20(6)), 430-443.

Roboam, M. (1993). *La méthode GRAI: Principes, outils, démarche et pratique*. Teknea.

S

S.C. Council. (2008). *Supply-Chain Operations Reference Model-SCOR Version 9.0*. Supply-Chain Council, Inc.

Sabbadin, R. (1998). *Une approche ordinaire de la décision dans l'incertain : Axiomatisation, représentation logique et application à la décision séquentielle*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.

Sabri, E., & Beamon, B. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28, 581-589.

Sako, M. (1992). *Prices, Quality and Trust: Inter-firm Relations in Britain and Japan*. Cambridge University Press.

Sarker, B., Krishnamurthy, S., & Kuthethur, S. (1994). A survey and critical review of flexibility measures in manufacturing systems. *Production Planning and Control*, 5(6), 512-523.

Savage, L. (1954). *The Foundations of Statistics*. NY: Wiley: Ed. New York.

Sawhney, R. (2006). Interplay between uncertainty and flexibility across the value-chain: Towards a transformation model of manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 476-493.

BIBLIOGRAPHIE

- Schmeidler, D. (1989). Subjective Probability and Expected Utility without Additivity. *Econometrica*(57), 571-587.
- Schumpeter. (1942). *Capitalism, socialism, and democracy*. New York:: Harver.
- Scott, W. R. (1992). *Organizations: Rational, Natural and Open Systems*. 3.
- Sethi, A., & Sethi, S. (1990). Flexibility in manufacturing : A survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2(4), 289-328.
- Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423 and 623-656.
- Sharifi, H., & Zhang, Z. (2001). Agile manufacturing in practice—application of a methodology. *International Journal of Operations and Production Management*, 21, 772–794.
- Shenhar, A., & Dvir, D. (1996). Toward a typological theory of project management. *Research Policy*, 25, 607-632.
- Shewchuk, J., & Moodie, C. (1997). A framework for classifying flexibility types in manufacturing. *Computers in Industry*, 33, 261 – 269.
- Shewchuk, J., & Moodie, C. (1998). Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 10(4), 325-349.
- Shuiabi, E., Thomson, V., & Bhuiyan, N. (2005). Entropy as a measure of operational flexibility. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 696-707.
- Simchi-Levi, D. (2010). *Operations Rules : Delivering Customer Value through Flexible Operations*. MIT Press.
- Simon, H. (1997). *Models of Bounded Rationality Vol. 3: Empirically Grounded Economic Reason*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Son, Y., & Park, C. (1987). Economic measure of productivity, quality and flexibility in advanced manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 6(3), 193-207.

BIBLIOGRAPHIE

Spano, M. R., O'Grady, P. J., & Robert, E. Y. (1993). The design of flexible manufacturing systems. *Computers in Industry*, 21, 185-189.

Stecke, K. (1983). Formulation and solution of nonlinear integer production planning problems for flexible manufacturing systems. *Manage. Sci.*, 29, 273.

Stigler, G. (1939). Production and Distribution in the short run. *Journal of Political Economy*, 47, 305-328.

T

Tan, J., & Wang, L. (2010). Flexibility–efficiency tradeoff and performance implications among Chinese SOEs. *Journal of Business Research*, 63, 356-362.

Tang, C. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 451-488.

Tang, C., & Tomlin, B. (2008). The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International Journal of Production Economics*, 116, 12-27.

Tardieu, H., Rochfeld, A., & Colletti, R. (1983). *La méthode MERISE : Principes et outils*. Les Editions d'Organisation.

Taymaz, E. (1989). Types of flexibility in a single-machine production system. *International Journal of Production Research*, 27, 1891-1899.

Thiault, D. (2007). *Le modélisateur : de la modélisation des processus d'entreprise*. Hermes Science Publications.

Thompson, J. (1967). *Organizations in Action*. McGraw Hill, New York.

Tompkins, J., & White, J. (1984). *Facilities Planning*. New York.

Toni, D., & Tonchia, S. (1998). Manufacturing-flexibility: a literature review. *International Journal of Production Research*, 36(6), 1587-1617.

Tushman, M. L., & O'Reilly, C. A. (1997). *Winning Through Innovation*. Harvard Business School Press.

