



HAL
open science

Pilotage hétérarchique des systèmes de production

Damien Trentesaux

► **To cite this version:**

Damien Trentesaux. Pilotage hétérarchique des systèmes de production. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002. tel-00536486

HAL Id: tel-00536486

<https://theses.hal.science/tel-00536486>

Submitted on 16 Nov 2010

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.



Habilitation à diriger des recherches

Présentée à

L'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC)

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH)

UMR CNRS 8530

Dans la spécialité

Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains

Par

Damien Trentesaux

Maître de Conférences

Pilotage hétéarchique des systèmes de production

le 19 décembre 2002

Devant le jury composé de :

Rapporteurs :

Professeur Pierre Borne, Ecole Centrale de Lille

Professeur Jacques Erschler, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse

Professeur Pierre Ladet, Institut National Polytechnique de Grenoble

Examineurs :

Professeur Jean-Paul Bourrières, Université de Bordeaux

Professeur Bernard Grabot, Ecole Nationale des Ingénieurs de Tarbes

Professeur Patrick Millot, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Professeur René Soënen, Université Claude Bernard – Lyon I

Directeur de recherche :

Professeur Christian Tahon, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Avant Propos

Le substantif hétéarchie (en anglais, Heterarchy) et son adjectif hétéarchique (en anglais, heterarchical) constituent des néologismes à la fois en français et en anglais. Ce terme a été formé à partir de deux termes grecs : *heteros* (autre) et *Archein* (commander), signifiant ainsi à l'origine « *commandement par les autres* ».

La première utilisation de ce terme est attribuée à W. S. McCulloch dans le domaine biomédical en 1945 dans l'objectif de décrire l'organisation circulaire dans les réseaux de neurones : soient trois liaisons neuronales A, B C. A influe sur B et B influe sur C. Si A influe sur C, alors A est au sommet de l'organisation hiérarchique, si C influe sur A, alors l'ensemble forme une organisation hétéarchique, une *hétéarchie* [McCulloch, 1945].

Depuis 1945, ce terme a été repris et utilisé dans de nombreux domaines, en particulier, dans celui de la cybernétique. Dans tous les cas, l'hétéarchie renvoie à l'idée d'acteurs différents qui assument en collégialité la coordination d'une action collective donnée et s'oppose par essence au terme *hiérarchie*.

Au risque d'utiliser un néologisme (nous nous en excusons auprès de nos lecteurs), il nous a semblé important d'utiliser ce terme qui reflète plus fidèlement notre activité de recherche plutôt qu'un des autres termes couramment rencontrés dans le domaine du pilotage non centralisé, tels que « distribué » ou « décentralisé ».

Sommaire

<i>Avant Propos</i>	<i>3</i>
<i>Introduction Générale</i>	<i>9</i>
<i>Chapitre I</i> <i>Le pilotage non centralisé : concepts et typologies</i>	<i>11</i>
<i>Introduction</i>	<i>11</i>
<i>I Le concept de système</i>	<i>11</i>
I.1 Nature d'un système _____	11
I.2 Actions systémiques _____	14
<i>II Système de pilotage : concepts et typologies</i>	<i>14</i>
II.1 Nature d'un système de pilotage _____	15
II.2 Actions systémiques _____	20
<i>III Proposition d'une grille d'analyse des modèles de système de pilotage non centralisé</i>	<i>21</i>
III.1 Elaboration d'un modèle générique de système de pilotage non centralisé _____	22
III.2 Analyse et positionnement des typologies _____	23
III.3 Elaboration de la grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé _____	29
<i>Conclusion</i>	<i>29</i>

Chapitre II	
<i>Systèmes de pilotage hétéroarchique : enjeux et modèles</i>	30
<i>Introduction</i>	30
<i>I Les enjeux du pilotage hétéroarchique</i>	30
I.1 Les performances potentielles _____	31
I.2 Problématique _____	34
<i>II Modèles de systèmes de pilotage hétéroarchique : état de l'art</i>	35
II.1 Approches de modélisation des entités et du système de pilotage _____	35
II.2 Positionnement des contributions _____	37
<i>Conclusion</i>	43
Chapitre III	
<i>Contributions et résultats de recherche</i>	50
<i>Introduction</i>	50
<i>I Axe 1 : modèles de systèmes de pilotage décentralisés</i>	50
I.1 Thème 1 : pilotage décentralisé de chaînes de conditionnement _____	51
I.2 Thème 2 : pilotage décentralisé d'ateliers de production _____	53
I.3 Thème 3 : pilotage décentralisé de l'activité de conception de produits complexes _____	61
I.4 Thème 4 : pilotage décentralisé des opérations de maintenance de systèmes complexes _____	63
<i>II Axe 2 : modèles adaptatifs de pilotage</i>	67
II.1 Thème 1 : adaptation dynamique des pondérations _____	68
II.2 Thème 2 : adaptation dynamique des contraintes _____	72
<i>Conclusion</i>	76

<i>Chapitre I</i>	
<i>Perspectives de recherche</i>	78
<i>Introduction</i>	78
<i>I Modèles pour l'amélioration continue des performances</i>	78
I.1 Problématique et objectifs _____	78
I.2 Directions de recherche _____	79
<i>II Conception de systèmes coopératifs pour l'aide au pilotage distribué du cycle de vie des systèmes</i>	80
II.1 Problématique et objectifs _____	80
II.2 Directions de recherche _____	80
<i>III Cadre méthodologique de conception</i>	82
III.1 Problématique et objectifs _____	82
III.2 Directions de recherche _____	82
<i>IV Modèles de pilotage hétéroarchique de systèmes de production de services</i>	84
IV.1 Problématique et objectifs _____	84
IV.2 Directions de recherche _____	84
<i>Conclusion</i>	84
<i>Conclusion générale</i>	86
<i>Références</i>	88
<i>Annexes</i>	102
<i>I Annexe 1 : Liste des principaux acronymes</i>	104
<i>II Annexe 2 : résumé des thèses co-encadrées</i>	105
<i>III Annexe 3 : les neuf niveaux de complexité d'un système</i>	108
<i>IV Annexe 4 : outils de modélisation et de mise en œuvre recensés</i>	109
<i>V Annexe 5 : importance d'une caractérisation axiomatique de la décision</i>	110
<i>VI Annexe 6 : analyses industrielles réalisées dans le cadre du projet Jesmtic</i>	112
<i>VII Annexe 7 : validation des concepts proposés dans le cadre de la conduite d'ateliers de finition</i>	115

Introduction Générale

Mes activités de recherche sont menées sous la direction du professeur Christian Tahon au sein de l'équipe « Systèmes de production » (SP). Cette équipe est intégrée au LAMIH actuellement dirigé par Patrick Millot & Jérôme Oudin. Elles portent sur le pilotage hétéroarchique des systèmes de production de biens et de services. L'objectif est de répondre au besoin en agilité des entreprises, ce qui se traduit essentiellement en termes de réactivité et d'adaptativité. De notre point de vue, une distribution non purement hiérarchique des capacités de pilotage constitue une approche possible pour répondre à ce besoin. Ce pré-requis n'est cependant pas suffisant dans la mesure où ce type de distribution génère également un ensemble de problèmes liés en particulier à la capacité de prédiction (vision à long terme) et d'optimisation (vision locale).

Historiquement, le cadre applicatif des travaux menés au sein de l'équipe se situait au niveau opérationnel de la gestion de production (atelier, ligne de production) [Tchako, 1994], [Trentesaux, 1996]. Depuis quelques années, nous avons eu l'opportunité d'appliquer et d'étendre nos concepts à d'autres domaines, en particulier ceux de la co-conception de produits complexes et de la planification réactive d'opération de maintenance.

Ce document reprend la partie scientifique du document original. Il est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre décrit les concepts et typologies relatifs au pilotage non centralisé des systèmes de production. Le second chapitre présente les enjeux, les approches de modélisation et positionne les modèles et outils relatifs aux systèmes de pilotage hétéroarchiques développés dans la littérature nationale et internationale. Le troisième chapitre positionne mon activité de recherche et décrit les principaux résultats obtenus. Un ensemble de perspectives de recherche à moyen et long terme sont présentées dans le quatrième chapitre.

Chapitre I

Le pilotage non centralisé : concepts et typologies

Introduction

Le champ disciplinaire relatif au concept de pilotage est celui de la cybernétique. La cybernétique traite de l'étude des processus de commande et de communication chez les êtres vivants, des machines et des systèmes sociologiques et économiques [Wiener, 1948], [Lhote et al., 1999]. L'automatique, la robotique, l'intelligence artificielle, la recherche opérationnelle et plusieurs autres domaines scientifiques peuvent alors être considérés comme différentes branches (outils, modèles, méthodes) constituant le socle théorique de la cybernétique [Sage, 2000]. Selon le club des Enseignants et des Chercheurs en Electronique, Electrotechnique et Automatique (club EEA), l'automatique traite des concepts, méthodes, moyens et outils des systèmes dynamiques, des signaux et de l'information, pour la conduite (planification, ordonnancement, commande, supervision) et la prise de décision associant l'opérateur humain.

Le cadre conceptuel de nos travaux est celui du pilotage appliqué aux systèmes de production de biens et de services. De notre point de vue d'automaticien, le pilotage consiste à décider dynamiquement des consignes pertinentes à donner à un système soumis à perturbation pour atteindre un objectif donné. Cependant, d'autres domaines relevant de la cybernétique peuvent contribuer à l'élaboration et à l'amélioration de modèles de pilotage. Nous nous sommes efforcés d'intégrer les résultats des recherches émanant de ces domaines.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les concepts de système, de système de pilotage et de système de pilotage non centralisé selon un cadre de référence systémique commun. Ce cadre nous permet ensuite d'établir une grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé conduisant, dans le chapitre suivant, à proposer une typologie des contributions significatives dans le domaine du pilotage hétérarchique.

I Le concept de système

Le concept de système peut être défini et caractérisé de différentes manières. Une approche relativement bien adaptée à la description des systèmes consiste à répondre à plusieurs questions clés. Dans un souci de structuration de notre exposé, nous adopterons l'approche de caractérisation prônée par Lemoigne qui nous semble relativement judicieuse. Elle consiste à caractériser un objet système général par sa *nature* (quel est-il ?) et par *l'action* qui lui est appliquée (que fait-on avec ?) [Lemoigne, 1994]. La caractérisation selon la nature peut alors être affinée par l'utilisation du paradigme (PQC)³: Pourquoi, Quoi, Comment, Qui, Quand, Pour quoi faire, Combien, Conséquences [Vautier, 2001].

I.1 Nature d'un système

Il existe de nombreuses approches pour caractériser la nature d'un système. Une analyse des différentes propositions a été réalisée dans [Delsaut-Furon, 2000]. Celles que nous considérons comme les plus importantes et représentatives de cette diversité sont celles proposées par Lemoigne [Lemoigne, 1994], l'APICS [APICS, 1998], Le Gallou [Le Gallou, 1992], Mesarović [Mesarović et al., 1980], Mulkens [Mulkens, 1995] et Meinadier [Meinadier, 1998].

Nous proposons dans le cadre de ce document de nous baser sur le fait que la majorité des points de vue peut être analysée selon deux vues systémiques complémentaires de la nature d'un système : une vue interne et une vue externe.

Cette approche est, en particulier, équivalente à celle proposée par Meinadier dans le sens où l'on retrouve les différents éléments clés qu'il suppose nécessaires pour caractériser un système (vue fonctionnelle du système : fonctions interne et externe, vue organique du système : agencement d'organes internes). Elle présente cependant l'avantage de dissocier le système (vue interne) de son contexte (vue externe).

On distingue également la vue logique d'un système, traitant de l'information et la vue physique, traitant de la matière et de l'énergie [Lemoigne, 1994]. Nous nous intéressons ici essentiellement à la vue logique.

I.1.1 Vue externe

La vue externe met en évidence, pour un système donné :

- son environnement: ce avec quoi il interagit (interaction avec l'environnement par l'intermédiaire de variables d'entrées et de sorties),
- sa finalité ou sa mission : ce pour quoi il existe (ou a été conçu), sa définition.

Une distinction doit être faite entre objectif d'une part et finalité ou mission d'autre part : un objectif correspond à une finalité ou une mission dont les paramètres sont déterminés sur un horizon donné (une finalité de pilotage du flux de sortie d'une ligne de conditionnement pourra se traduire par un objectif de production de 30.000 bouteilles/heure) [Berrah, 1997], [Meinadier, 1998].

I.1.2 Vue interne

Lemoigne identifie trois vues internes d'un système : son activité, sa structure et son évolution [Lemoigne, 1994]. De manière relativement similaire, Meinadier considère que la vue interne d'un système peut être fonctionnelle ou organique [Meinadier, 1998]. Nous considérons qu'il existe trois vues internes possibles : une vue fonctionnelle, une vue organique et une vue évolutionniste. Nous présentons les concepts inhérents à ces trois vues.

I.1.2.1 Vue fonctionnelle d'un système

La vue fonctionnelle décrit *ce que fait et doit faire* un système.

Les concepts liés à ce point de vue sont essentiellement ceux de fonction, tâche, activité et processus. Ils sont spécifiquement liés à un système identifié.

Une activité décrit ce qui est fait (aspect effectif) tandis qu'une tâche ou une fonction décrit ce qui doit être fait (aspect normatif) [Vernadat, 1999]. Il est possible de regrouper un ensemble d'activités pour former un processus constituant un enchaînement finalisé d'activités. Il en existe plusieurs définitions :

- la norme ISO 9001 définit un processus comme l'ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie [AFNOR, 2000],
- Lemoigne considère qu'un processus se définit par un ensemble d'activités (transformation, transport et de stockage) appliquées à un ensemble d'objets de nature matérielle, informationnelle ou énergétique (modèle TEF temps/espace/forme) [Lemoigne, 1994]. Par exemple, concernant des objets de nature informationnelle, des activités de mémorisation sont de type T, des activités de communication, de type E, des activités de calcul ou de décision, des activités de type F,
- en informatique on distingue des données des processus qui correspondent à des traitements sur des données [Stroustrup, 1997].

I.1.2.2 Vue organique d'un système

La vue organique décrit *qui fait quoi et avec qui*. Cette vue fait référence à un ensemble de sous-systèmes fonctionnels composant un système donné. Elle permet d'introduire la récursivité dans les systèmes dans la mesure où l'on s'intéresse ici à l'intégration de sous-systèmes dans un système plus vaste (mécanisme d'intégration) et inversement, à la décomposition d'un système en sous-systèmes (mécanisme de décomposition).

Les concepts relatifs à la vue organique d'un système sont principalement ceux d'agencement, de structure et d'organisation.

Le concept de structure fait référence à l'ensemble des relations suffisamment stables et permanentes liant les parties entre elles [Beving, 1995], [Lemoigne, 1994].

Pour [Camalot, 2000], l'agencement, parfois appelé mode d'organisation, décrit la manière dont les différents organes et individus d'un système sont mis en relation. Pour [Meinadier, 1998], l'agencement décrit l'articulation entre systèmes.

Certains agencements peuvent être dynamiques (auto-organisation), et d'autre part la structure peut contenir plus d'éléments statiques que le seul agencement (ce point sera illustré ultérieurement).

Le concept d'organisation, plus large, permet de définir l'intégration fonction/système.

Pour [Lemoigne, 1994], une organisation correspond de manière générale à la conjonction d'une structure instantanément stable et d'un ensemble d'activités. Pour Mesarović, une organisation consiste en une famille non réduite à un singleton de sous-systèmes, agencés et en interaction [Mesarović et al., 1980]. Pour Meinadier, la différence entre organisation et architecture est d'ordre fonctionnel : l'intégration conjointe de la dimension fonctionnelle et de l'organisation d'un système définit plus globalement une architecture [Meinadier, 1998].

L'interaction constitue un élément important d'une organisation. Dans ce document, elle peut être assimilée à un processus *externe* (entre systèmes), en complément des processus *internes* traduisant exclusivement la vue fonctionnelle interne d'un système.

Ce point de vue est également celui de Lemoigne qui considère deux types de processus: les processus d'échange externe entre sous-systèmes et les processus internes [Lemoigne 1994]. Les processus externes, ou processus d'interaction, peuvent être définis comme l'action réciproque entre plusieurs sous-systèmes [Hachette, 2000]. Un processus externe fondamental (i.e., minimal) est la communication. Elle correspond à la transmission d'informations d'un sous-système à un autre. Un autre processus externe est celui de synchronisation, généralement considérée comme une communication spécialisée dans l'établissement d'un référentiel temporel commun.

I.1.2.3 Vue évolutionniste d'un système

La vue évolutionniste d'un système traduit son évolution, c'est-à-dire les changements opérés sur ce système sur une échelle de temps différente, plus étendue, que celle relative aux vues fonctionnelles et organiques.

Les concepts relatifs à la vue évolutionniste d'un système sont essentiellement ceux d'évolution, d'adaptativité et d'auto-X (X : apprentissage, organisation, etc.).

Il y a évolution quand il y a changement soit de l'organisation du système soit de sa finalité [Lemoigne, 1994]. Le préfixe « auto » (auto-apprentissage, auto-organisation, auto-configuration, auto-finalisation, etc.) précise que le système réalise lui-même cette évolution, évolution qui peut être interne, provoquée par le système lui-même, ou externe déclenchée par son environnement.

Un système est à auto-apprentissage s'il est capable de modifier ses caractéristiques pour mieux s'adapter à son environnement en tenant compte de son expérience antérieure [Meinadier, 1998]. Dans ce cadre, pour l'APICS, auto-apprentissage et adaptativité sont des concepts relativement proches : "adaptativity is the ability of a control system to change its own parameters in response to a measured change in operating conditions" [APICS, 1998]. Dans le domaine de la commande, l'adaptation consiste en l'ajustement automatique en ligne des régulateurs des boucles de commande afin de réaliser ou de maintenir un certain niveau de performance quand les paramètres du procédé à commander sont inconnus et/ou varient dans le temps [Landau, 1996]. L'adaptation se différencie alors d'une réaction par la capacité de pouvoir modifier certains paramètres (notamment décisionnels) en fonction des expériences passées (apprentissage, mémorisation, etc.).

L'auto-organisation d'un système correspond au choix d'une organisation de telle sorte qu'un objectif global soit recherché et approché au plus près [Mesarović et al., 1980]. Pour Meinadier, un système est dit à auto-organisation s'il est capable d'évoluer pour mieux poursuivre sa finalité face à des modifications internes ou externes [Meinadier, 1998]. Pour Lemoigne, il y a auto-organisation quand il y a création/suppression de processus ou de relations à l'initiative du système [Lemoigne, 1994]. D'autres définitions sont données dans [Brezocnik et Balic, 2001], [Parunak et Brueckner, 2001].

L'auto-finalisation est la phase ultime de l'évolution où le système est capable de définir et de modifier ses propres finalités [Lemoigne, 1994].

I.1.3 Synthèse

La figure 1 propose le cadre de référence structurant la description de la nature d'un système. Ce cadre sera utilisé tout au long de ce document. Le symbole '?' indique l'objet de l'analyse selon la vue interne ou externe.

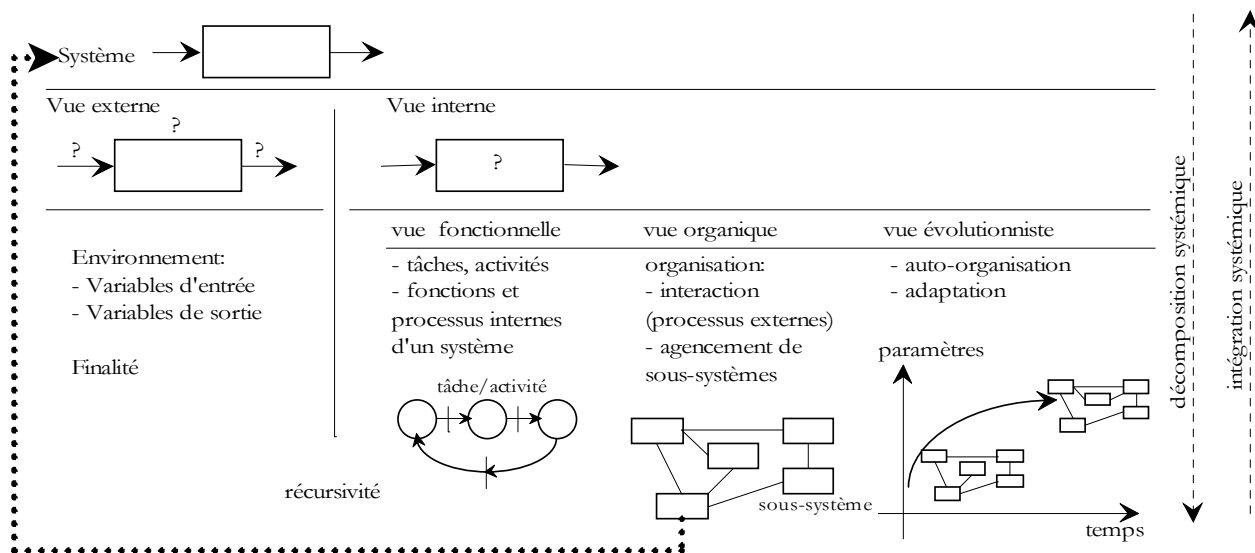


Figure 1. Cadre de référence systémique (nature d'un système).

1.2 Actions systémiques

Un projet ou un programme relatif à un système définit son cadre (cycle) de vie [Lemoigne, 1994]. Dans ce document, pour éviter toute confusion, un projet ou un programme relatifs à un système seront désignés par « action systémique ». Tout comme pour la nature d'un système, il existe de nombreuses caractérisations de l'ensemble des actions systémiques [Meinadier, 1998], [Delsaut-Furon, 2000]. Relevons en particulier l'approche proposée par Lemoigne qui définit la conception systémique, la simulation systémique et l'analyse systémique [Lemoigne, 1994].

Ces actions se placent dans le cadre plus large du cycle de vie du système considéré. Dans [Delsaut-Furon, 2000] un cadre générique du cycle de vie, établi à partir d'une analyse des différentes normes identifiées sur ce sujet a été proposé. Le cycle de vie d'un système se définit alors au travers des quatre actions systémiques génériques de conception, de production/réalisation, d'utilisation/exploitation et de recyclage/démantèlement.

Dans ce document, nous nous intéressons essentiellement à l'action de conception des systèmes, et plus particulièrement, à celle de modélisation.

L'action de conception consiste à définir (concevoir) un système pour un environnement, une finalité et un ensemble de contraintes donnés, regroupés sous la forme d'un cahier des charges [Meinadier, 1998]. Cette action s'appuie sur un modèle paramétrable du système et un processus de conception ayant pour objectif l'identification des paramètres du modèle selon le contexte exprimé dans le cahier des charges [Delsaut-Furon, 2000]. Il existe de nombreuses définitions du terme « modèle », toutes relativement équivalentes [Lemoigne, 1994], [Meinadier, 1998], [APICS, 1998]. Nous adopterons celle proposée par l'APICS : « a representation of a system that attempts to relate the most important variables in the system in such a way that analysis of the model leads to insights into the system » [APICS, 1998]. De notre point de vue, tout *modèle* de système doit nécessairement pouvoir être décrit selon les deux vues fonctionnelle et organique, tandis que la capacité d'évolution d'un modèle n'est pas obligatoire (une telle absence traduit l'invariance du modèle). A ce niveau apparaissent ainsi les ressources physiques organisées (vue organique), qui vont effectivement mettre en œuvre les processus internes (vue fonctionnelle) du système considéré et éventuellement, provoquer son évolution au fil du temps (vue évolutionniste).

II Système de pilotage : concepts et typologies

Après avoir caractérisé le concept de système, nous décrivons dans cette partie la nature d'un système de pilotage suivant le cadre de référence systémique présenté figure 1 (en positionnant les principales typologies rencontrées dans la littérature relatives à la vue interne) puis les actions systémiques menées sur un tel système.

II.1 Nature d'un système de pilotage

La nature d'un système de pilotage est analysée selon les vues externe et interne. La vue interne offre en outre un cadre d'analyse général permettant de positionner les principales typologies des systèmes de pilotage rencontrées dans la littérature et relatives à la vue interne des systèmes de pilotage.

II.1.1 Vue externe

Nous présentons les invariants traduisant la vue externe d'un système de pilotage en général (environnement, finalité) puis plus particulièrement du système de pilotage d'un système de production de biens et de services.

II.1.1.1 Finalité

A l'heure actuelle, il n'existe pas de définition unique ni stabilisée du terme pilotage¹.

Par exemple, dans le cadre applicatif de la production de biens et de services [Giard, 1988], la norme ISO propose pour le pilotage la définition suivante: "Factory control is defined as the actuation of a plant to make products, using the present and past observed state of the plant and demand from the market" [Baker, 1998] voir également [Broissin, 1999] et [Ounnar, 1999] pour plusieurs définitions similaires. [Dilts et al., 1991] propose quant à lui la définition suivante: "the control system of an automated manufacturing system coordinates and directs the parts handling and processing activities that transform raw materials into finished products".

De manière générale, nous considérons que le pilotage consiste à décider dynamiquement des consignes pertinentes à donner à un système soumis à perturbation pour atteindre un objectif donné décrit en termes de maîtrise de performances [Trentesaux et al., 2000b]. La notion de *maîtrise* intègre non seulement celle de maintien d'un niveau de performance donné, mais également celle de progrès (évolution vers un niveau de performance souhaité ou amélioration continue, ex. Kaizen) [Berrah, 1997]. De notre point de vue, la notion de *performance* doit être placée dans un cadre plus large qu'une 'simple' évaluation de l'efficacité (qui ne concerne que les résultats du système perturbé par rapport aux objectifs recherchés). Ainsi, en partant du paradigme qu'un «moyen de réalisation» fournit un «résultat» pour un «objectif» assigné [Bescos et al., 1995], il est indispensable, dans le cadre concurrentiel des marchés, d'étendre l'analyse des performances au-delà de la simple comparaison entre résultats et objectifs pour intégrer des mesures autres telles que celle portant sur l'efficacité et la pertinence [Trentesaux et Pujo, 2001]. Relevons, à titre illustratif, la typologie d'indicateurs de performances proposée par Massotte et Bataille qui tient compte de ces différents aspects : coût généré pour le produit, réactivité, adaptation et qualité des produits et processus [Massotte et Bataille, 2000].

II.1.1.2 Environnement

Le concept de pilotage concerne la définition et l'organisation des inter-relations entre deux systèmes : un système physique (appelé système opérant) et un système de décision (appelé système de pilotage), conduisant à la mise en œuvre d'une boucle de rétroaction [Lemoigne, 1994]. Les systèmes auxquels nous nous intéressons sont ainsi nécessairement des systèmes bouclés (mécanisme de rétroaction). Le comportement dynamique des systèmes de pilotage dépend de cette rétroaction, ce qui induit des contraintes temporelles de réaction sur le système de pilotage et conditionne la qualité des résultats [Forrester, 1980]. Cette approche par rétroaction est basée sur une hypothèse fondamentale : l'impossibilité de connaître au niveau de détail souhaité le comportement des systèmes opérants pilotés en raison de l'incertitude et de l'imprécision des données et des perturbations subies par les systèmes opérants.

Il existe plusieurs modèles d'environnement du pilotage représentant ces différents bouclages. Par exemple, la figure 2 décrit le modèle d'environnement du pilotage proposé par Lemoigne [Lemoigne, 1994].

¹ Il faut noter que le terme pilotage est essentiellement utilisé dans la communauté francophone. Il n'a pas d'équivalent dans les pays non francophones (en anglais, le terme « pilot » n'est pas employé car il présente une connotation « prototype », « essai pilote »). Le terme « pilotage » est généralement équivalent au terme « control » en anglais [APICS, 1998], mais ce dernier signifie également « contrôle/commande » au sens de l'automatique.

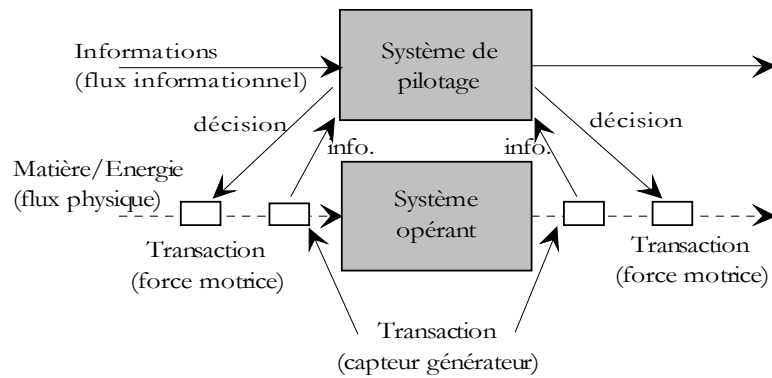


Figure 2. Modèle de l'environnement du pilotage selon Lemoigne.

Ce modèle est très général et ne permet pas d'introduire les notions que nous considérons comme fondamentales, en particulier, les notions de perturbation et de performance.

C'est pourquoi, nous avons proposé un modèle canonique de l'environnement d'un système de pilotage, fig. 3 [Trentesaux et al., 2000b]. Ce modèle, inspiré des modèles fondamentaux de contrôle/commande [Landau, 1996], [Langchamp, 1995], nous a permis d'établir notre terminologie et a été validé dans de nombreux contextes [Delsaut-Furon, 2000], [Trentesaux et Sénéchal, 2002], [Le Quéré et al., 2001].

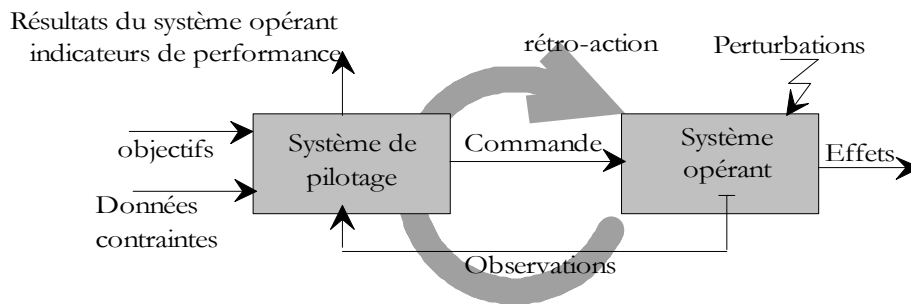


Figure 3. Modèle de l'environnement d'un système de pilotage.

Les informations en entrée du système de pilotage sont les objectifs (résultats souhaités du système opérant), les autres données et contraintes externes (issues de l'environnement) ainsi que les observations effectuées sur le système opérant (états internes et mesure des effets). Les informations en sortie sont les signaux de commande, les résultats du système opérant ainsi le sous-ensemble des indicateurs de performance requis par l'environnement [Trentesaux et Sénéchal, 2002], [Berrah, 1997].

Dans le cadre applicatif de la production de biens et de services, il existe de nombreux modèles de l'environnement du système de pilotage des systèmes de production. Parmi ceux-ci, citons le modèle de référence issu de la normalisation ISO qui est le plus répandu [Baker, 1998], cf. figure 4. Relevons également les modèles proposés par Archimède [Archimède, 1991], [Ounnar, 1999] et [Berrah, 1997].

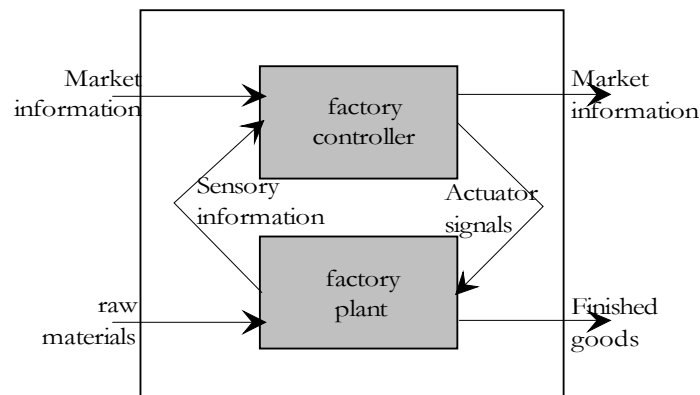


Figure 4. Modèle de référence ISO.

II.1.2 *Vue interne : description et typologies*

La vue interne nous permet de positionner la majorité des typologies des systèmes de pilotage existantes suivant les trois vues fonctionnelle, organique et évolutionniste.

II.1.2.1 Typologie des processus de pilotage (vue fonctionnelle)

Dans les processus mis en œuvre par un système de pilotage, les objets manipulés sont exclusivement de nature informationnelle [Lemoigne, 1994].

Les processus de pilotage sont naturellement conçus selon la logique de causalité temporelle induite par la boucle de rétroaction et le flux d'information circulant entre les systèmes de pilotage et opérant (cf. figure 2). Par exemple, Gérard Bel propose de définir un processus de pilotage au travers de deux activités (direction d'un processus opérant, mesure sur l'état de ces processus pour déterminer les actions les plus appropriées) [Bel, 1991]. Meinadier propose à cet effet trois activités (capter, corriger, commander) [Meinadier, 1998] tout comme l'APICS (collection, analysis of feedback, control) [APICS, 1998]. Dans le domaine multi-agent, un processus de pilotage est couramment composé de trois activités : perception, cognition et action [Mandiau et Grislin, 2002].

Nous avons identifié plusieurs approches typologiques des processus de pilotage.

II.1.2.1.1 *Approche par type de finalité*

Cette approche considère le type de finalité recherché et identifie deux types de processus de pilotage [Longchamp, 1995]:

- des processus de pilotage ayant pour objet l'élaboration d'une première composante du signal de commande en fonction des signaux déterministes en entrée du système de pilotage. Ces processus sont appelés « processus de poursuite ». Ils traduisent une finalité de recherche de progrès.
- des processus de pilotage ayant pour objet l'élaboration d'une seconde composante du signal de commande en fonction des perturbations aléatoires en entrée du système opérant. Ces processus sont appelés « processus de régulation ». Ils traduisent une finalité de maintien d'un niveau satisfaisant.

II.1.2.1.2 *Approche par type d'événement*

Une seconde approche typologique se base sur la capacité d'anticipation des événements et conduit à l'identification de deux types de processus de pilotage [Broissin, 1999], [Berchet et al., 1999] :

- un processus de pilotage réactif, qui se base exclusivement sur des événements passés,
- un processus de pilotage anticipatif qui se base sur des événements futurs : ordonnancement prévisionnel, etc.

II.1.2.1.3 *Approche suivant l'horizon temporel du processus*

Cette approche concerne essentiellement le cadre applicatif de la production de biens et de services en référence au concept CIM. On peut relever deux typologies de processus basées sur l'horizon temporel :

- processus de pilotage opérationnel (couramment appelé « pilotage temps réel »), tactique et stratégique [Dindeleux, 1998], [Dindeleux, 1992], [Doumeingts, 1990],
- processus de pilotage technique et économique [AFGI, 1992].

Le concept de pilotage temps réel est largement étudié dans la littérature (la notion de « temps réel » est malgré tout difficile à cerner). Il existe différents termes anglais traduisant ce concept, selon le type de production concerné : « production activity control », « process control », etc. [APICS, 1998]. On constate cependant qu'il existe encore de nombreuses interprétations concernant le positionnement des différents concepts relatifs au pilotage, voir par exemple [Huguet, 1996], [De Smet, 1995], [Patriti, 1998], [Tchako, 1994], [Berruet, 1998]. A titre illustratif, il n'existe pas à ce jour de consensus sur le positionnement relatif pilotage/conduite/supervision. L'équipe SP du LAMIH considère que la supervision est une composante du pilotage [Dindeleux, 1992], alors que [Berruet, 1998] considère que la supervision intègre le pilotage. De même, toujours selon [Dindeleux, 1992] ou [Archimède, 1991], la conduite peut être assimilée à la composante décisionnelle du pilotage, alors que selon [Longchamp, 1995], la conduite est synonyme de supervision. Enfin, selon Bel, la conduite est fonctionnellement synonyme de pilotage, mais présente une dimension temporelle plus large, plus étendue que le pilotage (qui se restreint alors au pilotage temps réel). Cette position est essentiellement

justifiée d'un point de vue purement étymologique [Bel, 1991]. Enfin, pour certains, le pilotage est nécessairement temps réel (au sens niveau opérationnel, court terme).

Dans le domaine du pilotage de la production manufacturière (« production activity control »), l'APICS particularise le processus de pilotage en un processus de pilotage d'atelier qui se compose alors de quatre activités spécifiques: schedule, control, measure and evaluate the effectiveness of production operations [APICS, 1998]. De manière relativement proche, Archimède considère que le processus de pilotage d'atelier met en jeu quatre activités : planifier, lancer, suivre et réagir [Archimède, 1991]. Enfin, [Dilts et al., 1991] identifie trois types de processus de pilotage : ordonnancement des produits, cheminement des produits et allocation de ressource.

II.1.2.1.4 Approche par type de décision

Un processus de pilotage est nécessairement décisionnel [Dilts et al., 1991]. Cette capacité décisionnelle permet de situer le pilotage par rapport au contrôle/commande [Landau, 1996] dès lors qu'on suppose qu'il existe au moins un processus décisionnel (selon cette optique, les décisions vont en effet conduire à l'élaboration des signaux de commande [Lemoigne, 1994]).

Il y a décision « quand l'action d'un système est un événement pour l'occurrence duquel aucun changement dans l'environnement du système n'est ni nécessaire, ni suffisant », [Lemoigne, 1994]. Cette approche de définition est assez semblable à celle proposée par Mesarović qui introduit également le concept d'algorithme résolvant dans un système décideur [Mesarović et al., 1980]. Autrement dit, une décision constitue un moyen de résoudre un problème, c'est-à-dire de réduire une distance entre une situation constatée (par exemple, un résultat constaté) et une situation désirée (par exemple, un objectif de résultats) [Pomerol, 1997]. La capacité de décision est étroitement liée au concept d'autonomie pour lequel il existe de nombreuses définitions, par exemple [Erschler et al., 1997], [Van Brussel et al., 1998], [Ferber, 1995], [Agimont, 1996], [Tchako, 1994] ou [Caridi et Sianesi, 2000]. Quelle que soit la définition, on constate que l'autonomie ne s'obtient pas dans l'indépendance mais dans la maîtrise de ses liens avec l'environnement afin de pouvoir disposer de moyens de « riposter face aux aléas ».

Trois catégories de processus de pilotage peuvent être distinguées suivant les types de décision possible :

- processus de pilotage selon le type de décision : à base de choix (sous contrainte, sur contrainte et portant sur la première ou la seconde alternative [Erschler et al., 1997]), de tri ou de rangement [Roy et Bouyssou, 1993]. Le premier type de processus (choix) est prépondérant en gestion de production [Thiel, 1993].
- processus de pilotage selon la présence d'un opérateur (aide au pilotage) ou non (pilotage automatisé) [Trentesaux et al., 1997]. Dans le premier cas, il est possible d'intégrer la complexité de la tâche de l'opérateur humain dans le soutien à la réalisation des activités de décision [Millot, 1999].
- processus de pilotage structuré ou peu structuré [Simon, 1977] ou de manière relativement proche, des processus de pilotage à base de compétence, règle ou connaissance [Rasmussen, 1983].

Il est important de noter que le paradigme de rétroaction conduit à boucler certains processus entre eux et ne permet pas d'identifier un lien de causalité univoque. Par exemple, on acquiert des informations, on communique et on décide pour améliorer les performances et on mesure des performances pour prendre des décisions.

II.1.2.2 Typologie des organisations (vue organique)

On peut fondamentalement considérer deux types de systèmes de pilotage : centralisé et non centralisé. La distinction tient à l'unicité ou la multiplicité de systèmes capables de décision [Mintzberg, 1982], [Mesarović et al., 1980].

Le terme « non centralisé » s'oppose naturellement au terme « centralisé ». Cependant, il n'est guère usité dans la littérature où les termes « décentralisé », « hétérarchique » et « distribué » sont les plus courants. L'analyse de la littérature à ce sujet montre que, très souvent, ces trois termes sont utilisés comme synonymes. En outre, ils sont rarement définis au préalable.

Cependant, un nombre non négligeable d'auteurs proposent des définitions. Les quelques exemples donnés ci-dessous illustrent la diversité des acceptations :

- Decentralized manufacturing control systems are comprised of autonomous components (parts, machines, etc), which communicate with other components in the system to complete their tasks, without any central controller [Krothapalli et Deshmukh, 1997].
- In decentralized control, the operating part of the system is structured into sub-parts, each sub-part being controlled in an univoque way by elements that we will name "execution entities" [Ferrarini et al., 1993].

- Heterarchical control systems are characterized by fully distributed control (no supervisor), retention of a minimal amount of global information, and cooperation among loosely coupled, autonomous communicating entities [Duffie et Prabhu, 1996].
- Distributed control systems consist in a set of local decision units ensuring a reactive system response. Usually, these distributed systems require a coordinator that promotes dynamic collaboration of intelligent entities, with the goal of achieving both local and global objectives [Maione et Naso, 2001].

Ces définitions présentent des différences notables. Ainsi, la distribution (ou décentralisation) du pilotage semble être une notion définie :

- soit par rapport à la partie opérative (Krothapalli et Deshmukh, Ferrarini et al.),
- soit par rapport aux types de structures mises en oeuvre (Duffie et Prabhu, Maione et Naso).

Malgré cette diversité, il est toutefois possible de relever un dénominateur commun : un ensemble de sous-systèmes capables de décision [Pétin et al., 1998], [Chi et Turban, 1995], autonomes et (auto-)organisés. Nous proposons de désigner par « entités » un tel sous-système. Ces entités peuvent récursivement constituer des systèmes : elles sont donc caractérisées selon le point de vue externe, par une finalité et un environnement, et selon le point de vue interne, par les vues fonctionnelle, organique et évolutionniste. Notre approche est générique dans le sens où elle nous permettra d'identifier différents types d'entités (par exemple : centre de conduite, station intégrée de pilotage, agent de pilotage, opérateur humain, manufacturing holon, I-machine, etc.) et de fédérer sous ce terme des objets virtuels (logiciels) et réels (opérateurs humains).

Les concepts clés qui sont associés à ce modèle générique d'entité sont ceux de décision, d'autonomie définis auparavant et d'organisation.

Nous définissons une organisation comme la mise en relation (intégration) entre un *agencement* entre entités d'une part avec un ensemble de *modes d'interaction* entre celles-ci d'autre part relatifs aux *processus externes* entre entités [Mesarović, et al., 1980], les *processus internes* restant exclusivement du ressort de la vue fonctionnelle.

Dans ce cadre, la non-centralisation ne dépend a priori ni du contexte de structuration ni des ressources composant le système opérant. Les distinctions entre les différents termes rencontrés (distribué, hétérarchique, décentralisé) seront analysées plus finement ultérieurement.

II.1.2.3 Typologie des évolutions (vue évolutionniste)

Une première typologie se base sur l'hypothèse qu'un système de pilotage évolue entre plusieurs zones de fonctionnement. Au sein d'une zone de fonctionnement, les rétroactions de pilotage sont nécessairement « négatives ». Elles permettent au système de pilotage de maintenir sa structure ou certains de ses paramètres dans des intervalles restreints (homéostasie). Les rétroactions « positives » conduisent, elles, à faire évoluer un système de pilotage d'une zone de fonctionnement à une autre (morphogénèse) [Massotte, 1999]. Homéostasie et morphogénèse sont les deux notions qui permettent d'établir cette première typologie.