U

Upton, D. (1994). The management of manufacturing flexibility. *California Management Review*, 36(2), 72–89.

V

Van Mieghem, J. A. (1998). Investment Strategies for Flexible Resources. *Management Science*, 44(8), 1071-1078.

Vernadat, F. (1996). *Entreprise modeling and integration, principles and applications*. Chapman & Hall.

Volberda, H. (1998). *Building the Flexible Firm*. New York: Oxford University Press.

Volberda, H. W. (1996). Toward the flexible form: How to remain vital in hypercompetitive environments. *Organization Science*, 74, 459-374.

Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton: Princeton University Press.

W

Wahab, M. (2005). Measuring machine and product mix flexibilities of a manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 43, 3773-3786.

Wahab, M., Wu, D., & Lee, C.-G. (2008). A generic approach to measuring the machine flexibility of manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 186, 137-149.

Walsh, J., & Konsnik, R. (1993). Corporate raiders and their disciplinary role in the market for corporate control. *Acad Manage J*, 36(4), 671-700.

BIBLIOGRAPHIE

Webster, D., & Tyberghein, M. (1980). Measuring flexibility of job-shop layouts. *International Journal of Production Research*, 18(1), 21-29.

Whitney, D. (2004). *Physical Limits to Modularity*. Engineering Systems Division.

Williams, T. (1992). *The purdue entreprise reference architecture*. West Lafayette: Purdue Laboratory for Applied Industrial Control.

Y

Yao, D. (1985). Material and information flows in flexible manufacturing systems. *Material Flow*, 2, 143-149.

Yin, R. (1984). *Case Study Research. Design and Methods*. Applied Social Research Methods Series., 5.

You, F., & Grossmann, I. (2008). Design of responsive supply chains under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*(32(12)), 3090-3111.

Young, C., & Greene, A. (1986). *Flexible Manufacturing Systems*. New York: American Management Association.

Z

Zelenovic, D. (1982). "Flexibility- A Condition for Effective Production Systems. *International Journal of Production Research*, 20(3), 319-337.

Zhang, S. (2001). On a profit maximizing location model. *Annals of Operations Research*, 103, 251-260.

Zhang, Z., & Sharifi, H. (2007). Towards Theory Building in Agile Manufacturing Strategy - A Taxonomical Approach. *Engineering Management*(54(2)), 351-370.

Zhu, W., Gavirneni, S., & Kapuscinski, R. (2010). Periodic flexibility, information sharing, and supply chain performance. *IIE Transactions*, 42, 173-187.

BIBLIOGRAPHIE

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 : Articulation de la recherche.....	4
Figure 2 : Réseau GRAI de la décision sur la date et le lieu de la réunion.....	15
Figure 3 : La Grille GRAI et le centre de décision.....	16
Figure 4 : Modèle conceptuel d'un centre de décision.....	18
Figure 5 : Une activité de décision selon le modèle GRAI (Doumeingts, 1984).....	19
Figure 6 : La notion de flexibilité.....	23
Figure 7 : Séparation des contraintes.....	24
Figure 8 : La notion de fiabilité.....	25
Figure 9 : La notion de robustesse.....	26
Figure 10 : La notion d'adaptabilité.....	28
Figure 11 : La notion de réactivité.....	30
Figure 12 : La notion de stabilité.....	31
Figure 13 : La notion d'agilité.....	32
Figure 14 : La notion de résilience.....	33
Figure 15 : Condition de représentation d'une théorie de la mesure.....	46
Figure 16 : Les facteurs mesurés par l'entropie contribuent à quantifier la flexibilité.....	50
Figure 17 : Liens avec la conception d'infrastructures.....	65
Figure 18 : Processus de conception.....	68