Une seconde typologie est fondée sur les niveaux de complexité des systèmes [Boulding, 1956] citée dans [Braesch et Haurat, 1995] donnée en annexe 3. Elle a servi de support au développement de plusieurs autres typologies, en particulier, celles de Lemoigne et Mesarović qui sont relativement proches. Trois types de pilotage sont définis : le pilotage élémentaire (niveau 7), le pilotage auto-organisé pour Lemoigne ou adaptatif ou à apprentissage pour Mesarović (niveau 8), le pilotage auto-finalisé (niveau 9) [Lemoigne, 1994], [Mesarović et al., 1980].

Nous considérons qu'un pilotage de niveau 7 ne peut permettre d'atteindre que l'efficacité, puisqu'un tel système est complètement déterminé d'un point de vue organique et fonctionnel.

La possibilité offerte au niveau 8 est :

- soit de créer ou de supprimer certains processus ou relations (référence à l'auto-organisation selon Lemoigne),
- soit de modifier les paramètres de ces processus ou relations (référence à l'adaptation selon [Landau, 1996]),

Elle est relative à la possibilité de modification des moyens mis à disposition pour atteindre les objectifs assignés. A ce niveau, la recherche de l'efficacité (basée sur l'évaluation de l'adéquation entre les moyens et les objectifs) prend son sens.

L'auto-finalisation (niveau 9) se traduit dans le cas d'un système de pilotage, par la possibilité, sur un intervalle temporel donné, de modifier (si ces données existent en entrée) les valeurs de ses objectifs ou de générer ses propres

objectifs (si ces données ne sont pas identifiables en entrée). Ce niveau fait donc notamment référence à la possibilité d'adapter les objectifs aux moyens existants (recherche de la pertinence). Une confusion peut être possible car l'auto-finalisation concerne l'auto-détermination des objectifs et non celle des finalités (un système de pilotage présente toujours la même finalité : celle de pilotage). Un terme plus approprié serait par exemple auto-objectivation, terme non usité. L'auto-finalisation au sens strict (où un système décide de sa finalité) n'est donc pas considérée dans ce document.

En résumé, nous caractérisons :

- un système de pilotage de niveau 7 par l'absence de décision relative soit à ses moyens, soit à sa finalité (recherche de l'efficacité seule),
- un système de pilotage de niveau 8 par l'absence de décision relative à sa finalité mais par la présence de décisions relatives à ses moyens (recherche de l'efficacité et de l'efficience),
- un système de pilotage de niveau 9, par la présence également de décisions relatives à ses moyens et à ses objectifs (recherche de l'efficacité, de l'efficience et de la pertinence).

II.1.3 Grille d'analyse de la nature des systèmes de pilotage

Une grille d'analyse de la nature des systèmes de pilotage, résumant l'ensemble des typologies relevées, est donnée figure 5. Cette grille d'analyse s'appuie logiquement sur le cadre de référence systémique introduit dans la partie précédente (figure 1).

Système de pilotage: est un système			
Vue externe		Vue interne	
Environnement: - Variables d'entrée objectifs, contraintes, observations du système opérant	vue fonctionnelle: typologie des processus	vue organique: typologie des organisations	vue évolutionniste: typologie des évolutions
- Variables de sortie commande, résultats, indicateurs de performances	Processus de pilotage - par type de finalité - par type d'événement - suivant l'horizon temporel - par type de décision	- organisation centralisée/non centralisée - niveau 7/8/9 de pilotage	
Finalité: maîtrise des performances du couple (système opérant, système de pilotage)			

Figure 5. Grille d'analyse de la nature d'un système de pilotage.

II.2 Actions systémiques

II.2.1 Description des actions

Nous déclinons les trois principaux types d'actions relatives à un système de pilotage.

L'action de conception consiste à définir un système de pilotage, c'est-à-dire à expliciter les lois de transformation des variables d'entrée en variables de sortie. Le modèle du système de pilotage est la plupart du temps établi en fonction d'un modèle donné du système opérant (selon l'adage désormais classique, un bon régulateur doit être un modèle du système opérant).

L'action d'exploitation consiste à spécifier dynamiquement toutes les valeurs d'entrée du système de pilotage (objectif, données, contraintes, observations). Si le système opérant est un modèle (de partie opérative, etc.), l'exploitation est une simulation. Si le système opérant traite de la matière ou de l'énergie (système physique), l'exploitation est dite sur site ou réelle [Trentesaux et Sénéchal, 2002].

L'action d'analyse consiste à vérifier soit a priori avant la phase d'exploitation, soit durant cette phase, soit a posteriori après cette phase, les performances (adéquation moyens/objectifs/résultats) du couple (système opérant, système de pilotage) [Sénéchal et Trentesaux, 2002].

Nous nous intéressons principalement à l'action de modélisation des systèmes de pilotage et aux problématiques qu'elle engendre.

Les actions d'exploitation et d'analyse seront abordées plus spécifiquement dans le cadre des expérimentations menées pour la validation de nos propositions.

II.2.2 Problématique générale de la modélisation d'un système de pilotage

La problématique de la modélisation d'un système de pilotage peut être décrite fondamentalement par plusieurs types de contraintes pouvant être déclinées en terme d'efficacité d'une part et d'efficience et de pertinence d'autre part :

- En terme d'efficacité :
 - contraintes provenant de la dynamique et de la complexité des processus opérants considérés par rapport aux objectifs d'efficacité recherchés: décider vite (« besoin d'agir sans délai ») ou décider bien (« besoin de mieux comprendre la situation ») [Mesarović et al., 1980].
 - contraintes résultant de l'hypothèse relative à l'impossibilité de connaître au niveau de détail souhaité toutes les données ayant trait au système opérant considéré et, par conséquent, de ne pouvoir prédire au degré de finesse souhaité son comportement.
- En terme d'efficience et de pertinence :
 - contraintes de rentabilité (retour sur investissement) par rapport aux coûts induits par les activités de modélisation (et de conception) des systèmes qui détermine principalement la performance du couple (système de pilotage, système opérant), et donc, sa mise en place éventuelle [Trentesaux et al., 2000b].

III Proposition d'une grille d'analyse des modèles de système de pilotage non centralisé

Dans la suite de ce document nous restreindrons notre étude au pilotage non centralisé en phase d'exploitation des systèmes de production de biens. Nous considérons qu'un système de pilotage non centralisé se définit comme un système de pilotage composé d'un ensemble d'« entités » (selon le sens défini plus haut) organisées, voire auto-organisées.

L'objectif de cette partie est d'établir une grille d'analyse des modèles de système de pilotage non centralisé basée sur la fédération des principales typologies existantes. Cette grille nous permettra alors de positionner, dans le chapitre suivant, les différentes contributions relatives aux développements de modèles de système de pilotage hétérarchique.

Pour élaborer cette grille, nous proposons la démarche suivante :

- Etape 1 : nous avons en premier lieu défini un *modèle générique de système de pilotage non centralisé*, selon un double point de vue : local, traitant des entités, global, relatif au système de pilotage non centralisé et à son organisation. Ce modèle générique s'appuie sur le cadre de référence systémique présenté figure 1.
- Etape 2 : ce modèle générique, couplé à la grille d'analyse de la nature des systèmes de pilotage présentée figure 5, nous a permis en second lieu *de positionner les principales typologies* de modèles d'entités (vue locale) et des modèles de systèmes de pilotage non centralisé (vue globale). Cette analyse nous a permis d'identifier les axes typologiques majeurs à retenir et la terminologie des systèmes de pilotage non centralisé.
- Etape 3 : la *grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé* a alors été élaborée en intégrant les axes typologiques identifiés et le modèle générique de système de pilotage non centralisé proposé.

La figure 6 résume cette démarche. Les paragraphes suivants décrivent chacune de ces étapes.

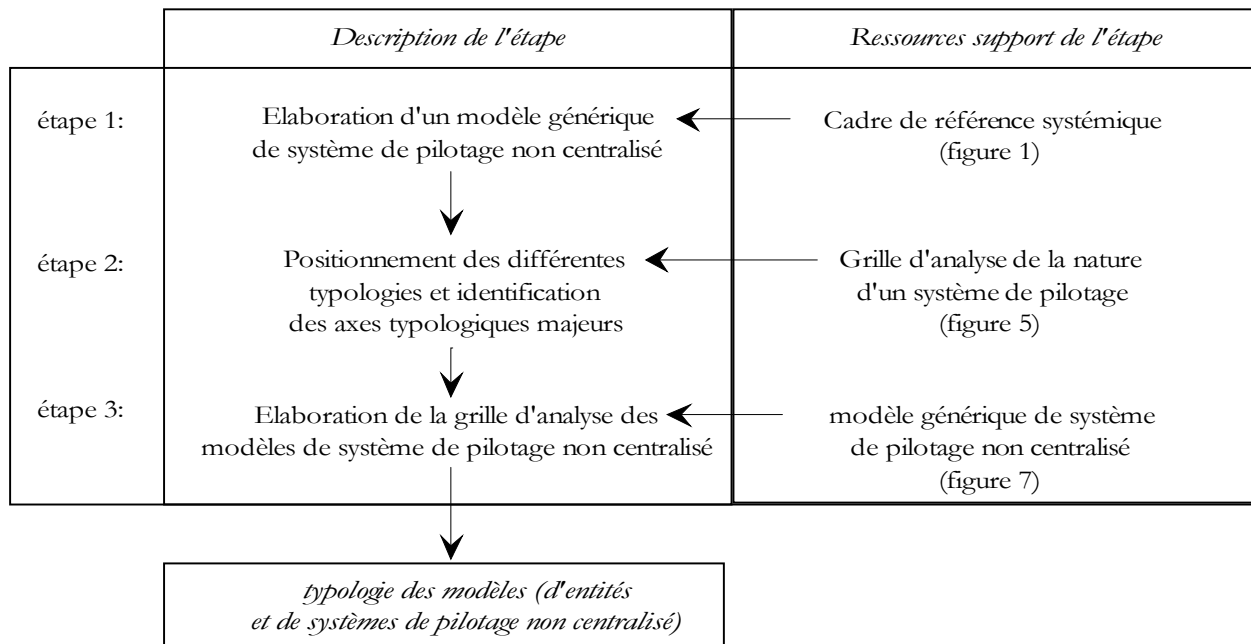


Figure 6. Démarche d'élaboration de la grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé.

III.1 Elaboration d'un modèle générique de système de pilotage non centralisé

Le concept de système de pilotage non centralisé fait l'objet de nombreux travaux et l'on peut recenser un nombre conséquent de typologies relatives aux systèmes de pilotage.

Pour les analyser, nous proposons un modèle générique de système de pilotage non centralisé selon un double point de vue : local, traitant des entités, global, relatif au système de pilotage non centralisé et de son organisation (cette approche a également été adoptée par [Cantamessa, 1997]). Nous associons le niveau 0 du modèle au point de vue global du système et les niveaux suivants aux points de vue locaux. Chaque entité identifiée de niveau i ($i > 0$) constituant elle-même un système de pilotage est considérée récursivement comme un système global décomposable selon le paradigme systémique (et définit par conséquent un point de vue local au niveau $i+1$).

Qu'il s'agisse d'un système de pilotage ou d'une entité, le cadre de référence systémique présenté auparavant s'applique (vue externe des systèmes de pilotage et entités et vue interne décrite selon les trois vues fonctionnelle, organique et évolutionniste).

La figure 7 résume notre approche. Dans la suite de ce document, une entité sera systématiquement schématisée par un objet graphique circulaire ou ovale.

niveau 0:
système de pilotage Système de pilotage non centralisé: est un système de pilotage

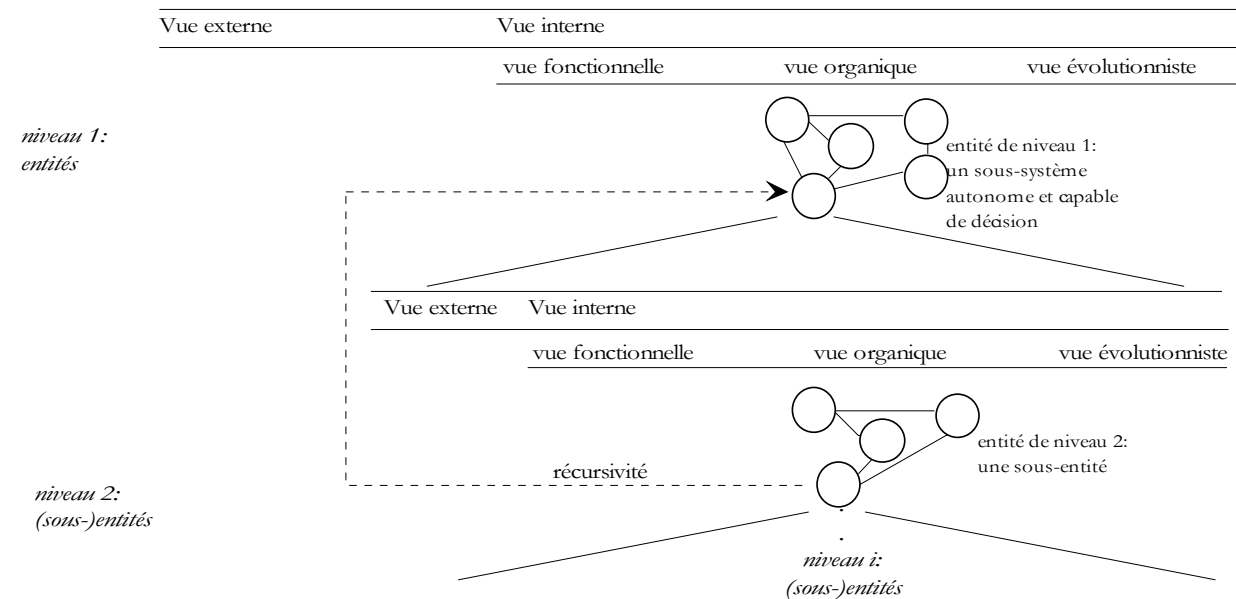


Figure 7. Modèle générique de système de pilotage non centralisé intégrant le cadre de référence proposé.

III.2 Analyse et positionnement des typologies

III.2.1 Typologies relatives aux modèles d'entité (vue locale)

On relève dans la littérature plusieurs typologies de modèles d'entités que nous décrivons et positionnons à partir du modèle proposé figure 7.

III.2.1.1 Selon la vue fonctionnelle

[Tranvouez et al., 1999] propose deux types d'entité : l'un basé sur les fonctions de gestion de données, variables et contraintes associées au problème de pilotage et le second basé sur la nature des objets composant le système de production : produits, ressources, ordres de fabrication, acteurs, etc. [Chi et Turban, 1995] identifient également deux types d'entité, l'un lié au processus de pilotage (surveillance des variables d'états, déclenchement des besoins décisionnels, prise de décision, gestion des variables d'action) et l'autre lié à la connaissance (génération de connaissances, gestion des connaissances générées et utilisation des connaissances). [Cantamessa, 1997] distingue d'une part des entités 'physiques' auxquelles on peut associer une fonction similaire à celle d'un objet passif ou actif du système opérant (ressource, produit, acteur) et d'autre part des entités 'virtuelles' dont la fonction ne peut être rattachée à aucun de ces objets (par exemple, gestion des connaissances, suivi des informations, etc.). Enfin, dans le cadre de l'ordonnancement distribué réactif, [Shen et Norrie, 1999] identifient deux types, le premier lié aux savoir-faire en ordonnancement (méthode de placement, technique de recherche incrémentale, de backtracking, etc.) et le second lié aux savoir-faire ayant trait au pilotage local des ressources du système opérant (machines, cellules, etc.).

L'analyse de ces différentes typologies conduit à proposer deux types d'entités :

- des entités qui mettent en œuvre un ou plusieurs processus complet de pilotage ou « entités **de** pilotage » (EDP). Il est possible d'identifier pour une telle entité un système opérant (ses variables d'entrées-commande et sorties-observation), une finalité de pilotage et par conséquent, une mesure de performance. Le système opérant est typiquement une ressource de production, mais il peut également être un service d'une entreprise, une entreprise voire un système mettant en œuvre une fonction de production. Dans la majorité des cas, la structure du système conçu reproduit celle des ressources physiques composant le système opérant. Elle aboutit à une localisation spatiale fixe des entités.
- des entités qui mettent en œuvre des processus qui ne sont pas des processus complets de pilotage ou « entités **pour** le pilotage » (EPP). Un ensemble non réduit à un singleton de ces entités est requis pour mettre en œuvre un processus de pilotage complet. Chacune des entités contribue à une ou plusieurs activités d'un processus de pilotage ; ces entités mettent ainsi en œuvre des fonctions nécessairement différentes. Il n'est

pas possible d'identifier, pour ces entités, un système opérant. Par exemple, une entité pour le pilotage peut être dédiée à la résolution de conflits, à la gestion de connaissance ou à la surveillance d'un ensemble de données issues de capteurs, au suivi d'un ordre de fabrication ou au suivi de la réalisation d'un produit. Baker qualifie les systèmes obtenus par combinaison d'EPP d'architecture fonctionnelle [Baker, 1998].

La figure 8 schématise ces deux types d'entités. On peut remarquer que l'intégration fonctionnelle d'un ensemble d'EPP peut définir une EDP à condition que les fonctions intégrées correspondent à une fonction de pilotage.

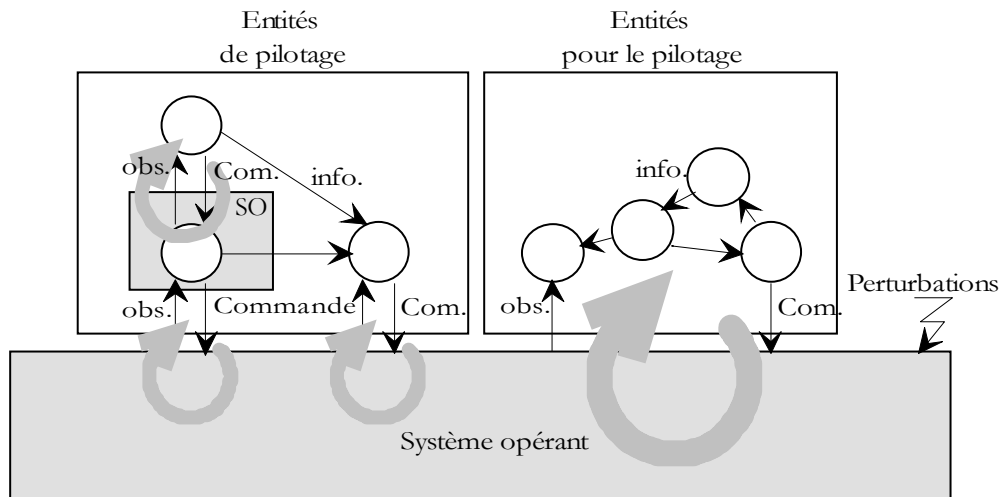


Figure 8. Entités de pilotage (EDP) et pour le pilotage (EPP).

Par conséquent, dans la suite de ce document, nous utiliserons la typologie fonctionnelle suivante pour une entité : entité de pilotage ou entité pour le pilotage. Nous avons essentiellement travaillé à partir de modèle d'entités de pilotage.

A titre illustratif, en remarquant en outre qu'une entité met en œuvre des processus internes d'ordre décisionnel, il est possible d'affiner cette typologie en précisant l'approche décisionnelle adoptée pour une entité (décision automatisée ou non) [Trentesaux et al., 1998b], [Trentesaux et al., 1998c]. Dans le premier cas, l'on retrouve pour la résolution de problèmes soit les approches exactes soit les heuristiques. Dans le second cas, l'on retrouve les approches orientées « aide à la décision » où un opérateur humain est assisté dans sa prise de décision (cet opérateur est alors considéré comme une entité). Par exemple, dans [Trentesaux et Tahon, 2002], nous avons appliqué cette typologie pour identifier, dans le cadre spécifique d'EDP dédiées au pilotage de cellules flexibles, les principaux mécanismes de décision automatisée qui sont adoptés par les concepteurs. Cette identification a ainsi permis de mettre en évidence que les mécanismes de décision des EDP sont construits suivant deux approches :

- optimisation (prochain temps libre, délai de fabrication, etc.) [Patriti, 1998], [Gouardères, 1999], [Pujo et al., 1999], [Chébéane et Echalié, 1997], [Tchako et al., 1994] [Duffie et Prabhu, 1994], [Sohier, 1996], [Ouelhadj et al., 1998], [Berger et al., 2000],
- utilisation de règles d'inférence, mais en se basant sur des règles exclusivement statiques [Kouiss et Pierreval, 1999], [Tranvouez et al., 1999], [Mebarki et al., 1996], [Roy, 1998].

III.2.1.2 Selon la vue organique

Les entités peuvent être considérées soit comme un système entier non décomposable, soit récursivement comme un ensemble décomposable en sous-entités.

Si les entités sont entières, ce qui signifie qu'elles disposent d'un système de décision non décomposable, alors différents modèles organiques peuvent alors être appliqués. Relevons à titre illustratif les modèles suivants : le modèle OID (système opérant, système d'information, système de décision) proposé par Lemoigne [Lemoigne, 1994], le modèle d'agent proposé Ferber [Ferber, 1997] ou enfin celui de « distributed manufacturing entity » de Hirsch [Hirsch et al., 1996].

Si ces entités sont récursivement décomposables, il faut alors considérer chacune de ces entités comme un méta-système composé d'entités de niveau inférieur. Relevons à titre illustratif, les modèles organiques de type holonique [Bongaerts et al., 2000] ou éventuellement bionique.

Nous avons essentiellement travaillé à partir de modèles d'entités non récursives (entières).