Figure 19 : Les niveaux de fonction IDEF	68
Figure 20 : Décomposition des étapes pour un système d'assemblage.....	69
Figure 21 : Pilotage du projet T5	71
Figure 22 : Un système élémentaire	77
Figure 23 : Espace des états atteignables d'un système	78
Figure 24 : L'objectif assigné au système comme référence	78
Figure 25 : Mise en œuvre de la flexibilité	89
Figure 26 : Segmentation des potentialités	89
Figure 27 : Processus de décision et changement d'état	90
Figure 28 : Méthodologie de conception d'un système à flexibilité souhaitée	92
Figure 29 : Place du critère de sélection dans le processus de décision	108
Figure 30 : Localisation des points d'évacuation	110
Figure 31 : Réseau d'évacuation gravitaire	111
Figure 32 : Réseau d'évacuation en dépression.....	112
Figure 33 : Coût d'évolution du système en dépression	114
Figure 34 : Coût d'évolution du système gravitaire dans le cas d'un raccordement	115
Figure 35 : Coût d'évolution du système gravitaire dans le cas du creusement d'une nouvelle tranchée	116
Figure 36 : Δ VAN sans optimisation du réseau gravitaire.....	118
Figure 37 : Espace de flexibilité du réseau gravitaire initial	120

Figure 38 : Espace de flexibilité du système en dépression.....	120
Figure 39 : Espace de flexibilité du réseau gravitaire pour répondre à l'objectif	121
Figure 40 : Comparaison des profils de coût des potentialités	122
Figure 41 : Δ VAN après optimisation du réseau gravitaire.....	123
Figure 42 : Fonctions des centres de profits.....	127
Figure 43 : Importance relative des fonctions au sein des différents centres de profits	128
Figure 44 : Niveau 2 du modèle SCOR.....	129
Figure 45 : Processus	130
Figure 46 : Cycles de production.....	131
Figure 47 : Profils des coûts des capacités de stockage.....	135
Figure 48 : Profils des coûts des nombres de configuration.....	136
Figure 49 : Profils des coûts des moyens de manutention	137
Figure 50 : Processus Logistique	138
Figure 51 : Variabilité de la charge entre les activités logistiques sur l'année 2010 ..	150
Figure 52 : Affectation des ressources à l'activité sur l'année 2010	151
Figure 53 : Charge de l'activité d'approvisionnement sur l'année 2010 et retards généérés	152
Figure 54 : Partie Décisionnelle centralisée	153
Figure 55 : Partie Décisionnelle décentralisée	153

Figure 56 : Consommation des ressources par rapport à la charge sur l'année 2010 154

Tableaux

Tableau 1 : Modèle de tableau descriptif	15
Tableau 2 : Description de la flexibilité	23
Tableau 3 : Description de la fiabilité	25
Tableau 4 : Description de la robustesse	27
Tableau 5 : Description de l'adaptabilité	28
Tableau 6 : Description de la réactivité.....	30
Tableau 7 : Description de la stabilité.....	31
Tableau 8 : Description de l'agilité	32
Tableau 9 : Description de la résilience	33
Tableau 10 : Grille d'analyse des termes dans le cadre du réseau GRAI.....	34
Tableau 11 : Segmentation des termes selon le premier plan d'analyse	35
Tableau 12 : Segmentation des termes selon le deuxième plan d'analyse.....	35
Tableau 13 : Segmentation des termes selon le troisième plan d'analyse	36
Tableau 14 : Analyse des mesures suivant le cadre de la théorie de la mesure	47
Tableau 15 : Les 4 caractéristiques essentielles d'un système flexible	80
Tableau 16 : Décomposition d'un système flexible	83
Tableau 17 : Paramètres à dimensionner pour la conception d'un système à flexibilité souhaitée, part I	86

Tableau 18 : Paramètres à dimensionner pour la conception d'un système à flexibilité souhaitée, part II	88
Tableau 19 : Classification des qualités d'information à disposition du décideur	99
Tableau 20 : Description des deux technologies	104
Tableau 21 : Référencement du besoin	109
Tableau 22 : Cadre de décision pour le choix du système d'évacuation.....	110
Tableau 23 : Coût d'installation du système gravitaire	113
Tableau 24 : Coût d'installation du système en dépression	113
Tableau 25 : Coût pour l'installation d'un boîtier supplémentaire	114
Tableau 26 : Coût d'un raccordement à une attente.....	115
Tableau 27 : Coût d'une tranchée supplémentaire	115
Tableau 28 : Nouveau coût d'installation du système gravitaire	122
Tableau 29 : Capacité de stockage utilisée	132
Tableau 30 : Nombre de références stockées et niveau de rotation des stocks par secteur	133
Tableau 31 : Répartition des modes de pilotage entre les business unit par ordre d'importance	134
Tableau 32 : Synthèse de l'analyse des risques	144
Tableau 33 : Description de l'espace des potentialités et de l'espace de flexibilité ...	145
Tableau 34 : Espace de flexibilité n° 1	148