III.2.1.3 Selon la vue évolutionniste

Il est courant d'adopter un point de vue multi-agent, où l'on identifie deux types d'entités, l'un réactif, l'autre cognitif [Ferber, 1995]. De manière relativement équivalente, Gilles Neubert définit deux types d'entités, l'un réactif et l'autre pro-actif [Neubert, 1997], [Campagne et al., 1995].

Bien que répandue, la distinction entre entité réactive ou cognitive est relativement difficile à établir. Malgré cela, il semble que la différence fondamentale entre réaction et cognition se situe au niveau de la capacité d'apprentissage afin d'améliorer ou d'adapter les décisions futures [Mandiau et Grislin, 2002].

C'est pourquoi, nous considérons plus structurant d'adopter le point de vue de Mesarović et de définir des entités adaptatives ou réactives (non adaptatives) [Mesarović et al., 1980]. [Cantamessa, 1997] adopte un point de vue similaire en distinguant des entités de base, puis des entités capables d'adaptation et enfin d'auto-finalisation. Concernant les entités adaptatives, nous retrouvons les concepts relatifs aux mécanismes d'apprentissage, de gestion de la connaissance, etc.

Nous avons travaillé sur les deux types de modèles d'entités réactives et adaptatives.

III.2.2 Typologies relatives aux modèles de systèmes de pilotage non centralisé (vue globale)

Nous avons proposé plusieurs typologies de modèles de ces systèmes [Trentesaux, 1996], [Trentesaux et Tahon, 2002]. Dans ce document, nous proposons une typologie volontairement large qui permet de positionner la majorité des travaux recensés. Cette typologie peut naturellement être affinée en fonction de cadres d'études plus spécifiques.

III.2.2.1 Selon la vue évolutionniste

Il existe une typologie fondamentale qui traite de la structure éventuelle de l'organisation : soit l'organisation n'est pas déterminée a priori (dans ce cas, elle est souvent qualifiée d'émergente), soit il est possible d'identifier une structure organisationnelle minimale stable entre les entités [Mandiau et Grislin, 2002]. Selon une optique similaire, Pujo distingue des systèmes de pilotage organisés et des systèmes de pilotage auto-organisés [Pujo et Ounnar, 2001]. La différence (en adoptant le point de vue de Lemoigne) se situe dans la possibilité, pour un système auto-organisé, de modifier les connexions entrées/sorties entre entités ou les processus au sein de chaque entité et, éventuellement, de faire évoluer sa structure organisationnelle. L'auto organisation peut ainsi caractériser la capacité d'un système à évoluer d'une structure organisationnelle à une autre. Si par contre une des structures organisationnelles stable est identifiée, il est possible d'établir une typologie de ces structures (vue organique).

Nous avons essentiellement travaillé sur des modèles de systèmes de pilotage organisés.

III.2.2.2 Selon la vue organique

La vue organique permet de caractériser un système de pilotage non centralisé au travers [Mesarović et al., 1980]:

- de son éventuelle agencement, invariant sur un horizon donné [Camalot, 2000], [Mintzberg, 1982] et [Monteiro, 2001].
- des modes d'interaction conçus pour un agencement donné.

III.2.2.2.1 Agencement

On distingue couramment deux mécanismes d'agencement [Meinadier, 1998], [Mintzberg, 1982], [Mesarović et al., 1980]. Ces deux mécanismes sont complémentaires. Nous les présentons ci-dessous :

- un mécanisme d'agencement vertical, faisant référence à la notion de hiérarchie : une hiérarchie correspond à un agencement vertical d'entités composant un système global où la priorité est accordée, à un niveau i de la hiérarchie, à l'action ou au droit d'intervention sur une entité de niveau $i+1$ et où la performance du niveau $i+1$ conditionne celle du niveau i [Mesarović et al., 1980]. La notion de hiérarchie est donc multi-niveau [Dilts et al., 1991]. [Brennan et al., 1997] cité dans [Shen et Norrie, 1999] adopte un point de vue similaire: "in a hierarchical system, sub-systems or elements at a lower level receive instructions from those in the next higher level, which restricts their autonomy". Nous retrouvons à nouveau la notion d'autonomie.
- un mécanisme d'agencement horizontal faisant référence à l'absence de toute hiérarchie entre entités. Cet agencement peut être qualifié de structure « hétérarchique » où les entités se situent par conséquent au même niveau hiérarchique i , même si le sens original du terme signifie absence totale de hiérarchie [McCulloch, 1945],

[Duffie et Prabhu, 1996]. Nous parlerons d'hétérarchie au sens strict du terme dans le second cas. En France, une structure hétérarchique au sens strict est parfois appelée structure « égalitaire ».

La figure 9 décrit ces deux mécanismes.

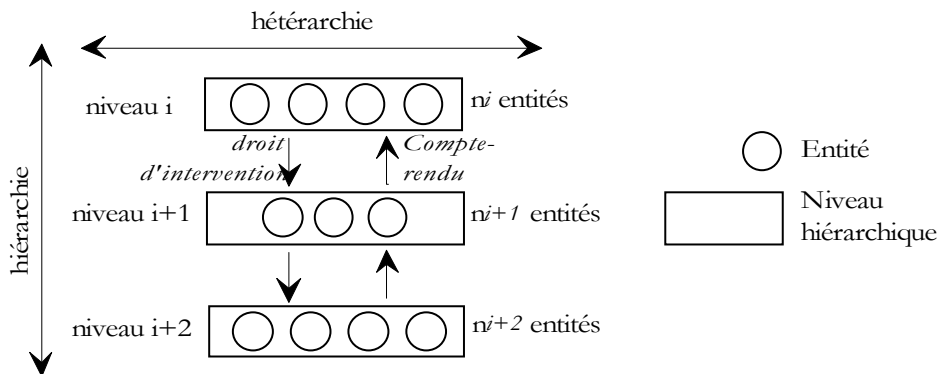


Figure 9. Les deux mécanismes d'agencement : hiérarchie et hétérarchie.

Une typologie relativement répandue est fondée sur le degré de hiérarchisation de l'agencement considéré par rapport au degré d'hétérarchisation. On distingue alors les agencements purement verticaux, les agencements mixtes (horizontaux et verticaux), les agencements purement horizontaux. Les typologies suivantes sont construites selon cette approche : [Duffie et Prabhu, 1996], [Mesarović et al., 1980], [Duffie et Piper, 1987], [Dilts et al., 1991], [Brennan, 2000]. Chaque catégorie peut être affinée, voir par exemple [Charpentier et al., 2001] pour une caractérisation plus fine des agencements totalement horizontaux. Afin de formaliser ou de quantifier ce critère, il est possible de s'appuyer sur une représentation matricielle [Meinadier, 1998], [Lemoigne, 1994], [Charpentier et al., 2001].

Nous avons également introduit une typologie basée sur ce critère [Trentesaux, 1996]. Elle a été utilisée et améliorée pour positionner un certain nombre de travaux d'autres chercheurs [Roy, 1998], [Dindeleux, 1998], [Broissin, 1999] et [Coudert, 2000].

Une approche courante consiste à considérer que le type d'agencement est le critère qui permet de distinguer (et par conséquent de définir) les différents types de systèmes de pilotage, soit décentralisé, soit distribué. Relevons quelques définitions qui illustrent ce point :

- Pujo considère qu'un système de pilotage décentralisé constitue un cadre applicatif d'un système de pilotage distribué dans le sens où il correspond à une organisation caractérisée par un agencement unique, totalement horizontal des entités, sans aucun niveau de contrôle hiérarchique supérieur [Pujo et al., 1999].
- Brennan utilise le terme décentralisé pour désigner le regroupement de l'ensemble des systèmes dont les agencements sont non centralisés, tels que hiérarchie, hétérarchie et oligarchie [Brennan et al., 1997] cité dans [Shen et Norrie, 1999]. Duffie utilise le terme distribué dans un cadre similaire [Duffie et Prabhu, 1994].
- Monteiro considère plusieurs types d'agencements et parmi ceux-ci la catégorie distribuée : fragmenté (centralisé), hiérarchisé, intégré (coordonné), distribué et holarchique [Monteiro, 2001].

Initialement, nous avons adopté une telle approche [Trentesaux et Tahon, 1994], [Trentesaux et Tahon, 1995b]. Notre point de vue a depuis évolué pour aboutir au constat que le type d'agencement n'est pas le critère discriminant permettant de différencier pilotage distribué et pilotage décentralisé, mais qu'il permet plutôt de différencier pilotage hiérarchique et pilotage hétérarchique. Nous considérons ainsi trois classes d'agencement :

- classe I : elle comporte les systèmes de pilotage non centralisés dont les agencements sont purement verticaux. Ils sont qualifiés de purement hiérarchiques (ou hiérarchiques *au sens strict*). La théorie des systèmes hiérarchisés caractérisés par des relations uniquement de type maître/esclave présente de nombreux avantages connus : hiérarchie du pouvoir, maîtrise des informations, absence de conflits entre acteurs hiérarchiquement dépendants, faible diversité des interactions possibles, garantie de performance, etc. Par conséquent, les interactions sont essentiellement de type synchronisation, coordination ou commande [Mesarović et al., 1980]. Les systèmes de pilotage qui présentent un agencement de classe I sont étudiés depuis longtemps et ont fait l'objet de plusieurs théories, voir en particulier [Mesarović et al., 1980], [Fontan et al., 1997].
- classe II : elle comporte les systèmes de pilotage non centralisés présentant des agencements hiérarchiques et hétérarchiques. Ils sont qualifiés de hiérarchiques ou hétérarchiques *au sens large* (multi-niveaux), ce qui généralise l'hétérarchie au sens proposé par Duffie (mono niveau, hétérarchie *au sens strict*).

- classe III : elle comporte les systèmes de pilotage dont les agencements sont purement horizontaux. Ils sont qualifiés de purement hétérarchiques ou hétérarchiques *au sens strict*.

Cette typologie est relativement proche de celle proposée par [Dilts et al., 1991] qui comporte également la classe 0 des systèmes centralisés (cf. figure 10). Les liens verticaux sont les liens de dépendances hiérarchiques (interactions directives), les liens horizontaux, les liens de relations hétérarchiques (interactions non directives). Nous avons en particulier travaillé sur des modèles de systèmes de pilotage de classes II [Delsaut-Furon, 2001], [Le Quéré et al., 2001], [Trentesaux et al., 1998a] et III [Bousbia et Trentesaux, 2002], [Tchako et al., 1994], [Trentesaux et al., 2000a].

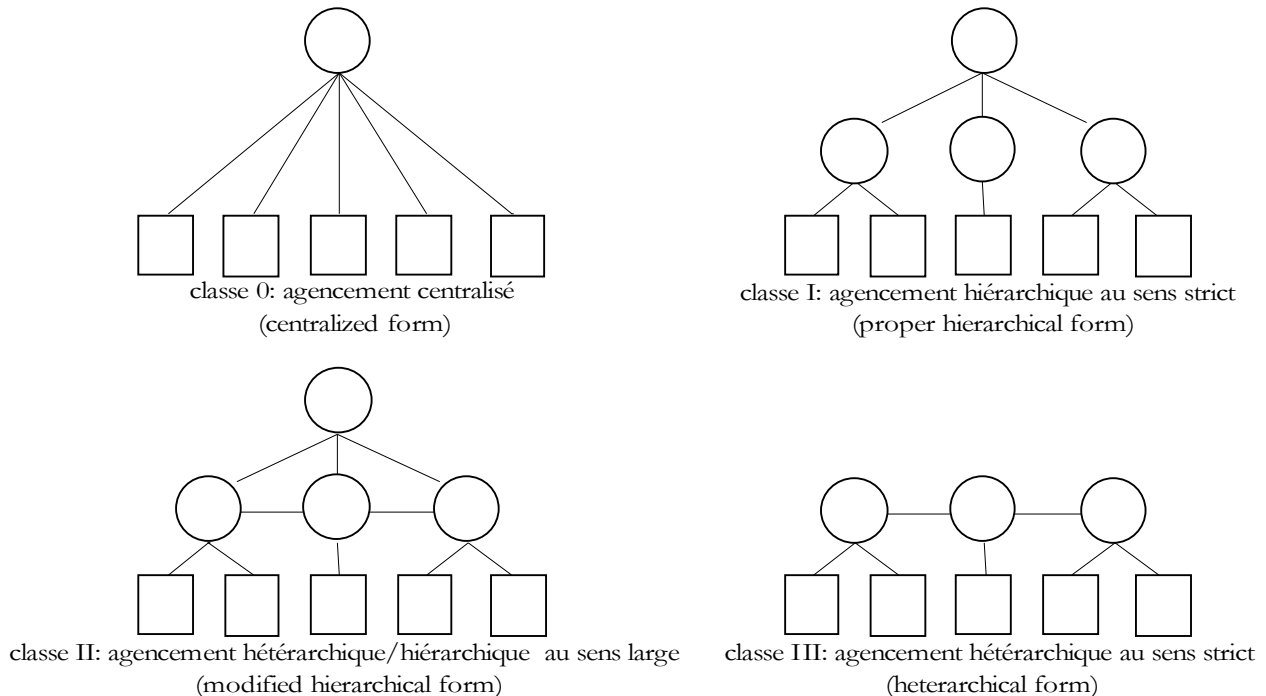


Figure 10. Les classes d'agencements.

III.2.2.2.2 Modes d'interaction

Selon Lemoigne, les modes d'interaction correspondent aux processus d'interaction *externes* entre entités [Lemoigne, 1994]. Ces modes d'interactions s'appuient sur des liens hiérarchiques ou sur des liens hétérarchiques. Il est possible, dans ce cadre, de différencier formellement une interaction verticale d'une interaction horizontale en adoptant un point de vue « contrainte ». Ainsi, « deux entités sont agencées de manière verticale » signifie que l'entité hiérarchiquement inférieure ne peut faire abstraction des informations que l'entité hiérarchiquement supérieure lui communique. Ces informations conditionnent alors son activité décisionnelle. Ces informations sont des contraintes à respecter. « Deux entités sont agencées de manière horizontale » signifie que les informations échangées ne sont pas des contraintes et qu'elles peuvent ne pas être prises en compte. Patrity adopte ce point de vue en définissant des interactions directives (relation hiérarchique) et non directives (relation hétérarchique) [Patrity, 1998].

Les modes d'interaction relatifs à des agencements hiérarchiques ne seront pas étudiés dans ce document. De nombreux travaux formels ont été réalisés dans ce domaine depuis les années 1970 [Mesarović et al., 1980], [Mercé et Fontan, 2001].

Concernant les modes d'interaction s'appuyant sur des liens hétérarchiques, une typologie est proposée dans [Smith et Davis, 1981]. Cette typologie, énoncée dans le cadre de la résolution distribuée de problème, conduit à identifier deux approches d'interaction : soit par partage de tâches, soit par partage de résultats.

Dans le cas de partage de tâches (qui représente une large majorité des choix de modélisation), il est courant de définir quatre activités [Chi et Turban, 1995] :

- décomposition : menant à la (re)décomposition récursive d'une tâche à résoudre en sous-tâches,
- affectation : affectation des sous-tâches à différentes entités,
- résolution: menant soit à la résolution d'une sous-tâche soit à la considérer comme une nouvelle tâche globale nécessitant une nouvelle décomposition et affectation,

- agrégation: menant soit à l'intégration (récursive) des résultats partiels pour contribuer à l'achèvement d'une tâche globale, soit au rejet de ces résultats, soit enfin à la remise en question ou à l'annulation de résultats précédemment intégrés.

Ces différentes activités sont présentes soit en phase de modélisation/conception du système non centralisé (et sont du ressort du concepteur), soit en exploitation (et sont du ressort de chaque entité).

De nombreux travaux existent dans le domaine des processus d'interaction externes et portent sur la coopération, la négociation, etc. Ces processus sont largement étudiés au sein de la communauté française [Camalot, 2000], [Ferber, 1995], [Erschler et al., 1997], [Monteiro, 2001]. Dans le cadre de la coopération entre entités, l'équipe SHM du LAMIH travaille sur la base de la typologie de Schmidt [Schmidt, 1991]. Cette typologie conduit à identifier des mécanismes de coopération intégratifs, ou augmentatifs d'une part (partage de tâches) ou confrontatifs (partage de résultats). Le projet JEMSTIC dont je suis responsable traite plus particulièrement des mécanismes de coopération augmentatifs.

Nous avons exclusivement travaillé sur une approche d'interaction par partage de tâches.

III.2.2.3 Selon la vue fonctionnelle

Une seconde approche considère la dimension fonctionnelle pour différencier pilotage décentralisé et distribué :

- Pour Tchako et Roy, la distribution (resp. décentralisation) définit l'action générale de partition d'un objectif global en sous-objectifs indépendants (resp. dépendants), traités de façon parallèle par des unités de traitement différentes [Tchako, 1994], [Roy, 1998].
- Pour Tharumarajah, "when a system is distributed, it is due to its being physically broken up into separate components. Autonomy is ensured through decentralization or dispersion of control to various entities" [Tharumarajah, 1998].

Ce point de vue nous semble justifié en considérant l'étymologie de ces deux termes:

- la décentralisation correspond à la situation dans laquelle un ensemble d'éléments s'administrent eux-mêmes [Hachette, 2000] ou disposent d'une certaine autonomie [Larousse, 2000] sous le contrôle d'un organe central. Par exemple, dans plusieurs domaines de recherche qui traitent de l'organisation des systèmes (sciences politique, science de la vie) ainsi que pour certains chercheurs dans le domaine de la production (voir [Broissin, 1999]) le terme « décentralisation » se réfère à la notion d'entités autonomes, toutes capables d'assurer complètement la fonction de pilotage. La décentralisation s'apparente alors à une « duplication » [Pujo et Ounnar, 2001].
- la distribution correspond à la répartition d'objets entre plusieurs personnes (Hachette). La distribution (par opposition à intégration) fait donc référence à la répartition d'un objet non renouvelable (capital fini). Le qualificatif « distribué » est largement reconnu dans ce sens : la résolution *distribuée* de problème (coopérative ou non) est un domaine d'application de l'intelligence artificielle distribuée et a pour objectif d'effectuer une tâche jugée complexe en faisant appel à un ensemble de spécialistes disposant de compétences différentes et complémentaires et travaillant ensemble à la poursuite d'un objectif commun [Ferber, 1995]. On parle par exemple de « distributed manufacturing » pour spécifier que la fonction « production » est distribuée parmi un ensemble de sites physiquement répartis.

Notre point de vue est proche de celui adopté par [Tchako, 1994], [Tharumarajah, 1998] et [Baker, 1998] : nous considérons en effet que pilotage décentralisé et distribué sont deux approches complémentaires du pilotage, indépendantes des agencements. Dans cet esprit, le mécanisme de distribution consiste à scinder un objet et à répartir les sous-objets différenciés au sein des entités formant la structure considérée (verticale ou horizontale). Fondamentalement, en modélisation/conception, ces objets peuvent être assimilés à des fonctions ou à des moyens (matériels, énergétiques, intellectuels) et en exploitation, à des informations (tâches, résultats, etc.). Dans tous les cas, l'on retrouve la notion de capital consommable. De manière complémentaire, la décentralisation est un mécanisme qui consiste à dupliquer autant que nécessaire un objet non nécessairement sécable, à particulariser les objets dupliqués en fonction des contextes spécifiques et à les affecter aux entités formant la structure considérée (verticale ou horizontale). Cette caractérisation d'un système décentralisé est également prônée par [Ferrarini et al., 1993].

La distinction entre entité de pilotage et entité pour le pilotage composant un système de pilotage non centralisé permet alors de caractériser ce système soit comme décentralisé ou distribué. Une typologie fonctionnelle des systèmes de pilotage non centralisés peut alors être déduite de celle relative à la vue fonctionnelle des entités : un système de pilotage non centralisé est de type distribué s'il est composé uniquement d'entités pour le pilotage, décentralisé si il est composé uniquement d'entités de pilotage, ou mixte si il est composé à la fois d'entités de pilotage et d'entités pour le

pilotage. Il est alors possible de remarquer qu'une décentralisation peut être assimilée à une distribution particulière : celle qui consiste à distribuer différents processus de pilotage complets au niveau des entités.

Nous avons essentiellement travaillé sur des modèles de systèmes de pilotage décentralisé.

III.3 Elaboration de la grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé

La grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé peut alors être élaborée en intégrant au modèle générique de système de pilotage non centralisé les axes typologiques identifiés (cf. figure 11).

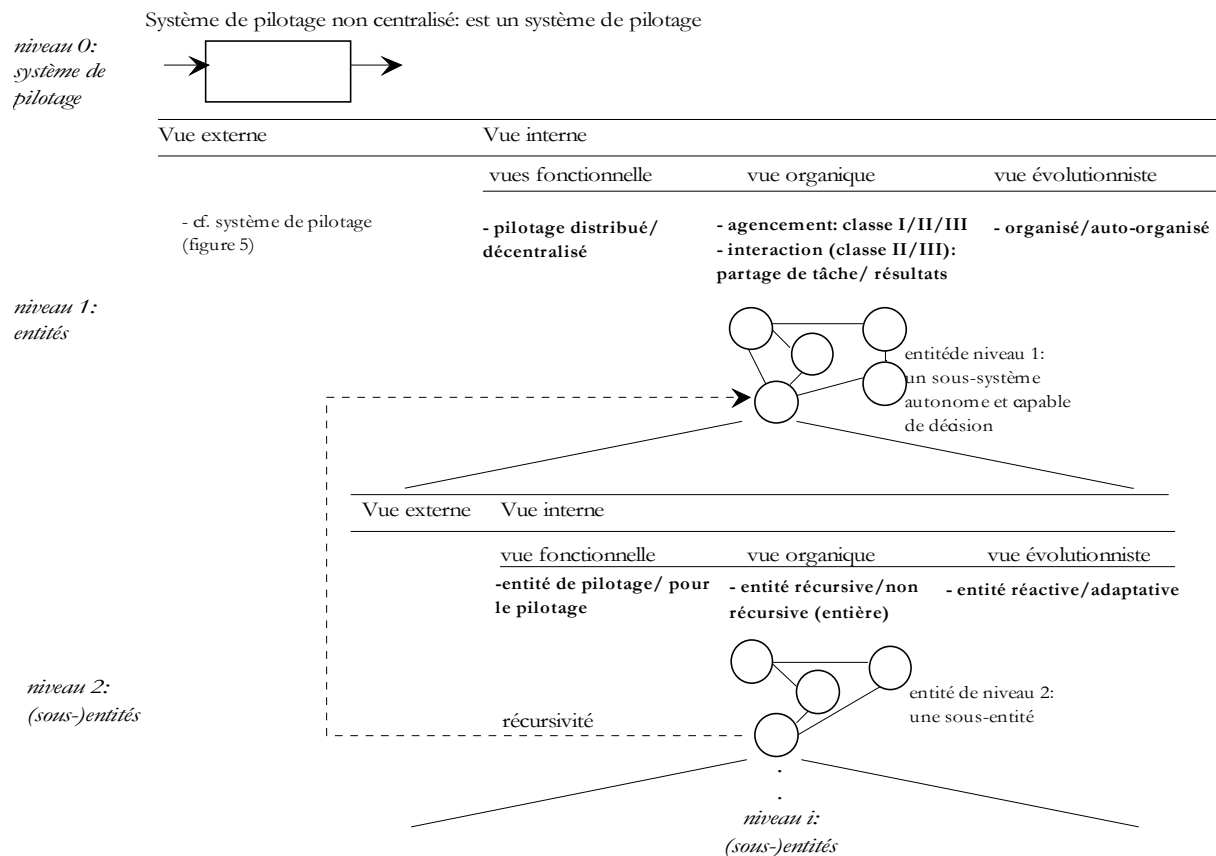


Figure 11. Grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé (et des entités).

Conclusion

L'objet de ce chapitre était en premier lieu, à partir du paradigme systémique, de caractériser un système, un système de pilotage, puis un système de pilotage non centralisé suivant leur nature (vue fonctionnelle, organique et évolutionniste) et les actions systémiques appliquées à ces systèmes (conception, exploitation, analyse).

Cette caractérisation nous a permis de préciser la terminologie relative au domaine du pilotage non centralisé et a conduit à la définition d'une grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé. Cette grille nous permettra dans le chapitre suivant non seulement de proposer une typologie des modèles des entités et des systèmes de pilotage hétéroarchique mais également de mettre en exergue leurs spécificités fondamentales. Elle nous conduira ainsi à identifier les grandes « écoles » et courants de pensée dans ce domaine.

Pour résumer notre point de vue, « hétéroarchisation » et « hiérarchisation » sont des concepts relatifs aux types d'agencement entre entités, tandis que « décentralisation » et « distribution » sont des concepts relatifs aux types de fonctions mises en œuvre par les entités. Ces quatre concepts permettent de caractériser différents systèmes de pilotage non centralisé, par opposition à centralisé.

Notre thématique de recherche concerne essentiellement les systèmes de pilotage non centralisé de classes II & III, c'est-à-dire des systèmes de pilotage hétéroarchique au sens large (classe II) et au sens strict (classe III). La suite de ce document est consacrée à ces types de systèmes (par souci d'exhaustivité, les systèmes de classe I seront considérés dans notre analyse, mais ne seront pas étudiés).

Chapitre II

Systèmes de pilotage hétérarchique : enjeux et modèles

Introduction

Ce chapitre a pour objet dans une première partie de présenter les enjeux du pilotage hétérarchique et, dans une seconde partie, de présenter l'état de l'art relatif au domaine des systèmes de pilotage hétérarchique en utilisant la grille d'analyse des modèles (schématisée figure 11 dans le chapitre précédent).

I Les enjeux du pilotage hétérarchique

Duffie et Prabhu ont schématisé l'évolution du contexte industriel depuis les années 50 jusqu'à nos jours (figure 12).

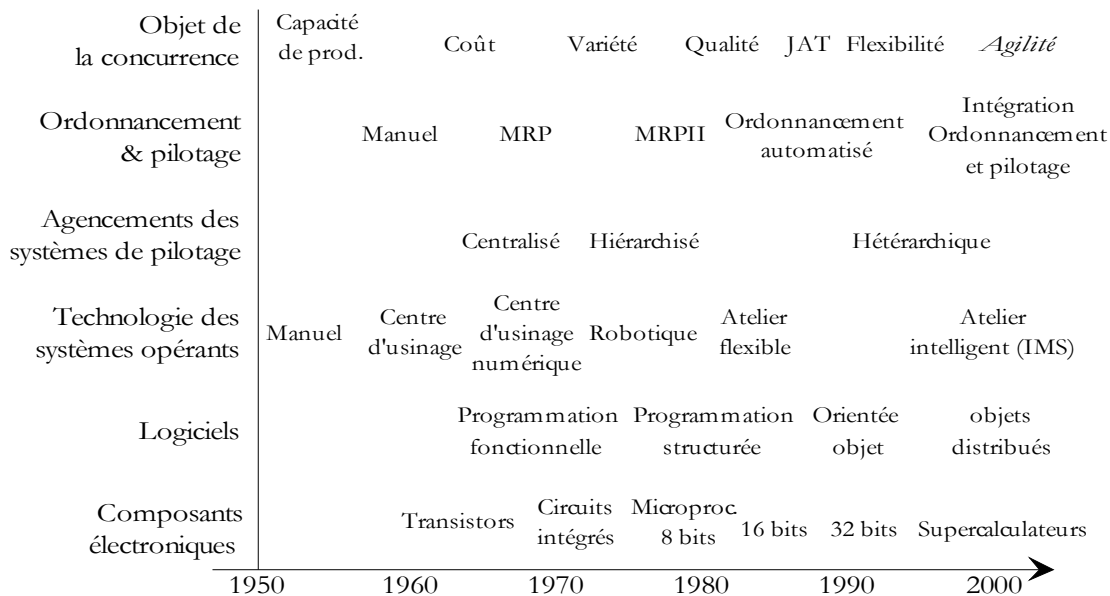


Figure 12. Evolution du contexte industriel des années 50 à nos jours.

Les modèles hiérarchiques développés à partir des années 70-80 répondaient aux besoins des industriels. Pour [Tharumarajah et al., 1996] les avantages de l'approche hiérarchique CIM sont essentiellement la qualité de la structuration, de l'intégration et de l'optimisation des processus. De nombreux modèles hiérarchiques pouvant être utilisés dans un contexte de pilotage de classe I ont été développés (CIMOSA [Vernadat, 1999], GRAI [Doumeings, 1984], NIST, etc.). Ces modèles peuvent être considérés comme les héritiers de standards largement reconnus tels que le modèle NBS (National Bureau of Standards) et le modèle CAM-I qui a conduit au développement du concept CIM [Dilts et al., 1991], [Tchako, 1994].

Depuis les années 90, l'accroissement de la concurrence, la diversification des produits, la volatilité des marchés, etc. ont rendu l'approche purement hiérarchique partiellement inadaptée [Duffie et Prabhu, 1996]. L'approche hétérarchique

permet a priori de répondre à certaines attentes (meilleure réactivité, réduction des coûts, etc.) et l'offre technologique actuelle permet sa mise en œuvre (capacité de traitement, réseaux de communication, etc.).

Cependant, la réduction des relations hiérarchiques génère plusieurs inconvénients, notamment ceux relatifs à la réduction de la visibilité à plus ou moins long terme (garantie des performances, etc.). L'objectif de cette partie est ainsi de décrire *l'enjeu*, performances potentielles et problématiques, de l'approche hétérarchique.

1.1 Les performances potentielles

L'analyse qui suit a pour objectif de comparer les performances potentielles des systèmes de pilotage hétérarchique à celles des systèmes de pilotage hiérarchiques (classe I) ou centralisés (classe 0).

Dans [Dilts et al., 1991], une étude relativement similaire est présentée (caractérisation des systèmes de pilotage, avantages, inconvénients) selon la classe du système de pilotage. Cependant, cette étude est restreinte car l'auteur analyse ces systèmes en ne prenant en compte que les aspects relatifs à la mise en œuvre (réseau de terrain, calculateur, base de données, communication).

Les performances potentielles identifiées dans l'état de l'art peuvent être regroupées en quatre points :

- contribution à l'accroissement de la réactivité,
- contribution à l'accroissement de l'évolutivité et à la réduction des coûts de modélisation/conception sur le long terme,
- contribution à l'accroissement de la fiabilité et de la résistance aux fautes,
- meilleure adéquation avec les nouvelles structures de production.

Nous détaillons ces quatre points dans les paragraphes suivants.

1.1.1 Accroissement de la réactivité

Au-delà de toute discussion sur sa définition, on remarque que la réactivité caractérise la capacité d'un système de pilotage à prendre en compte les perturbations [Neubert, 1997]. C'est une performance fortement liée à la mesure de l'efficacité qui ne tient pas compte des moyens mis en œuvre, contrairement à la flexibilité. Il existe de nombreux travaux traitant du positionnement relatif flexibilité/réactivité. La flexibilité peut être vue comme la possibilité d'un choix parmi les ressources d'un système de production afin de réaliser une fonction. Elle peut être par conséquent considérée comme un degré de liberté du système opérant durant la production [Berruet, 1998] : la flexibilité n'a pas ainsi trait au système de pilotage, mais plutôt au système opérant. Elle contribue à la qualité de la réaction en générant un potentiel de diversité des solutions admissibles pour le pilotage. La réactivité « exploite » la flexibilité. On pourrait cependant considérer la « flexibilité de pilotage » où les méthodes de calculs, les modèles de raisonnement, etc., seraient considérés comme les différentes ressources utilisables et reconfigurables par le système de pilotage. Dans ce cadre, la flexibilité est relativement proche de l'évolutivité du système de pilotage ou de la capacité d'adaptation des entités et sera traitée dans la partie suivante.

Un pilotage hiérarchisé suppose que tous les paramètres d'état du système opérant soient non seulement connus simultanément, mais également qu'ils restent inchangés tout au long du processus de pilotage, de la conception du plan d'action (ordonnancement, etc.) jusqu'à sa mise en œuvre. Ce processus consommant d'ailleurs d'autant plus de temps que le pilotage est centralisé (souvent, de manière exponentielle, les problèmes à résoudre étant la plupart du temps de nature complexe ou NP-difficile). Ces systèmes de pilotage traitent par conséquent des informations qui ne reflètent pas la situation réelle (perturbations non perçues, retard à la prise de décision, etc.). Les systèmes de pilotage hiérarchiques ou centralisés ne sont donc pas aisément réactifs [Bongaerts et al., 2000]. D'autre part, l'expérience montre qu'intégrer dans ces systèmes de pilotage des mécanismes pour mieux faire face à l'incertitude ou à l'imprécision n'a jamais été entièrement satisfaisant [Maione et Naso, 2001]. En outre, "the traditional CIM view has suffered from its inflexibility since it had led to adherence to traditional centralized and hierarchical paradigm of production which is becoming obsolete" [Cantamessa, 1997]. Enfin, les organisations hiérarchisées sont aisément mises en défaut par une panne localisée, par la fragilité des plans conçus ou par les temps de réponse trop longs [Maturana et al., 1999].

Ainsi, le manque de réactivité provient du fait que les boucles de pilotage hiérarchisées présentent un temps de réaction d'autant plus long qu'il y a d'intermédiaires et qu'il est préférable de « rapprocher » (au sens proposé par Pujo [Pujo et Ounnar, 2001]) les décisions du lieu et du temps de leur application pour mieux prendre en compte l'évolution réelle des systèmes pilotés [Sohier, 1996]. En outre, le temps de décision s'accroît de manière exponentielle au fur et à

mesure que l'on hiérarchise ou centralise les informations (complexité des calculs), ce qui réduit la capacité de réagir dans des délais compatibles avec les constantes de temps du système opérant [Burlat et Boucher, 2001].

La réduction ou l'élimination des liens hiérarchiques au profit de liens hétérarchiques devrait donc permettre d'accroître la réactivité : favoriser les structures horizontales par rapport aux structures verticales conduit à réduire les temps de circulation des informations (échange verticaux) et à prendre les décisions au plus près des endroits où le besoin s'en fait sentir [Pujo et al., 1999].

1.1.2 Accroissement de l'évolutivité et à la réduction des coûts de modélisation/conception sur le long terme

L'évolutivité mesure non seulement la capacité d'un système à être 'toujours réactif', mais aussi l'adéquation des moyens par rapport aux résultats et aux objectifs (pertinence, efficacité). C'est une caractéristique qui concerne un horizon plus étendu que celui correspondant à la réactivité. La modifiabilité traduit la capacité à modifier les caractéristiques des éléments d'un système. L'extensibilité traduit la facilité d'intégration de nouveaux éléments pour accroître les performances [Dilts et al., 1991].

Les organisations hiérarchisées sont déterminées dès les premières étapes de leur conception. Les extensions doivent être anticipées nécessairement par avance et toute modification ultérieure est très difficile et coûteuse à réaliser [Duffie et al., 1988]. Les coûts de modification sont donc intrinsèquement élevés. La hiérarchisation impose un schéma certes facilement optimisé, mais uniquement à court terme par rapport aux évolutions des entreprises et des marchés. Parunak remarque également qu'avec les approches conventionnelles (hiérarchisées ou centralisées), la part la plus importante du coût d'un ensemble de production n'est pas due aux équipements ou à l'énergie consommée pour les faire fonctionner, mais à la création et à la maintenance des logiciels [Parunak, 1994]. Cantamessa appuie cet argument en affirmant que plus la demande et la variabilité des produits s'accroissent, plus les structures horizontales sont adaptées [Cantamessa, 1997]. Enfin, [Tharumarajah et al., 1996] remarquent également que, bien que les avantages de l'approche CIM soient remarquables (structuration, intégration et optimisation), une telle approche conduit nécessairement à « cimenter » les procédures et les structures, et donc à la stagnation, au détriment de leurs améliorations. Dans ce sens, une approche favorisant l'autonomie des centres de décision semble prometteuse [Tharumarajah et al., 1996]. Duffie affirme également que les systèmes de pilotage de classe III, de par leur capacité naturelle à supporter les mécanismes d'évolution permettent à long terme de réduire sensiblement les coûts d'évolution et d'adaptation aux nouveaux besoins [Duffie et Prabhu, 1996].

Une composante importante de l'évolutivité est la modularité : "modularity implies that changes in the production system's physical structure should not force to redesign system control software, but simply require the addition or deletion of modules able to cooperate with the rest of the existing system" [Cantamessa, 1997]. Dans ce cadre, une approche non centralisée peut apporter des éléments de réponse: "the distributed information technology applications and communication networks offers great potential for developing powerful and modular production management systems" [Cantamessa, 1997].

1.1.3 Accroissement de la fiabilité et à la résistance aux dysfonctionnements

La fiabilité est définie par la probabilité qu'un composant d'un système soit opérationnel de manière continue, conformément à ses spécifications, sans être en dysfonctionnement. L'acronyme FMDS (fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité de fonctionnement) décrit d'une manière plus large les différentes dimensions du concept de sûreté de fonctionnement [Delsaut-Furon, 2000], [AFNOR, 1988].

La tolérance aux fautes traduit la capacité d'un système à conserver un fonctionnement conforme aux spécifications initiales, éventuellement dans un mode dégradé, malgré l'occurrence de dysfonctionnements [Dilts et al., 1991].

[Duffie et Prabhu, 1996] affirment que l'un des apports principaux des systèmes de pilotage non hiérarchiques est leur meilleure maintenabilité [Zwingelstein, 1995], [Zwingelstein, 1996] qui induit une meilleure résistance aux dysfonctionnements.

1.1.4 Adéquation avec les nouvelles structures de production

L'approche hétérarchique du pilotage se justifie également par le fait que, bien que la centralisation et la hiérarchisation soient des mécanismes puissants au sein des organisations [Mintzberg, 1982], [Mélèze, 1972] ils trouvent rapidement leurs limites lorsqu'ils sont confrontés à certains types de besoins industriels. Par exemple, dans le cas:

- d'une entreprise réseau : ensemble d'entreprises liées les unes aux autres par un cycle de production et par un ensemble de liens de coopération fonctionnelle [Butera, 1991],

- d'une entreprise virtuelle: a temporary network of independent companies, who come together quickly to exploit fast changing opportunities. The business partners are integrated using information and communication technology [Browne et al., 1999].
- d'une entreprise étendue: kind of « entreprise » which is represented by all those organizations or parts of organizations, customers, suppliers and sub-contractors, engaged collaboratively in the design, development and delivery of a product to the end user [Browne et al., 1996] (un concept proche est celui de chaîne logistique).

Dans ce cadre, l'organisation est telle que chaque entreprise n'est plus une île isolée et les structures verticales conventionnelles doivent laisser la place à des structures horizontales mettant en œuvre des mécanismes de coopération [Azevedo et Sousa, 2000], [Burlat et Boucher, 2001].

Parunak relève, dans un cadre plus général, un certain nombre de contraintes issues de l'environnement et des besoins industriels qui ne sont pas compatibles avec les approches de pilotage de classe I [Parunak, 1994] :

- des situations où la *répartition* des capacités de décision et de pilotage est naturelle ou contrainte (par exemple dans le cas d'une fiabilité insuffisante d'une entité 'névralgique'). Il en est de même pour certaines situations où il n'existe pas de liens hiérarchiques (par exemple, dans le cas de certains réseaux d'entreprises coopérantes),
- des situations où une *factorisation* d'un ensemble de fonctionnalités similaires conduit à intégrer chaque ensemble à une entité différente (gestion des informations, pilotage d'une ressource de production, gestion d'un outillage, etc.). Un pré-requis est qu'il n'existe pas de liens hiérarchiques naturels entre les différents ensembles fonctionnels considérés (sinon, une structuration hiérarchique s'impose naturellement).

Cette remarque peut être élargie en dehors du contexte de la production. Ferber relève à juste titre qu'un nombre croissant de situations poussent les concepteurs à accorder plus d'autonomie et à distribuer de plus en plus de compétences à un ensemble d'entités. Par exemple, lorsque l'éloignement génère un temps de retard important dans le temps de transmission et peut conduire à des problèmes de stabilité (télécommunication spatiale) [Brooks et Flynn, 1989] ou lorsque la qualité de la communication peut subir une perte importante (milieu hostile, grandes profondeurs, etc.) [Ferber, 1995].

I.1.5 Synthèse des performances potentielles : la recherche d'une meilleure agilité

Une notion qui nous semble fédérer l'ensemble des aspects de la performance présentés auparavant est celle d'agilité: "agility can be defined as the capability of surviving and prospering in a competitive environment of continuous and unpredictable change by reacting quickly and effectively to changing markets, driven by customer-designed products and services" [Gunasekaran, 1999]. L'agilité se traduit alors en termes de réactivité, d'évolutivité, de résistance aux dysfonctionnements, etc. (nous avons complété le schéma de Duffie et Prabhu figure 12 en faisant figurer l'agilité comme l'actuel objet de compétition entre les entreprises).

L'adéquation entre ce besoin en agilité et les structures plus hétérarchiques est notamment visible chez de grands groupes mondiaux tels que Toyota où [Ochoa, 1997] :

- le nombre total de niveaux hiérarchiques est fortement réduit (chez Toyota cinq niveaux seulement sont définis),
- la communication inter et intra niveaux est rendue prioritaire, dans un souci de satisfaction croissante du client et de l'amélioration des processus de l'entreprise (progrès permanent : Kaizen),
- les systèmes Kanban². [Takahashi et Nakamura, 2002] et de « cellular manufacturing » [Chan et al., 1999] sont mis en œuvre.

Cependant, en contrepartie des performances précédentes, concevoir et mettre en œuvre un système de pilotage hétérarchique induit un certain nombre de risques et peut conduire à l'apparition de nouveaux problèmes ou à la disparition de conditions facilitant la mise en œuvre ou la maîtrise des performances [Cavaliere et al., 2000]. La partie suivante décrit cette problématique.

² Cependant, étant donné qu'aucune décision n'est réellement prise au sein des différentes mailles (centres de pilotage locaux), le Kanban s'apparente plus à une commande décentralisée de production ou à un mécanisme auto-régulé et complètement déterminé, sans réel autonomie et degré de liberté.

1.2 Problématique

De nombreux problèmes relatifs aux systèmes de pilotage hétérarchiques ont été identifiés : l'apparition de conflits, l'asynchronisme entre entités, [Hirsch et al., 1996], l'instabilité, l'imprévisibilité (en terme de date ou de comportement) ou le comportement chaotique [Bongaerts et al., 2000], [Duffie et Prabhu, 1996], la difficulté accrue de la maîtrise des dysfonctionnements, les risques de blocage, les risques de myopie et de sous-performances chroniques [Cantamessa, 1997]. Nous distinguons deux classes de problèmes : les problèmes relatifs à la modélisation et les problèmes de mise en œuvre des systèmes de pilotage hétérarchiques.

1.2.1 Problématique de modélisation

Si les problématiques relevées ici concernent spécifiquement la modélisation de systèmes de pilotage hétérarchiques, elles s'ajoutent cependant à celles relevant de la modélisation d'un système de pilotage en général, problématiques identifiées auparavant.