Tableau 35 : Espace de flexibilité n°2.....	148
Tableau 36 : Fiche de poste de l'agent de magasin.....	149
Tableau 37 : Apports Théoriques et Industriels de la thèse	158

TABLE GENERALE

INTRODUCTION GENERALE	1
SOMMAIRE	7
CHAPITRE I. LES CRITERES D'EVALUATION D'UNE DECISION SOUS INCERTITUDES	9
1. CADRE DE CARACTERISATION DE LA DECISION SOUS INCERTITUDES 11	
1.1. MODELISATION DE LA DECISION	12
1.2. LA METHODE GRAI	15
1.2.1. <i>La Grille GRAI</i>	16
1.2.2. <i>Les Réseaux GRAI</i>	17
1.2.3. <i>Le modèle conceptuel du centre de décision</i>	17
1.3. L'INCERTITUDE	20
1.4. PRISE EN COMPTE DE LA TEMPORALITE DANS LA MODELISATION	20
2. ANALYSE DES TERMES DANS LE CADRE DE DECISION	22
2.1. FLEXIBILITE	22
2.2. FIABILITE	24
2.3. ROBUSTESSE	25
2.4. ADAPTABILITE	27
2.5. REACTIVITE	29
2.6. STABILITE	30
2.7. AGILITE	31
2.8. RESILIENCE	32
3. SYNTHESE	34
CHAPITRE II. LA FLEXIBILITE, OUTIL D'ANALYSE DANS LA LITTERATURE ET LIMITES DANS L'APPLICATION INDUSTRIELLE	39
1. CONTEXTE	41
2. MESURE DE LA FLEXIBILITE	43

2.1.	UN INDICE QUALITATIF COMME OUTIL DE MESURE	44
2.2.	UN INDICE QUANTITATIF COMME OUTIL DE MESURE	48
2.3.	LA MESURE DE LA FLEXIBILITE AU SEIN D'UN SYSTEME STRATEGIQUE	52
2.4.	LES MESURES ECONOMIQUES AIDENT LES DECISIONS D'INVESTISSEMENT	54
3.	FLEXIBILITÉ VERSUS EFFICIENCE	57
3.1.	UNE ETUDE DE CAS DANS LE SYSTEME DE PRODUCTION TOYOTA	57
3.2.	UNE ETUDE DE CAS DANS DES ENTREPRISES D'ÉTAT EN CHINE.	60
3.3.	UNE APPROCHE GÉNÉRIQUE DE LA MESURE DE L'EFFICIENCE	62
4.	CONCEVOIR LA FLEXIBILITE	64
4.1.	UNE REVUE DES APPROCHES DE LA CONCEPTION	65
4.2.	CONCEVOIR UN SYSTEME D'ASSEMBLAGE FLEXIBLE	67
4.3.	FLEXIBILITE DE LA CONCEPTION ET MANAGEMENT DES RISQUES	70
5.	LES LIMITES DANS L'APPLICATION INDUSTRIELLE.....	73
 CHAPITRE III. CADRE CONCEPTUEL ET METHODOLOGIQUE POUR		
CONCEVOIR UN SYSTEME A FLEXIBILITE SOUHAITEE.....		
1.	DE LA NON-FLEXIBILITE A LA FLEXIBILITE.....	77
1.1.	L'ESPACE DES ETATS ATTEIGNABLES	77
1.2.	LA FINALITE DU SYSTEME	78
1.3.	UN SYSTEME FLEXIBLE EST UN SYSTEME OUVERT SUR SON ENVIRONNEMENT ...	79
1.4.	LES 4 CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES D'UN SYSTEME FLEXIBLE.....	79
2.	MODELISATION DU SYSTEME	80
2.1.	ESPACE DES ETATS ATTEIGNABLES DU SYSTEME ET ESPACE DE SOLUTIONS	80
2.2.	DECOMPOSITION THEORIQUE DU SYSTEME	82
3.	LA PARTIE OPERANTE : L'ESPACE DES POTENTIALITES	84
3.1.	LE DEGRE D'ACCESSIBILITE DES ETATS ATTEIGNABLES	84
3.2.	L'ESPACE DE FLEXIBILITE	85
4.	LA PARTIE DECISIONNELLE : LES VARIABLES DE DECISION.....	86
4.1.	LA MISE EN ŒUVRE DES POTENTIALITES	86