Le problème fondamental de la modélisation des systèmes de pilotage hétérarchique, est, selon Cavalieri et al. le suivant: "From the local behaviors of single decision making units, a global behavior of the manufacturing system emerges coherently with requested characteristics (e.g., reactivity)" [Cavalieri et al., 2000]. De notre point de vue, cette problématique (local/global) caractérise notre domaine de recherche : l'intérêt théorique apporté au niveau du pilotage hétérarchique est qu'il ne suffit pas d'envisager tout type de distribution pour garantir le respect d'un cahier des charges qui s'exprime sous la forme de contraintes (en terme de réactivité, de coût, etc.) de plus en plus fortes en raison de l'évolution du marché actuel. L'« hétérarchisation » du pilotage induit une problématique de modélisation qu'il convient de caractériser puis de gérer. Ainsi, la problématique fondamentale de la modélisation d'un système de pilotage hétérarchique réside dans la modélisation d'une organisation d'un ensemble d'entités :

- en cohérence avec une finalité globale de pilotage et dans un environnement donné,
- telle que, en exploitation, le comportement du système complet conduise à atteindre différents objectifs globaux [Monteiro, 2001], [Charpentier et al., 2001].

Le mécanisme de distribution doit permettre, dans une démarche descendante (top-down) de distribuer de manière cohérente et exhaustive par rapport aux fonctions de pilotage, un certain nombre d'objets, tandis que le mécanisme complémentaire (parfois appelé émergence³ ou intégration) doit permettre, dans une démarche ascendante (bottom-up), de garantir un fonctionnement performant du couple (système de pilotage, système opérant). L'émergence, qui est un thème de recherche en pleine extension, correspond à la globalisation de la performance par combinaison des performances locales des entités [Baker, 1998], [Ueda, 2001].

Une seconde classe importante de problèmes est celle relative aux mécanismes de prise de décision par les entités. Souvent, les efforts de recherche sont axés sur la résolution des problèmes d'articulation des actions entre entités (cf. problèmes précédents) au détriment de ceux portés sur ces mécanismes. Pourtant, ces derniers sont fondamentaux dans le sens où de 'mauvaises' décisions induisent des sous-performances chroniques non aisément identifiables. La qualité des informations à la base des décisions (précision) n'est pas seulement en jeu, l'adéquation de la méthode de décision avec les objectifs recherchés l'est également [Durand, 2000], [Pomerol, 1997].

1.2.2 Problématique de mise en oeuvre

Une étude qui fait référence dans le domaine de l'informatique répartie (distributed computing) a été réalisée par Sun Microsystems. Elle a permis d'identifier quatre problèmes génériques spécifiquement liés à la répartition des capacités de traitement [Waldo et al., 1994]:

- Le temps de latence requis pour activer un processus distant (latency),
- L'organisation de la mémoire diffère entre entités distantes (memory access),
- une panne en environnement non centralisé n'est pas forcément détectée et même si cette panne est détectée, il est tout aussi complexe d'identifier le système sujet de la panne : est-ce une connexion réseau ou une machine ? (partial failure),

³ Ce qui caractérise un comportement émergent, c'est la possibilité d'identifier à un niveau global une fonctionnalité qui n'est pas identifiable localement. Cela fait en partie référence au principe fondamental de la systémique qui permet de distinguer l'approche cartésienne ou à l'inverse, le tout est la somme ou la concaténation des parties. Ceci est dû à l'apparition de la dimension fonctionnelle. Par exemple, la fonction de déplacement d'une voiture ne peut être identifiée au niveau de chacun de ses composants, le tout fait quelque chose que chacune de ses parties ne peut faire.

- la concurrence des méthodes et de la sémantique (l'uniformisation des méthodes et de la sémantique est rarement possible).

Même si, du point de vue logiciel il existe des techniques d'aide à la résolution des deux premières problématiques, les deux dernières problématiques sont difficiles à résoudre. Ce qui caractérise un système non centralisé par rapport à un système centralisé, c'est l'absence d'un point d'allocation de ressource unique, de synchronisation et de recouvrement après dysfonctionnement [Waldo et al., 1994].

II Modèles de systèmes de pilotage hétérarchique : état de l'art

Cette partie décrit les contributions relatives aux systèmes de pilotage hétérarchique (sens large et strict). Elle est structurée comme suit :

- les grandes approches de modélisation recensées dans la littérature sont présentées, en incluant les outils de modélisation et de mise en œuvre couramment utilisés,
- les contributions significatives dans ce domaine sont décrites en utilisant un formalisme ensembliste et positionnées en utilisant la grille d'analyse des modèles présentée figure 11.

II.1 Approches de modélisation des entités et du système de pilotage

Ces approches et les modèles qui en découlent ont pour objectif de proposer un « comment », c'est-à-dire un modèle explicite du système de pilotage et des entités et de mettre en évidence les gains réels qu'apporte un pilotage hétérarchique par rapport à un pilotage hiérarchique ou centralisé.

Patrity distingue quatre écoles de modélisation [Patrity, 1998] : les systèmes multi-agents, les systèmes hétérarchiques, les « bionic manufacturing systems » et les « holonic manufacturing systems ». Cette typologie est courante (cf. [Baker, 1998]). Cependant, elle ne nous semble pas uniforme dans le sens où il y a amalgame entre critères structurels (hétérarchie) et critères conceptuels (agent, holons). C'est pourquoi nous proposons la typologie suivante :

- approche par processus,
- approche multi-agent,
- approche holonique,
- autres approches en émergence (approche bionique, fractale, etc.).

Nous avons essentiellement travaillé sur les approches par processus et multi-agent. Dans la suite de ce document, nous décrivons l'ensemble de ces différentes approches.

II.1.1 Approche par processus

L'approche par processus consiste à définir des modèles d'entités orientés vers la dimension temporelle des processus et activités. La communauté automatique s'est fortement appuyée sur cette approche pour s'intéresser à ce que doit faire un système de pilotage hétérarchique, par rapport à ce qu'il fait effectivement (performances) et aux moyens qui permettent de maintenir ces performances.

Cette approche conduit naturellement à l'élaboration de systèmes de pilotage décentralisé (en proposant des modèles d'entités *de* pilotage) puisque c'est l'identification de fonctions de pilotage qui prime au niveau de la conception du système (des fonctions de pilotage sont alors affectées aux entités). C'est une approche essentiellement francophone qui conduit à différents types d'entités de pilotage : centre de pilotage, centre de conduite, I-machine, Station Intégrée de Pilotage, Entité Autonome de Pilotage, etc. Cependant certaines contributions non francophones constituent des contributions majeures (en particulier, le concept de « station manager » développé par Duffie).

II.1.2 Approche holonique

Il existe plusieurs définitions d'un holon, terme inventé par Koestler : "Holon" is a word coined by combining 'holos' (the whole) and 'on' (a particle) [Koestler, 1967]. Relevons en particulier :

- un holon, correspond à un élément d'un système manufacturier autonome et coopératif dédié à la transformation, au transport au stockage et/ou à la gestion des objets physiques ou informationnels [Van Brussel et al., 1998]. Un holon est souvent constitué d'une partie traitant de l'information et d'une autre, traitant des flux physiques. Un holon peut être constituant d'un autre holon. Une holarchie est constituée d'un ensemble d'holons autonomes qui coopèrent pour atteindre un but : "a system of holons which can cooperate to achieve a goal or objective" [Van Brussel et al., 1998].
- a holon is defined by the HMS (Holon Manufacturing Systems) consortium as "an autonomous and cooperative building block of a manufacturing system for transforming, transporting, storing and/or validating information and physical objects" [Van Leeuwen et Norrie, 1997] cité dans [Shen et Norrie, 1999].

Dans le domaine de la gestion de production, il est courant de définir un "Holon Manufacturing System (HMS)": "a holarchy which integrates the entire range of manufacturing activities from order booking through design, production and marketing to realize the agile manufacturing enterprise. An HMS is therefore a manufacturing system where key elements, such as raw materials, machines, products, parts, AGVs, etc., have autonomous and cooperative properties [Van Brussel et al., 1998].

L'adéquation entre cette approche de modélisation et le concept de pilotage hétérarchique provient essentiellement de la possibilité de modéliser tout type de classe de systèmes de pilotage et tout type d'acteur de production.

En France, cette approche n'est actuellement adoptée que par un nombre relativement faible d'équipes de chercheurs [Sousa et Ramos, 1999]. Au niveau international, par contre, elle se développe sensiblement [Bongaerts et al., 2000], [Van Leeuwen et Norrie, 1997].

II.1.3 Approche multi-agent

Les systèmes multi-agents constituent avec la résolution distribuée de problème et l'intelligence parallèle un domaine de l'intelligence artificielle distribuée (IAD) [Sohier, 1996].

L'adéquation entre un agent et le concept de pilotage hétérarchique résulte du fait qu'une définition minimale d'un agent (au-delà de toute considération portant sur les différentes définitions de Ferber, Huhns [Huhns, 1987], Shen, Brenner, etc.) est celle d'une entité qui perçoit son environnement, agit sur celui-ci et se comporte de manière rationnelle (raisonnement) [Mandiau et Grislin, 2002], [Agimont, 1996]. Par conséquent, il est aisé d'adapter cette approche au pilotage hétérarchique.

Un agent est essentiellement un objet logiciel autonome, finalisé et capable de communiquer. Au contraire des autres objets logiciels, un agent fonctionne suivant sa propre initiative. Un système d'agent est conçu pour atteindre les objectifs programmés d'avance par son concepteur [Mandiau et Grislin, 2002].

Un nombre élevé de contributions nationales et internationales dans le domaine du pilotage hétérarchique relèvent de cette approche.

II.1.4 Autres approches

La bionique correspond à l'adaptation du fonctionnement du monde vivant et de son comportement, pour modéliser d'autres systèmes, notamment industriels. Un domaine du monde vivant qu'il est naturel d'adapter plus particulièrement est celui de l'organisation cellulaire. Il existe en effet de nombreuses analogies possibles: une unité de production peut être comparée par exemple à une cellule. L'organisation est naturellement hiérarchique (cellule, organe, être vivant, société) et coordonnée (par les enzymes) [Okino, 1993]. Elle peut par exemple conduire à la définition de modulons qui sont composés de cellules, d'enzymes ou de gènes et qui peuvent modéliser des produits ou des ressources de production. Autre approche de type bionique, l'analogie avec les systèmes à populations sociales tels que les colonies de fourmis mettant en œuvre des mécanismes de communication par phéromones [Caro et Dorigo, 1998], [Peeters et al., 2001], [Berger et al., 2002].

L'approche fractale constitue une approche innovante. Dans le domaine des mathématiques, la fractalité caractérise une courbe constituée d'un ensemble continu de singularités auto-similaires telles que la partie de l'ensemble limite est identique à l'ensemble total [Le Méhauté, 1990]. Appliqué dans le cadre de la production, le concept d'entreprise fractale a pour approche de s'inspirer des propriétés des structures fractales afin de modéliser de manière récursive les entreprises par des fractales définies par des objectifs et capables de coopération et d'itération (processus) [Warneke, 1993].

Nous avons voulu, en présentant ces deux dernières approches, être le plus exhaustif possible en mettant en évidence certaines perspectives prometteuses, notamment dans le domaine de l'adaptation et l'auto-organisation (un état de l'art

spécifique à l'auto-organisation dans le domaine du pilotage hétérarchique a été proposé dans [Bousbia et Trentesaux, 2002]). Malgré cela, ces approches souffrent encore actuellement d'un manque de caractérisation axiomatique qui permettrait d'exploiter les concepts définis au-delà d'un premier cadre purement descriptif des modèles pour aborder une dimension plus prescriptive (caractérisation des situations, recherche d'invariant, de propriétés, démarche méthodologique, etc.).

II.1.5 Positionnement relatif des approches de modélisation

Au-delà de leur contribution à la modélisation de systèmes de pilotage hétérarchiques, il existe de nombreux points communs entre ces différentes approches, ce qui peut conduire à de nombreuses confusions. C'est pourquoi il nous semble important de mettre en évidence leurs différences fondamentales:

- L'approche holonique se différencie de l'approche multi-agent par le fait que le concept d'holon est récursif [Coudert, 2000]. Elle complète cependant cette approche en considérant que, dans le système manufacturier, machines et êtres humains peuvent être « collègues » [Baker, 1998].
- Pour [Tharumarajah et al., 1996], la différence entre l'approche fractale, holonique et bionique se situe essentiellement au niveau de la facilité de mise en oeuvre des modèles. L'approche fractale, se basant sur la notion de dimension non entière, requiert des outils spécifiques de mise en oeuvre tandis que les modèles holoniques et bioniques ne nécessitent que des outils classiques tels que les langages de programmation objet. A titre illustratif, la mise en oeuvre d'une commande Crone (approche fractale de la commande par généralisation du concept de dérivation à un ordre non entier) a dû faire l'objet de travaux spécifiques, notamment en mécatronique, pour permettre sa mise en oeuvre [Oustaloup et al., 1996]. Un arrangement récursif de N cellules élémentaires correspondant chacune à un système du 1^{er} ordre (dérivation entière) et présentant des caractéristiques spécifiques permet de mettre en oeuvre les lois de commandes correspondantes dans un cadre dérivation non entière.
- La notion d'holarchie couvre les trois classes d'agencement (classes I, II et III) [Bongaerts et al., 2000], alors que l'approche multi-agent s'applique essentiellement à des agencements de classe III.
- Dans l'approche multi-agent, on favorise une distribution du pilotage (intelligence artificielle distribuée). Dans l'approche holonique ou par processus de pilotage, c'est la décentralisation du pilotage qui est favorisée, mais ce n'est pas systématique. Les différents processus de pilotage sont répartis et ne sont donc plus aisément localisables.
- La dimension cognitive est propre à l'approche multi-agent (notion de plan, d'intention, de croyance, de but, etc.), tout comme la dimension purement réactive à base de population (colonies de fourmis par exemple) permettant de mettre en évidence l'émergence d'un comportement social ou d'un comportement global intelligent à partir de comportements sociaux élémentaires.
- L'originalité de l'approche par processus est de privilégier la dimension temporelle des activités de pilotage, et la mise en évidence du triptyque (état, évaluation, action) et des processus de décision (renseignement, conception, décision, évaluation, etc.). Cette dimension temporelle est souvent absente dans le domaine des systèmes multi-agent ou des holarchies.

En annexe 4, nous donnons la liste des outils de modélisation et de mise en oeuvre couramment utilisés. La partie suivante positionne les contributions selon la grille d'analyse présentée figure 11.

II.2 Positionnement des contributions

Dans cette partie nous présentons les contributions significatives, nationales et internationales. Cette présentation est suivie d'une description des principales communautés scientifiques nationales et internationales.

Le positionnement des contributions est réalisé de manière relative afin de mettre en évidence les ressemblances et différences. Nous avons défini, pour caractériser les différentes contributions, un formalisme ensembliste basé sur la grille d'analyse des modèles de systèmes de pilotage non centralisé (figure 11).

II.2.1 Description du formalisme de caractérisation

Les notations sont les suivantes : un système <S> est caractérisé suivant les vues fonctionnelle (F), organique (O) et évolutionnistes (E). Nous notons <S : F, O, E>. Selon notre approche de modélisation générique, nous définissons deux caractérisations :

- $\langle SP \rangle : \langle SP : F, O, E \rangle$ caractérise le modèle global du système de pilotage non centralisé d'une contribution C, avec $F \in \{DEC, DIS, MIX\}$, $O \in \{I, II, III\}$ et $E \in \{O, AO\}$. DEC, DIS et MIX représentant les trois classes traduisant la vue fonctionnelle des modèles de systèmes de pilotage non centralisé : pilotage décentralisé, distribué ou mixte ; I, II, III les trois classes correspondant à la vue organique du système ; O et OA les deux classes représentant la vue évolutionniste : organisé ou auto-organisé. Afin de simplifier notre analyse, le type d'interaction (par partage de tâches ou de résultats) relatif à la vue organique n'est pas pris en considération, l'essentiel des interactions étant de type par partage de tâches.
- $\langle SE \rangle : \langle SE : F, O, E \rangle$ caractérise le modèle des systèmes-entités d'une contribution C, avec $F \in \{EDP, EPP, MIX\}$, $O \in \{E, Rc\}$ et $E \in \{Ra, A\}$. EDP, EPP et MIX représentant les trois classes correspondant à la vue fonctionnelle des modèles d'entités : système composé d'entités de pilotage, d'entités pour le pilotage ou des deux ; E et Rc, les deux classes relevant de la vue organique : entier (non récursif) ou récursif ; enfin, Ra et A, représentant les deux classes relevant de la vue évolutionniste : réactif ou adaptatif.

Une contribution donnée C est ainsi représentée sous la forme $C = (\langle SP \rangle, \langle SE \rangle)$.

Le tableau 1 positionne les contributions que nous avons relevées dans l'état de l'art. Par soucis de complétude, quelques modèles significatifs de systèmes de pilotage de classe I y sont mentionnés. Ces modèles ne seront pas décrits plus en détail dans ce document.

Les références similaires (selon notre classification) se situent sur une même ligne et permettent d'identifier les « grandes écoles » de modélisation.

Les deux parties suivantes décrivent plus en détail une sélection de quelques références positionnées dans ce tableau (au niveau national puis international). Ces références choisies sont nécessairement relatives aux systèmes de pilotage hétérarchique au sens large (de classe II et III). Le choix des références a été effectué afin d'illustrer les différentes écoles de modélisation que le tableau 1 nous permet d'identifier.

II.2.2 Contributions nationales

Plusieurs laboratoires français travaillent explicitement dans le domaine du pilotage hétérarchique.

Une majorité des travaux de modélisation est de type $C = (\langle DEC, II/III, O \rangle, \langle EDP, E, Ra \rangle)$. Ces travaux peuvent être considérés comme des travaux de référence. L'approche multi-agent est souvent utilisée et l'on remarque que la majorité des cadres applicatifs sont ateliers de production. Relevons les travaux effectués au LIMOS [Mebarki et al., 1996], [Kouiss et al., 1997], au LIA [Gouardères, 1999], au DIAM/LSIS [Ferrarini et al., 1993], [Baillet, 1994], [Tranvouez, 2001], [Broissin, 2001], [Pujo et Ounnar, 2001] au PRISMA [Chébéane et Echalié, 1997], au LAMIH [Tchako, 1994], au LAG [Kallel, 1985], [Pellet, 1985], au LGIPM [Roy, 1998], au LGP [Archimède et Coudert, 2001] et au LLP [Berchet et al., 1999]. Signalons que l'un des principaux initiateurs de cette thématique de recherche en France (au travers du concept de I-machine) est D. Brun-Picard [Brun-Picard, 1988]. Outre le terme « I-machine » pour décrire une EDP, l'on peut identifier d'autres termes : « centre de conduite », « centre de pilotage », « entité autonome de pilotage », « station intégrée de pilotage », etc. Ces deux derniers concepts ont été développés dans le cadre de mes travaux menés au sein de l'équipe SP du LAMIH.

Un dénominateur commun à tous ces modèles d'EDP est l'utilisation du principe d'allocation dynamique d'opération au travers d'un protocole de négociation de type « contract-net » [Smith, 1980] ou plus rarement par enchères. Un autre dénominateur est celui des méthodes de prise de décision des entités essentiellement basées sur la maximisation d'une fonction d'utilité prédéfinie (forme additive ou règles de décision). L'ensemble de ces caractéristiques permet d'identifier dynamiquement les « meilleures » entités à un instant donné et d'aboutir à un comportement fortement réactif, mais souvent peu performant en raison de la myopie naturelle des entités. C'est pourquoi la majorité des systèmes de pilotage proposés sont de classe II avec un niveau hiérarchique de supervision. Ce niveau permet de propager localement un ensemble de contraintes aux entités de niveau inférieur pour maintenir un comportement global cohérent. Cependant, étant donné le fait que ces modèles sont souvent très liés au cadre applicatif et ne présentent pas de mécanismes d'adaptation (au niveau des entités) et d'auto-organisation (au niveau système de pilotage), ces travaux font régulièrement l'objet de critiques portant sur l'intérêt réel de ces modèles en comparaison avec une approche plus hiérarchique. En effet, de par la puissance sans cesse croissante des calculateurs, il existe, au niveau opérationnel des ateliers, des solutions logicielles et des méthodes d'ordonnancement centralisé (tel que ORDO par exemple [Roubellat et al., 1995]). Ces logiciels sont capables de proposer des ordonnancements réactifs de très bonne qualité, même si l'approche centralisée requiert de poser un ensemble d'hypothèses réductrices sur le comportement et les caractéristiques des parties opératives.

Certains de ces travaux ont été étendus afin de proposer un premier niveau d'auto-organisation, mais celle-ci ne porte que sur l'ajout ou la suppression d'entités de pilotage en fonction des ajouts ou suppressions de ressources de production, voir par exemple les modèles développés au DIAM/LSIS [Pujo et al., 1999], [Broissin, 1999] ou au PRISMA [Beslon et al., 2001]. Ces modèles sont souvent de type $C = (\langle \text{DEC}, \text{II/III}, \text{AO} \rangle, \langle \text{EDP}, \text{E}, \text{Ra} \rangle)$. Dans ce cadre, ce type d'auto-organisation est relativement aisé à mettre en œuvre. Il suffit pour cela de définir des protocoles d'interaction qui ne présupposent pas la connaissance a priori de l'ensemble des entités en jeu. Par conséquent, la première phase de ces protocoles consiste souvent à identifier à l'instant courant les entités disponibles.

Un second niveau d'auto-organisation plus élaboré est plus rarement proposé. Il porte non seulement sur les entités de pilotage des ressources, mais également sur les entités de pilotage des produits. Un principe fédérateur est de mettre en concurrence ces deux types d'entités, avec des objectifs spécifiques, éventuellement conflictuels, pour conduire à l'émergence de solution globalement satisfaisantes après négociation ou coopération (par exemple, pour une entité-produit, de « sortir » du système de production le plus rapidement et pour les entités-ressources, de maximiser leur utilisation). Relevons en particulier les contributions émanant du LURPA. Le LURPA présente une forte activité de recherche dans le domaine de la vérification (modélisation à base de grafctet). La contribution relevée est de type $C = (\langle \text{MIX}, \text{III}, \text{AO} \rangle, \langle \text{MIX}, \text{E}, \text{Ra} \rangle)$ basée sur le principe de l'éco-résolution. L'éco-résolution est une technique de résolution distribuée de problème (domaine multi-agent) basée sur une interaction simple entre agents réactifs dont le comportement est donné par des réactions élémentaires de type attente, recherche de satisfaction, agression etc. Un éco-problème est alors défini par un ensemble d'état initiaux et finaux des agents. La résolution consiste à élaborer les séquences qui vont faire passer les agents de leur état initial à leur état final. Pour chaque agent, un graphe permet de décrire l'évolution entre les différents états. L'intérêt de l'approche réside également dans la vérification, c'est-à-dire la preuve de la validation du comportement global a posteriori. Ainsi, un comportement global émerge sans qu'un modèle explicite des séquences ne soit nécessaire [Sohier et al., 1998], [Sohier, 1996].