4.2.	LE PROCESSUS DE DECISION VU COMME UN PROCESSUS D'INTEGRATION DES ALEAS PAR LE SYSTEME	87
5.	SYNCHRONISATION DU PROCESSUS DE DECISION AVEC LE FLUX D'INFORMATION	88
5.1.	CARTOGRAPHIE DES POTENTIALITES	89
5.2.	COMPARAISON DES DELAIS	89
6.	METHODOLOGIE PROPOSEE POUR CONCEVOIR UN SYSTEME A FLEXIBILITE SOUHAITEE	90
CHAPITRE IV. DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE OPERANTE, APPLICATION A LA CONCEPTION DU SYSTEME D'EVACUATION DES EAUX DU NOUVEAU SITE INDUSTRIEL EUROFARAD DE CHANTELOUP-EN-BRIE 95		
1.	PROBLEMATIQUES INHERENTES AUX SYSTEMES OUVERTS.....	97
2.	LA FLEXIBILITE, UNE APTITUDE NECESSAIRE EN UNIVERS INCERTAIN	98
2.1.	UNE NOTION MULTIDIMENSIONNELLE.....	99
2.2.	LA POTENTIALITE, VECTEUR DE FLEXIBILITE	101
3.	OPTIMISATION DE LA FLEXIBILITE DES INFRASTRUCTURES DU NOUVEAU SITE INDUSTRIEL EUROFARAD	103
3.1.	MESURE DE L'EFFICIENCE.....	104
3.2.	EVALUATION DES SCENARII	105
4.	APPROCHE CLASSIQUE : LA FLEXIBILITE COMME CRITERE DE SELECTION	106
4.1.	L'INTEGRATION DE LA FLEXIBILITE EN AVAL DU PROCESSUS DE DECISION	106
4.2.	COLLECTE DES INFORMATIONS	109
4.3.	PRISE DE DECISION.....	111
4.4.	SELECTION PAR RAPPORT AU CRITERE DE FLEXIBILITE	112
4.5.	PERFORMANCE ECONOMIQUE DU RESULTAT	113
5.	APPROCHE PAR LE DIMENSIONNEMENT DE L'ESPACE DES POTENTIALITES	118

5.1.	L'INTEGRATION DE LA FLEXIBILITE EN AMONT DU PROCESSUS DE DECISION ...	118
5.2.	MORPHOLOGIE DE L'ESPACE DES POTENTIALITES PAR ECHANTILLONNAGE DES ETATS ATTEIGNABLES	119
5.3.	PERFORMANCE ECONOMIQUE DU RESULTAT	122
5.4.	BILAN DE LA METHODE APPLIQUEE A LA PARTIE OPERANTE D'UN SYSTEME	123
CHAPITRE V. DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE DECISIONNELLE,		
APPLICATION A LA CONCEPTION DU DEPARTEMENT LOGISTIQUE DE		
L'USINE EUROFARAD DE CHANTELOUP-EN-BRIE.....		
125		
1.	APPLICATION INDUSTRIELLE : LA CONSTITUTION D'UN	
	DEPARTEMENT LOGISTIQUE	127
1.1.	LA STRUCTURE PREEXISTANTE	127
1.2.	DES PROCESSUS DE PRODUCTION HETEROGENES	129
2.	DIMENSIONNEMENT DU MAGASIN CENTRAL.....	131
2.1.	LA CAPACITE DE STOCKAGE.....	131
2.2.	LES CONFIGURATIONS DE RANGEMENT	135
2.3.	LES MOYENS DE MANUTENTION	136
3.	DESCRIPTION DES ACTIVITES OPERATIONNELLES DU DEPARTEMENT	
	LOGISTIQUE	137
3.1.	LA RECEPTION	139
3.2.	LA PREPARATION DES MATIERES POUR LES ATELIERS	140
3.3.	LE CONDITIONNEMENT	140
3.4.	L'EXPEDITION	141
4.	DIMENSIONNEMENT DE LA PARTIE OPERANTE	141
4.1.	L'EQUIPEMENT DE STOCKAGE.....	142
4.1.1.	<i>Analyse des risques</i>	<i>142</i>
4.1.2.	<i>Définition de l'espace de flexibilité.....</i>	<i>144</i>
4.1.3.	<i>Choix lors de la conception.....</i>	<i>145</i>
4.2.	DIMENSIONNEMENT DE L'EFFECTIF	145
4.2.1.	<i>Analyse des risques</i>	<i>145</i>
4.2.2.	<i>Définition de l'espace de flexibilité.....</i>	<i>147</i>