Une autre extension porte sur la capacité d'adaptation possible des entités. Là également, les contributions françaises sont assez rares et font surtout état d'une intégration de mécanismes adaptatifs sans réelle mise en œuvre. Nous avons relevé malgré tout les modèles adaptatifs proposés au PRISMA, en particulier ceux de [Chébéane et Echalié, 1999] où $C = (\langle \text{DIS}, \text{III}, \text{O} \rangle, \langle \text{EPP}, \text{E}, \text{A} \rangle)$ et de [Beslon et al., 2001] (projet Arapsi) où $C = (\langle \text{DIS}, \text{III}, \text{AO} \rangle, \langle \text{EPP}, \text{E}, \text{A} \rangle)$. L'adaptation porte soit sur le mode de réaction aux aléas en fonction des perturbations passées [Chébéane et Echalié, 1999], soit sur les préférences des entités pour optimiser leur comportement (communications et décisions) en fonction des négociations et des contrats passés. Pour ce faire, des mécanismes d'apprentissage de type neuronaux sont proposés. Ils permettent d'enrichir les bases de comportements possibles [Beslon et al., 2001]. Une partie des travaux que j'ai mené se place dans ce cadre. Ce thème constitue également un axe majeur de mes perspectives de recherche à long terme.

Une approche originale par entité récursive est proposée au CRAN. Elle est de type $C = (\langle \text{MIX}, \text{II}, \text{O} \rangle, \langle \text{MIX}, \text{Rc}, \text{Ra} \rangle)$ [Patriiti et al., 1997], [Patriiti, 1998]. Les travaux abordent également la problématique de la méthodologie [Charpentier et al., 2001], ce qui est encore très rare. En effet, la grande majorité de travaux illustrent la faisabilité de l'approche hétérarchique dans le domaine du pilotage sans réellement aborder sur les aspects méthodologiques : analyse des performances, caractérisation de l'impact des paramétrages de conception sur les performances, etc. On retrouve également cette absence d'ordre méthodologique dans le domaine du multi-agent [Mandiau et Grislin, 2002].

On peut également relever un certain nombre de contributions non directement liées au développement de systèmes de pilotage hétérarchique, mais dont les résultats peuvent avantageusement être exploités afin de répondre à certaines des problématiques soulevées.

Le LAAS travaille sur la coopération entre centres de décision. La prise de décision est effectuée par un (des) opérateur(s) humain(s) assisté(s), le cas échéant, assisté par des systèmes d'aide à la décision [Erschler et al., 1997], [Camalot, 2000]. Une décision est caractérisée par un ensemble de variables de décision représentant l'ensemble des actions possibles du centre sur un certain horizon. La prise de décision correspond alors à l'instanciation d'une ou plusieurs variables de décision. L'originalité de cette approche est son caractère générique résultant de l'utilisation d'une approche par contraintes. Cette approche permet de décrire différentes situations de prise de décisions locales sous ou sur un certain nombre de contraintes locales ou globales. L'apport de cette thématique se positionne essentiellement par rapport à la résolution de la problématique de myopie des systèmes hétérarchiques. Le cadre applicatif est ainsi plus large que celui du pilotage hétérarchique.

Selon une optique similaire, au LAG, des travaux sont actuellement menés afin de formaliser les différents mécanismes de coopération à l'aide de réseaux de Petri [Monteiro et Ladet, 2001], [Monteiro, 2001]. Cette approche, appliquée dans le cadre de la négociation entre clients et fournisseurs permet d'identifier les types de décisions à prendre.

La contribution du LAP, relative au modèle de centre de conduite, porte essentiellement au niveau des activités de planification de ces centres [Bourrières et al., 2001], [Lecompte-Alix, 2001]. L'originalité se situe essentiellement au

niveau de la formalisation des données techniques dans un cadre de structuration verticale/horizontale et la proposition de règles de cohérence qui contribue également à résoudre la problématique de myopie. Au-delà de cette récente activité de recherche, on peut constater une évolution sensible de l'approche de la conduite adoptée par le LAP qui évolue d'un modèle largement répandu et connu, mais exclusivement hiérarchique (GRAI [Doumeings, 1990], PCS [Archimède, 1991]) vers un modèle de conduite intégrant des structures plus horizontales et qui supporte les mécanismes de coopération sous-jacents.

Un certain nombre de projets de recherche français tels que le projet Grecopme II piloté par l'ENSME de St Etienne [Burlat et Boucher, 2001], [Hammami et al., 2001] ou le projet DRDF DRE du programme CNRS-Prosper [Monteiro, 2001] relèvent de certains aspects du pilotage hétéroarchique tels que la coopération ou la gestion des informations et des compétences. L'originalité de ces projets se situe au niveau du cadre applicatif tactique et stratégique (chaîne logistique, réseaux d'entreprises, relation donneur d'ordre/fournisseur, etc.).

II.2.3 Contributions internationales

Neil A. Duffie de l'université de Wisconsin-Madison (Département of Mechanical Engineering) est un des pionniers dans le domaine du pilotage hétéroarchique [Duffie et Piper, 1986], [Duffie et Piper, 1987], [Duffie et al., 1988], [Duffie et Prabhu, 1994], [Duffie et Prabhu, 1996]. Son approche est soit de type C = (<DEC, III, O>, <EDP, E, Ra>) soit de type C = (<MIX, III, O>, <MIX, E, Ra>). Ses travaux constituent la base de nombreux autres travaux actuels, en particulier ceux menés au sein de l'équipe SP du LAMIH. Le dénominateur commun à tous ces travaux est la classe du système de pilotage qui est de type III (N. A. Duffie a en grande partie contribué à la diffusion du terme « hétéroarchique »). Parmi les nombreux apports de N. A. Duffie, relevons celui d'une caractérisation axiomatique d'un système hétéroarchique (selon sa définition) où les entités doivent présenter un certain nombre de propriétés fondamentales qui régissent tout système hétéroarchique. Ces propriétés portent sur les protocoles de communication, l'autonomie et l'indépendance requises, l'absence de niveau de supervision et d'information globale, etc. N. A. Duffie « montre », au travers de nombreuses simulations sur des systèmes de grande taille, que ces propriétés conduisent à des performances élevées en terme de réactivité, d'efficacité (comparé à des heuristiques notamment), de résistance aux fautes et d'évolutivité du système (ajout de nouvelles fonctionnalités, modification du code source, etc.). Ces travaux n'intègrent cependant pas de mécanismes d'adaptation ou d'auto-organisation. L'approche de modélisation adoptée est originellement par processus, et, plus récemment, multi-agent. Les travaux de H. Bakker de l'université de Delft, dont les premières publications à ce sujet datent de la même période, relèvent de la même catégorie [Bakker, 1988].

A l'ERIM (Etats-Unis), relevons les travaux qui ont été conduits, sous l'impulsion d'un pionnier dans le domaine du manufacturier à base d'agents, H. V. D. Parunak, à l'élaboration de plusieurs modèles, depuis le système de pilotage décentralisé hétéroarchique Yams (Yet another Manufacturing System) [Parunak, 1985] jusqu'à plus récemment l'architecture de référence Aaria (Autonomous Agents for Rock Island Arsenal) [Parunak et al., 1998]. Le modèle Yams est de type (<DEC, III, O>, <EDP, E, Ra>). L'architecture de référence Aaria peut être considérée comme une architecture représentative de l'approche multi-agent intégrant chaque acteur autour du processus de production (fournisseur, client, opération, en-cours, ressource, etc.). Le principe est de décrire au travers d'agents coopérants le processus de production : chaque opération s'effectue sur un en-cours en mobilisant un certain nombre de ressources [Parunak et al., 1998]. Cette approche a été récemment étendue pour intégrer les fonctionnalités MES (Manufacturing Execution System) et ERP (Entreprise Resources Planning). Ce modèle est de type C = (<DIS, III, O>, <EPP, E, Ra>). Un site web a été spécialement mis en place à cet effet : <http://www.aaria.uc.edu/>. En collaboration étroite avec l'ERIM, le laboratoire "Agent-Based Manufacturing" du département "Electrical, Computer Engineering and Computer Science" de l'université de Cincinnati, sous l'impulsion de A. D. Baker, a depuis 1991 également travaillé dans cette thématique [Baker, 1991], [Baker, 1998].

Dans le domaine de la robotique, relevons les travaux très aboutis menés depuis les années 1980 au MIT [Brooks et Flynn, 1989], [Brooks, 1991]. Ces travaux ont pour objet de mettre en œuvre des robots capables d'adaptation par mécanismes d'apprentissage. L'architecture de pilotage de chacun de ces robots est appelée « subsumption architecture ». Elle est typiquement distribuée : C = (<DIS, III, O>, <EPP, E, A>). Les activités de captage, filtrage, communication, commande, etc. sont distribuées parmi un ensemble de « computational elements » basés sur des machines à état finis. L'organisation est statique, l'essentiel des travaux porte sur ces mécanismes d'apprentissage par recherche de satisfaction d'un ensemble d'indicateurs internes hiérarchisés également définies selon une approche bionique (le robot recherche à satisfaire le besoin de satiété avant celui de la mission par exemple). Ces travaux ont conduit à la réalisation de plusieurs dizaines de robots marcheurs ou rouleurs. L'approche distribuée de l'architecture de pilotage permet de réaliser de tels robots capables d'apprentissage en des temps records (un robot six pattes capable d'apprentissage a été réalisé en 12 semaines après sa conception initiale par une équipe dont le noyau est constitué de deux personnes seulement) [Brooks et Flynn, 1989].

On relève également un ensemble de contributions importantes liées à la proposition de modèles de références. Ces modèles de références sont caractérisés par un fort degré de liberté en termes de capacité de paramétrage que le concepteur réduit en appliquant une méthode de conception pour chaque cas applicatif. Ainsi, ils concernent le domaine général de l'« intelligent manufacturing systems » (en incluant éventuellement les autres phases du cycle de vie des systèmes et les niveaux élevés des entreprises, y compris les chaînes logistiques). Relevons l'architecture adaptative Metamorph développé à l'université de Calgary (Dept. Manufacturing Engineering, Canada) [Maturana et al., 1999], Prosa développé à l'université catholique de Louvain (Belgique) [Van Brussel et al., 1998] et Archon développé dans le cadre d'un projet Esprit [Cockburn et Jennings, 1994]. La première s'appuie sur l'approche multi-agent tandis que la seconde s'appuie sur l'approche holonique. D'autres approches holoniques similaires ont été développées [Bongaerts et al., 2000], [Van Leeuwen et Norrie, 1997], [Zhang et al., 2000], [Sousa et Ramos, 1999]. Ces architectures de références sont caractérisées par un invariant : les systèmes de pilotage sont de classe II.

Prosa est une approche de type $C = (<MIX, II, O>, <MIX, E, Ra>)$. Prosa décrit une architecture de référence à base d'holons récursifs de plusieurs types pour modéliser essentiellement les produits, les ressources, les ordonnancements et les ordres. L'originalité de cette approche est ainsi d'éviter la séparation entre le processus opérant (partie opérative) et le pilotage. Une demande client est traitée successivement par les holons produits pour évaluer la faisabilité de la production, puis par les holons ordonnanceurs pour proposer, négocier ou revoir les délais, puis par les holons ordres pour gérer la production avec les holons produits. Du point de vue de chaque holon, il existe un protocole de communication avec les autres types d'holons.

Metamorph I est de type $C = (<MIX, II, AO>, <MIX, E, A>)$. Metamorph I décrit une architecture de référence à base d'agents. Cette architecture, initialement dédiée au problème de planification et pilotage (incluant l'ordonnancement) a été étendue dans le cadre de la chaîne logistique et de l'intégration d'entreprise et a conduit à l'architecture Metamorph II. Une première originalité de cette approche est de définir des médiateurs à tous les niveaux où des conflits peuvent apparaître et dont les rôles de négociateurs peuvent porter soit sur les ressources de production, les produits, la gestion des informations et les acteurs impliqués. Une seconde originalité est dans la prise en compte relativement poussée des mécanismes relevant de la vue évolutionniste, en particulier l'adaptation et l'auto-organisation. L'adaptation est assurée selon deux méthodes : mémorisation des meilleures activités passées pour des produits similaires (learn from history) et projection par simulation de l'impact des perturbations pour un meilleur paramétrage (learn from the future). Cette adaptation est effectuée en fonction des classes d'événements qui surviennent. Le second mécanisme (auto-organisation) concerne la complexification par clonage et spécialisation des agents et la simplification par regroupement et fusion « clustering ».

Une approche par architecture de référence permet non seulement d'aborder la problématique de la modélisation de ces systèmes, mais également d'élargir le périmètre d'analyse à d'autres approches de modélisation des processus de décision distribuée au sein ou en dehors des entreprises (fractal factory, random manufacturing, virtual manufacturing, web manufacturing, intelligent manufacturing, etc.) [Van Brussel et al., 1998], [Hirsch et al., 1996], [Parunak, 1994], [Tharumarajah et al., 1996].

En émergence, un ensemble de contributions liées à la bionique qui est caractérisée par des mécanismes puissants d'évolution, d'adaptation et d'auto-organisation. Cette approche est particulièrement étudiée dans les pays de l'extrême orient (Japon, Corée, etc.). Dans ce cadre, une contribution originale est celle d'Okino, où à une entité pour le pilotage (appelée modulon) est associée un produit à transformer et transporte dans son code génétique (ADN) les informations nécessaires à sa transformation. Il trouve auprès de ribosomes (ARN) de fabrication les opérations nécessaires à sa réalisation [Okino, 1993]. Cette contribution est de type $C = (<DIS, III, AO>, <EPP, E, A>)$. On peut citer également la contribution originale (mais encore peu développée) émanant de l'Institut Technologique de Tokyo où, dans un objectif de mouvement, un robot composé d'entités-modules présentant différents degrés de libertés et hétérogènes (bras articulé, roue, etc.) est capable de s'auto-configurer (auto-organisation) pour réaliser le mouvement recherché [Murata et al., 2001]. La définition de systèmes de pilotage présentant un niveau relativement élevé d'auto-organisation constitue également une de nos perspectives de recherche [Bousbia et Trentesaux, 2002].

L'approche par population de type société (de fourmis) rentre également dans cette catégorie « bionique » [Peeters et al., 2001] $C = (<DIS, III, AO>, <EPP, E, A>)$. Des mécanismes de ré-enforcement permettent d'intégrer des instabilités (ce qui correspond à mettre en place des contre-réactions positives) qui font évoluer le système d'une organisation à une autre. Cette approche est encore trop récente pour nous permettre d'identifier clairement des laboratoires ou des contributions fondamentales dans ce domaine [Parunak et Brueckner, 2001]. Les premières tentatives de mise en œuvre sont toutefois à l'étude. Relevons à titre illustratif l'exemple d'un projet issu de l'Information Society Technologies' « Future & Emerging Technologies » soutenu par la Commission Européenne : le projet 'Swarm-Bots' IST-2000-31010 (<http://www.swarm-bots.org/>).

Au CENTOR (Canada), le modèle de « netman center » de type $C = (<DEC, II, O>, <EDP, E, Ra>)$ permet de modéliser un large panel de situations et de stratégies de pilotage hétérarchiques [Montreuil et al., 2000]. L'originalité

réside dans la volonté d'intégrer de manière hétérarchique tous les acteurs, du plus haut au plus bas niveau d'une entreprise (business, manufacturing et operating systems). Cette contribution reste encore descriptive, elle permet de modéliser un existant ou une projection, mais elle ne fournit pas de solutions de mise en œuvre ou des recommandations de conception.

Une approche originale de type $C = \langle \text{DIS}, \text{II}, \text{O} \rangle, \langle \text{EPP}, \text{E}, \text{Ra} \rangle$ a été développée sous l'impulsion de K. Cetnarowicz à l'Institut of Computer Science de l'université des mines et de la métallurgie de Cracovie (Pologne). L'idée consiste à définir un système MRP (connu pour sa faible réactivité et son incapacité à aider les responsables à améliorer les performances) comme un système de pilotage hétérarchique [Cetnarowicz et al., 2000]. Les fonctions de pilotage MRP sont décentralisées vers les entités selon les trois types de logistiques (logistique amont, interne et aval). Le système est conçu pour gérer plusieurs entreprises pour chaque type de logistique. Les plates-formes de simulation sont développées à partir de modèles agents.

On peut également relever un certain nombre d'activités de recherche non directement liées au pilotage hétérarchique, mais pouvant apporter un ensemble de contributions dans la résolution des différentes problématiques.

Signalons l'application des CSP (constraint satisfaction problem) dynamique et du concept de backtracking (remise en cause d'instanciations passées) proposée par Burke et Prosser dans un contexte d'ordonnancement distribué [Burke et Prosser, 1991].

Signalons également un ensemble de techniques applicables spécifiquement en ordonnancement distribué développées par Rajah Tharuma [Tharumarajah, 1998], [Tharumarajah, 2001].

Le modèle de Cellular Manufacturing System de l'université de Tokyo (prof. Tomiyama) a été en partie développé dans le cadre du projet Gnosis de l'IMS afin de supporter des mécanismes d'auto-configuration pour des systèmes automatisés [Kondoh et al., 2000], [Tomiyama, 1997]. L'approche cellulaire se distingue d'une approche classique (atelier flexible notamment) par un regroupement opérationnel au sein d'une cellule autonome de ressources humaines et matérielles dédié à la production d'un type de produit [Kondoh et al., 2000]. Cette évolution, vers plus d'autonomie des unités de production, conduit naturellement à considérer cette approche comme un cadre applicatif des systèmes de pilotage hétérarchique [Chan et al., 1999].

Le projet Archon (projet Esprit 2256) a été défini dans un objectif d'intégration d'un environnement multi-systèmes experts [Cockburn et Jennings, 1994]. Ce projet concernait initialement le domaine du contrôle de la distribution de l'énergie électrique. Il a été étendu au pilotage d'environnements de production robotisés. L'originalité de cette approche est de rechercher l'intégration d'un ensemble de systèmes existants selon le paradigme multi-agent alors que la majorité des travaux dans ce domaine se placent dans un contexte de conception ex-nihilo.

II.2.4 Communautés scientifiques

Au niveau international, les grands organismes ou groupes de recherche internationaux tels que l'IMS (<http://www.ims.org/>), l'IEEE (<http://www.ieee.org/>) et l'IFAC (<http://158.42.53.29:8080/index.htm>) s'intéressent clairement aux problématiques de recherche liées à la distribution des capacités de pilotage à tous les niveaux des entreprises. Les projets émanant de l'IMS (Intelligent Manufacturing System) group se placent systématiquement dans un contexte distribué [IMS, 2000], [Tharumarajah et al., 1996]. Ce groupe a soutenu de nombreux projets traitant de cette thématique et notamment de l'application du concept multi-agent au domaine de la production. Le rapport 2000 de cet organisme fait état d'un nombre important de projets relatif au pilotage hétérarchique [Tharumarajah et al., 1996], [IMS, 2000].

Aux USA, depuis 1993, le National Center for Manufacturing Science a également soutenu de nombreux projets dans ce domaine. Le développement technologique centré sur l'internet permet désormais de mettre en œuvre des modèles qu'il n'était pas possible d'implémenter il y a peu de temps encore et qui constituent, d'après de nombreux experts gouvernementaux américains, un des enjeux majeurs des années à venir [Baker, 1998].

Au niveau national, depuis sa création en 1996, et sous l'impulsion de J. Erschler puis de J.P. Campagne et P. Pujo, le GRP a fait preuve d'une certaine originalité et volonté à traiter les problèmes liés au pilotage distribué ou hétérarchique de la production au sein du groupe OGP (organisation et gestion de production). Ce groupe, en collaboration avec les groupes Evaluation de performances et Modélisation d'entreprise, a déposé auprès du ministère une ASP (action spécifique programmée) intitulée « Pilotage des entreprises en réseaux ». La thématique du pilotage distribué y apparaît de manière explicite. Un numéro spécial sur le pilotage distribué organisé par les groupes OGP et Commande et Pilotage a été publié fin 2001 dans la revue JESA.

Ce thème est également abordé au sein du GRAISYHM (Groupement de recherche en automatisation intégrée et systèmes homme-machine) et plus particulièrement au niveau du thème « Commande et Pilotage ».

Enfin, le CIRP (<http://www.cirp.net/>), fédérant une communauté internationale de chercheurs, accorde, parmi ses thèmes de recherche, une importance croissante aux nouvelles approches sur l'auto-organisation des systèmes de pilotage dans le cadre de la production manufacturière. Les publications relevées dans ses annales illustrent clairement cette volonté [Kondoh et al., 2000], [Ueda et al., 2001], [Okino, 1993].

Conclusion

Dans ce chapitre, à partir de la grille d'analyse des modèles proposée dans le chapitre précédent (figure 11), une typologie fédératrice des modèles de systèmes de pilotage hétéroarchique a été proposée. Cette typologie a conduit à l'élaboration d'un tableau synthétique positionnant l'état de l'art national et international relatif au développement de modèles de systèmes de pilotage hétéroarchique.