4.2.3. Choix lors de la conception.....	148
5. VALIDATION EMPIRIQUE.....	150
CONCLUSION.....	155
BIBLIOGRAPHIE.....	161
TABLES DES ILLUSTRATIONS	179
FIGURES	179
TABLEAUX	182
TABLE GENERALE.....	185

RESUME

Dans un environnement économique décrit comme turbulent, la flexibilité est perçue comme un facteur clé de succès que les entreprises devraient maximiser. Pourtant, la notion de flexibilité est souvent présentée comme un concept relatif au domaine étudié. Celle-ci reste par conséquent un concept difficile à appréhender de façon globale et est souvent limitée à une fonction analytique malgré les nombreux travaux dont elle a fait l'objet depuis le début du XXe siècle.

La complexité provient essentiellement de la multiplicité des domaines d'application, en témoignent les travaux portants sur la classification des différents types de flexibilités et de l'absence d'approche homogène pour traiter ces problématiques. L'enjeu, pour développer une gestion de la flexibilité au sein des niveaux stratégique, tactique et opérationnel, est alors d'intégrer cette dimension au processus décisionnel. Aujourd'hui, seules certaines décisions ont pour objet la flexibilité alors que tout processus de décision, par le changement d'état qu'il opère, modifie la topologie de l'espace des situations atteignables et par conséquent la capacité du système à être flexible.

En vue d'établir une véritable politique de couverture du risque efficiente en univers incertain pour les entreprises, notre recherche s'est attachée à proposer une unité de gestion commune pour la flexibilité que nous avons nommée « **potentialité** ». Nous avons ainsi défini un cadre conceptuel sur lequel repose une **méthodologie permettant de concevoir un système à flexibilité souhaitée**.

Nos travaux ouvrent des perspectives de recherches importantes sur deux axes majeurs. Le premier consiste à formaliser l'expression du besoin en termes de flexibilité dans le cadre de la méthodologie proposée. Le second, concerne le développement d'une politique de flexibilité basée sur la gestion d'un portefeuille de potentialités à l'instar d'une gestion de stock.

MOTS-CLES

Flexibilité, Potentialité, Processus de décision, Incertitudes.

ABSTRACT

In an economic environment described as turbulent, flexibility is perceived as a key success factor which firms should maximize. Nevertheless, notion of flexibility is often presented as a concept relative to field studies. Therefore, flexibility remains a difficult concept to take on board in a global manner. Despite the fact that there are many studies on the subject since the beginning of XXth century, flexibility is often limited to an analytical function.

Complexity results essentially from fields applications' multiplicity and on lack of homogeneous approach to handle these problems as shown in carrying works on different flexibility types classifications. The aim in developing a flexibility management within strategic, tactical and operational levels, is to integrate this dimension into decision-making process. In today's business, only few decisions process have for object flexibility while every decision making process, by the change of state that it operates, modifies space typology to reachable situations and consequently, modifies as well system capacity to be flexible.

To establish a real policy for efficient risk cover in uncertain universe for today's businesses, our research attempted to propose a unit of common management for flexibility, which we named "**potentiality**". Therefore, we defined a conceptual framework in which **a methodology allows designing a "wished flexibility" system**.

Our works open on perspectives researches based on two major axes. The first one consists in formalizing expression of need in terms of flexibility within the proposed methodology framework. The second axe concerns developing a flexibility policy based on a potentialities portfolio management following stock management example.

KEY WORDS

Flexibility, Potentiality, Decision Making process, Uncertainties