Le chapitre suivant décrit nos principales contributions et résultats en les décrivant selon le même formalisme de caractérisation présenté dans ce chapitre.

<i>Système :</i>	<i>Système de pilotage</i>			<i>Entités</i>			<i>Référence (application)</i>	
<i>Vue :</i>	F	O	E	F	O	E	<i>Dans le cas où plusieurs références sont données, elles sont jugées proches selon la typologie présentée</i>	
Déc.	I II III	Organisé Auto-organisé	EDP : entité de pilotage			Entier Récursif	Réactif Adaptatif	
			Organisé	I	Niveau supérieur : Entité supervision: pilotage des entités shop-floor Niveau inférieur : Entité shop floor : pilotage d'un shop floor	E	Ra	[Khoo et al., 2001] (multi shop-floor)
					Niveau supérieur : Entité pilotage des charges (équilibre global) Niveau intermédiaire : Entité pilotage des cheminements-produits (flexibilité, pannes) Niveau bas : Entité pilotage des ressources (ordonnancement temps-réel)	E	Ra	[De Smet et Abou-Kandil, 1995]
					N niveaux : Entité client : pilotage des besoins Entité ExLog: pilotage des commandes Entité warehouse : pilotage des stocks chez distributeurs Entité IntLog : pilotage de la production interne Entité Factory : pilotage des chaînes de production	E	Ra	[Gjerdrum et al., 2001] (Chaîne logistique)
					N niveaux : Entité de pilotage de la planification, de la programmation, de l'ordonnancement, de la conduite et de la commande	E	Ra	[Anthony, 1965] [Dindeleux, 1992] [Huguet, 1996] [Kimemia, 1982] [Archimède, 1991] [Doumeingts, 1990] (production manufacturière)
					Niveau supérieur : Entité superviseur : pilotage des entités ressources Niveau inférieur : Entité ressource : Pilotage d'un centre de travail	E	Ra	[Mebarki et al., 1996] (FMS) [Gouardères, 1999] (FMS) [Ferrarini et al., 1993] (FMS) [Kouiss et al., 1997] (FMS) [Hafri et Najid, 2001] (cellule flexible) [Archimède et Coudert, 2001] [Berger et al., 2000] [Roy, 1998] [Berchet et al., 1999] [Roy et Anciaux, 2001] (shop floor)
			Organisé	II	Entité de pilotage des logistiques amont, interne et aval	E	Ra	[Cetnarowicz et al., 2000] (MRP)
					Entité Netman : pilotage d'un ensemble de fonctions de production d'une entreprise Différents types : Clients, entrepôts, fournisseur, centre de production Niveau 1 : regroupement d'entités dédiées au pilotage du « business process »	E	Ra	[Montreuil et al., 2000] (chaîne logistique)

		Niveau 2 : regroupement d'entités dédiées au pilotage du réseau de production « manufacturing network » Niveau 3 : regroupement d'entités dédiées au pilotage opérationnel des ressources de production « operating system network »				
		Niveau 1 (niveau supérieur) : Entité superviseur : responsable de production (pilote les entités coordinateurs) Niveau 2 : Entité coordinateur : coordination des cellules (pilote les entités machines) Niveau 3 : Entité machine : pilotage des machines de production	E	Ra	[Tranvouez et al., 1999] (cellule flexible) [Kallel, 1985] [Pellet, 1985] [Baillet, 1994]	
III	Organisé	Entité ressource: Pilotage d'une machine de production	E	A : Porte sur : la manière de réagir aux aléas En fonction de : perturbations passées	[Chebeane et Echalié, 1999] (workshop)	
		Entité ressource: Pilotage d'une machine de production	E	R	[Duffie et Piper, 1986] [Duffie et al., 1988] [Duffie et Prabhu, 1994] (FMS) [Tchako, 1994] [Pujo et Ounnar, 2001] [Brun-Picard, 1988] [Parunak, 1985]	
	Auto-organisé					
	Porte sur : Ajout/Sup. d'entités En fonction de : panne ressource	Entité ressource : Pilotage d'un centre de tournage	E	Ra	[Pujo et al., 1999] (atelier d'usinage, système transitive robotisé) [Broissin, 1999]	
		Porte sur : Ajout/Sup. d'entités ressource En fonction de : modification du système physique	Entité ressource : pilotage des différents types de ressources	E	A : Porte sur : les préférences des entités pour optimiser les communications En fonction de : négociations & contrats passés	[Beslon et al., 2001] (workshop)
Dis.	I II III	Organisé Auto-organisé	<i>EPP : entité pour le pilotage</i>	<i>Entier Récuratif</i>	<i>Réactif Adaptatif</i>	
	II	Organisé	Niveau supérieur : Entité coordination : coordination des activités parallèles des entités concurrentes Niveau inférieur : Entité séquençage : gestion du planning (MT) des opérations Entité ordonnancement : ordonnancement (CI) des opérations	E	Ra	[Shih et Srihari, 1995] (assembly line)

		Entité équilibrage : gestion de l'équilibrage des lignes de production Entité supervision : gestion de l'état des ressources, produits et ordres Entité configuration :				
III	Organisé	Entités opération, ressource, manager, produit, client et fournisseur	E	Ra	[Parunak et al., 1998]	
		Distribution des activités de captage, évaluation, commande, etc. à un ensemble d'entité calculateur qui décident des actions (computational elements) en réseau	E	A: Porte sur: Choix des actions et coordination des actions En fonction de : Différents niveaux internes de satisfaction atteints (approche bionique)	[Brooks, 1991] (robotique)	
	Auto-organisé					
	Porte sur : Ajout/Sup. d'entités C En fonction : Commandes et livraison clients	Entité O : calcul de l'ordonnancement Entité LDC : regroupement fonctionnel des ressources d'une entreprise (local distribution center) Entité C : entité virtuelle regroupant les ressources impliquées pour un type de produit et surveillant l'évolution du produit	E	Ra	[Rabelo et al., 1999] (virtual entreprise)	
	Porte sur : L'organisation globale du module par auto-organisation selon deux degrés de liberté de chaque bloc modulaire. En fonction : Des objectifs de mouvement et difficulté du terrain	Entité : module robotisé à différents degrés de liberté (roue, bras articulé, etc.)	E	Ra	[Murata et al., 2001]	
	Porte sur : Ajout/sup. d'entités (fourmis, modulon) et ordres de fabrication	Entité fourmi, modulon : gestion d'un produit Entité OF : gestion des ordres de fabrication	E	A : Porte sur : Optimisation des circuits par analogie aux mécanismes de type communication par phéromones (rétroaction +/-) En fonction de : Expériences passées	[Peeters et al., 2001] [Okino, 1993]	
Mixte	I	Entités de pilotage et pour le pilotage	Entier	Réactif		
	II					
III						
	I	Organisé	EDP: Entité ressource : Pilotage d'une ressource de production Entité transport : Pilotage d'une ressource de manutention/transport	E	Ra	[Caridi et Sianesi, 2000] (ligne d'assemblage)

		EPP : Entités produit, sous-ensemble, composant : connaissance sur le produit, les sous-ensembles et les composants			
II	Organisé	Niveau supérieur : EPP : Entité superviseur : synchronisation des deux types d'EDP de niveau inférieur Niveau inférieur : EDP: Entité ressource : Pilotage d'une ressource de production Entité maintenance : Pilotage de l'activité de maintenance EPP : Entité ordre de fabrication : suivi de la réalisation du produit	E	Ra	[Coudert, 2000] (atelier de production)
		Niveau supérieur : EPP : Entité superviseur de tâche : synchronisation des entités tâches Entité superviseur de ressource : synchronisation des entités ressources Niveau inférieur : EDP: Entité ressource : Pilotage d'une ressource de production EPP : Entité tâche : gestion des tâches de fabrication	E	Ra	[Ouelhadj et al., 1998] (atelier de production)
		Niveau supérieur : EDP : Macro-entité ressource : pilotage d'un ensemble de ressources de production Niveau inférieur : EDP: Entité ressource : Pilotage d'une ressource de production EPP : Entité produits : connaissance sur les produits Entité ordres de fabrication : suivi de la réalisation des produits	Rc : Sur les entités ressources	Ra	[Bongaerts et al., 2000] (shop-floor) [Sousa et Ramos, 1999] (FMS) [Van Leeuwen et Norrie, 1997] [Van Brussel et al., 1998] [Zhang et al., 2000] [Patriiti, 1998]
	Auto-organisé Porte sur : Clonage des entités ressources et regroupement par cluster autour d'une tâche de production En fonction : Génération/suppression de tâches	Niveau supérieur : EPP : Entité médiateur : coordination des entités ressources Niveau inférieur ; EDP : Entité ressource: pilotage d'une ressource de production (transport, personnel, outillage)	E	A : 2 mécanismes : - mémorisation des meilleures activités passées pour des produits similaires (learn from history) - projection par simulation de l'impact des perturbations pour un meilleur paramétrage (learn from the future) En fonction de : Classes d'événements	[Maturana et al.,1999] (fonction production) [Shen et al., 1998] (tous les services d'une entreprise + chaîne logistique)
III		EDP : Entité atelier : pilotage du système de production	E	Ra	[Duffie et al., 1996] (FMS) [Kim et al., 1996] (FMS)

Organisé	EPP : Entité produits : suivi de l'état des produits Entité ressource : suivi de l'état d'une ressource de production Entité événement : gestion des informations			
	EDP : Entité ressource : pilotage des ressources de production EPP : Entité produit : pilotage des produits et sous ensembles	E	Ra	[Macchiaroli et Riemma, 2002] [Lin et Soldberg, 1992] (FMS)
	EDP : Entité ressource: pilotage des ressources de production Entité application : pilotage des fonctions de production EPP : Entité interface : interfaçage avec un utilisateur Entité collaboration : gestion des informations « pages jaunes » Entité connaissance : gestion des connaissances (+data mining)	E	Ra	[Ulieru et al., 2000] (web manufacturing)
	EDP : Entité manager: pilotage d'une ressource de production EPP : Entité fonctionnelle : entité gérant une fonction annexe (regroupement fonctionnel) à la production (transport, etc.)	E	Ra	[Bakker, 1988] (FMS)
	Auto-organisé			
Porte sur : ajout/sup. d'entités produit En fonction : Des commandes enregistrées, en cours et bouclées	EDP : Entité workstation: pilotage d'une ressource de production EPP : Entité produit : gestion du produit en cours de réalisation	E	A: Porte sur: Paramètres de décision des entités produits En fonction de : Des performances relevées de ces entités pour un jeu de paramètres donné sur un cycle de production	[Maione et Naso, 2001] (Flexible Assembly System)
Porte sur : Ajout/Sup. d'entités dynamiques En fonction de : arrivé/départ ordre de fabrication	Entité dynamique : pilotage d'un produit Entité statique : pilotage d'un organe de production	E	Ra	[Sohier, 1996] (cellule fraisage) [Sohier et al., 1998]
Porte sur : ajout/sup. d'entités ordre de fabrication et sous-assemblage En fonction : Des commandes enregistrées, en cours et bouclées	EDP : Entité cellule: pilotage d'une cellule de production EPP : Entité ordre de fabrication : une entité par OF Entité sous-assemblage : une entité par produit en cours d'assemblage Entité ligne de fabrication : gestion des informations d'un ensemble de cellules (ligne composée de cellules de production)	E	Ra	[Lu et Yih, 2001] (multiple assembly line)

Tableau 1. Analyse de l'état de l'art dans le domaine du pilotage non centralisé des systèmes de production.

Chapitre III

Contributions et résultats de recherche

Introduction

Ce chapitre expose nos différentes recherches et les résultats obtenus suivant deux axes. Le premier, porte sur la proposition de modèles de systèmes pilotage hétérarchiques organisés et d'entités (de/pour le pilotage) non adaptatives. Le second concerne plus particulièrement l'extension des modèles d'entités dans l'objectif d'y intégrer un ensemble de mécanismes d'adaptation.

Chaque axe regroupe plusieurs thèmes présentés selon le schéma suivant : présentation de la problématique et de l'objectif du thème, positionnement de la contribution et présentation des résultats obtenus.

I Axe 1 : modèles de systèmes de pilotage décentralisés

Les modèles de systèmes de pilotage développés au sein de cet axe sont similaires dans la mesure où ils sont de type non hiérarchisés, décentralisés, organisés et composé d'entités réactives et non récursives, soit de type (<DEC, II/III, O>, <EDP, E, Ra>).

Quatre thèmes relèvent de cet axe de recherche. Ils sont définis par les cadres applicatifs correspondants (types de système opérant). Cela nous permet de différencier les différents contextes et problématiques qui ont été traitées, les contributions n'ayant pas été uniformes sur les mêmes aspects du pilotage décentralisé. Ces cadres applicatifs peuvent être considérés suivant deux points de vue :

- selon le cycle de vie d'un système-produit : phase de conception, de réalisation ou de maintien,
- selon le type de production: petite série ou série unitaire (produit complexe), moyenne série ou grande série (produit de consommation courante).

Les thèmes sont les suivants (présentés selon un ordre chronologique) :

- thème 1 : système de conditionnement à grande vitesse d'un produit de grande série sur une ligne de production (canette aluminium),
- thème 2 : système de production d'un produit de petite ou moyenne série sur un atelier de production (pièce de fonderie, d'assemblage),
- thème 3 : système de conception d'un produit et de sa logistique de soutien (organe de freinage),
- thème 4 : système de maintien d'un produit, en petite à très petite série, dans un atelier de maintenance (TGV).

Nous présentons nos contributions relatives à ces quatre thèmes qui sont à l'heure actuelle les plus avancées. Ils constituent en effet les thèmes sur lesquels l'équipe LAMIH/SP travaille depuis 1992.

1.1 Thème 1 : pilotage décentralisé de chaînes de conditionnement

Ce travail a été mené dans le cadre d'un contrat MRE (Ministère de la Recherche et de l'Enseignement) en collaboration avec la Société des Grandes Sources Perrier et deux laboratoires, le LAG (Grenoble) et le LIRMM (Montpellier).

1.1.1 Objectif et problématique

Les chaînes de conditionnement constituent un cas particulier de ligne de production en raison d'une cadence élevée de production (en produit par unité de temps). Deux types de ressources peuvent être définis: des ressources de production contribuant à l'accroissement de la valeur du produit (adjonction de matière, modification de l'aspect du produit, etc.) et des ressources de convoyage assurant le déplacement des produits semi-finis ou finis. Les différentes ressources communément rencontrées dans une chaîne de conditionnement sont schématisées et organisées comme indiqué sur la figure 1.

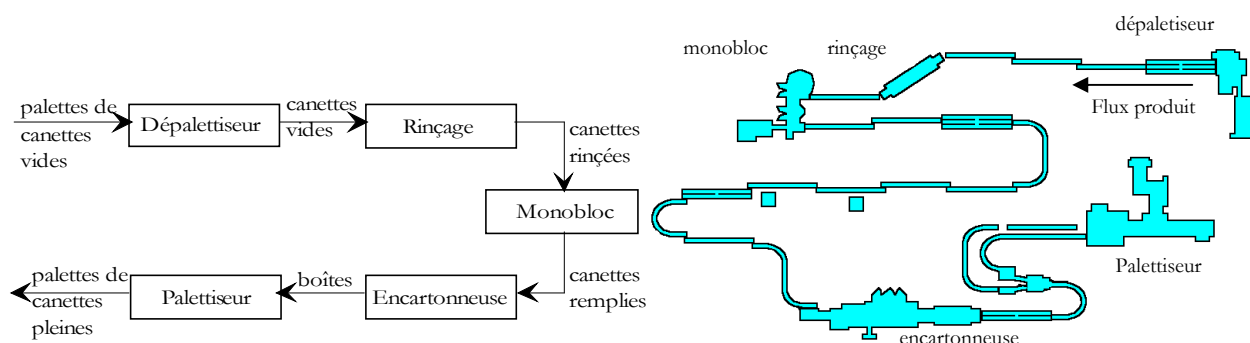


Figure 1. Synoptique d'une ligne de conditionnement (et exemple de ligne).

Les enjeux liés au pilotage sont importants car une légère perte de rendement global induit des pertes financières conséquentes. Or il est courant qu'une chaîne de conditionnement fonctionne à peine à 50% de sa cadence nominale. En outre, des micro-pannes (de l'ordre de la minute) difficilement détectables sont fréquentes (expulsion de produit hors d'un convoyeur, casse sur convoyeur, famine, bourrage, etc.) et peuvent conduire à des arrêts complets de la chaîne lourds de conséquence dans la mesure où ils requièrent une vidange complète de la ligne. Enfin, de nombreuses chaînes sont le siège de phénomènes de pompage (variations d'amplitude importante et périodique des quantités de produit sur les convoyeurs) qui accélèrent le vieillissement du système de production. En automatique, ces phénomènes illustrent le retard à la réaction d'un système de commande par rapport au processus contrôlé.

Un gain de quelques pour-cent sur la cadence effective est ainsi envisageable de manière réaliste, à condition de mettre en oeuvre un pilotage efficace: action pertinente sur les effecteurs, évaluation a priori et a posteriori des impacts des décisions, intégration des objectifs de production et des contraintes de mode de marche, analyse de rentabilité de l'investissement pour un système de pilotage, etc.

L'objectif de ce projet était de proposer et d'évaluer une alternative de pilotage hétérarchique ayant pour objectifs la minimisation des variations des cadences machines et la maximisation des flux de produit en sortie (problème de poursuite) et une meilleure prise en compte des micro-pannes (problème de régulation).

1.1.2 Contribution

La contribution a consisté en :

- l'élaboration d'un modèle de système de pilotage hétérarchique de type $C = \langle \langle \text{DEC}, \text{III}, \text{O} \rangle, \langle \text{EDP}, \text{E}, \text{Ra} \rangle \rangle$,
- la proposition d'une méthode de mise en oeuvre (paramétrisation, etc.) et d'évaluation (rendement global, temps de bon fonctionnement, etc.) de ce système. Les travaux de H. Maoudji (DEA, 1999) ont spécifiquement porté sur cet aspect et ont conduit à la proposition d'un modèle à base de réseau de Petri associant, par regroupement, les ressources et les convoyeurs à chaque EDP [Maoudji, 1999].

Le système de pilotage hétérarchique proposé est schématisé sur la figure 2 (l'EDP est ici appelée SIP : « station intégrée de pilotage »).

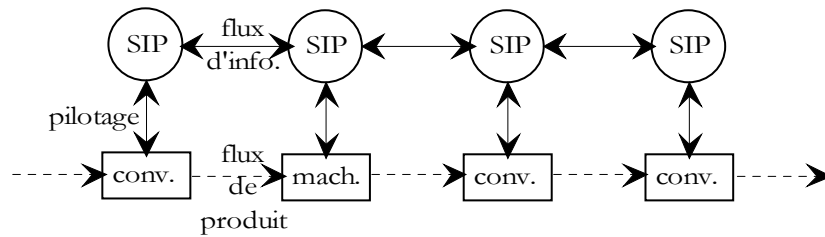


Figure 2. Agencement hétérarchique (classe III) proposé.

La régulation s'opère par l'échange d'informations (requêtes ou informations) entre une SIP et la SIP amont (de SIP X_i à SIP X_{i-1}) et aval (de SIP X_i à SIP X_{i+1}). La figure 3 précise, pour une SIP X_i ces relations.

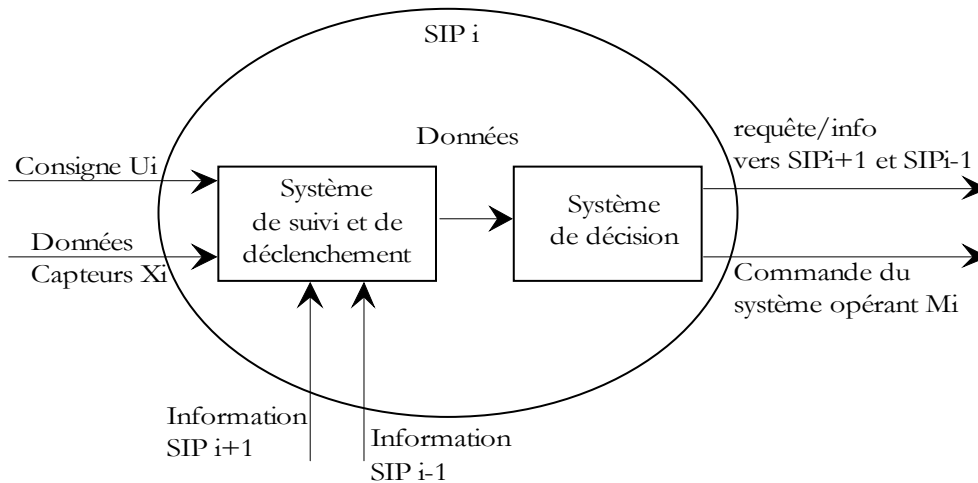


Figure 3. Environnement du système de décision de la SIP X_i pour la régulation.

Des protocoles de communications ont été définis à l'aide de primitives de communication (demande, acceptation, refus, information). Ils portent en particulier sur la négociation relative à la définition des cadences des ressources ou les vitesses des convoyeurs.

1.1.3 Résultats et validation

Ce projet a donné naissance à un prototype de simulateur (il n'y a pas eu d'applications industrielles suite au rachat de la société par Nestlé). L'interface du simulateur donnée figure 4 permet de représenter la chaîne complète avec les SIP composant le système de pilotage hétérarchique. Elle comporte les boîtes de dialogue pour la définition des paramètres des ressources de production et un graphique de résultats (indicateurs de performances).

Ce prototype nous a permis de valider un certain nombre de points relatifs aux mécanismes de négociation aboutissant à une régulation efficace de la ligne (réduction des phénomènes de pompage, meilleure absorption des micro-pannes, amélioration des flux de produit en fin de ligne) [Trentesaux et al., 1996].

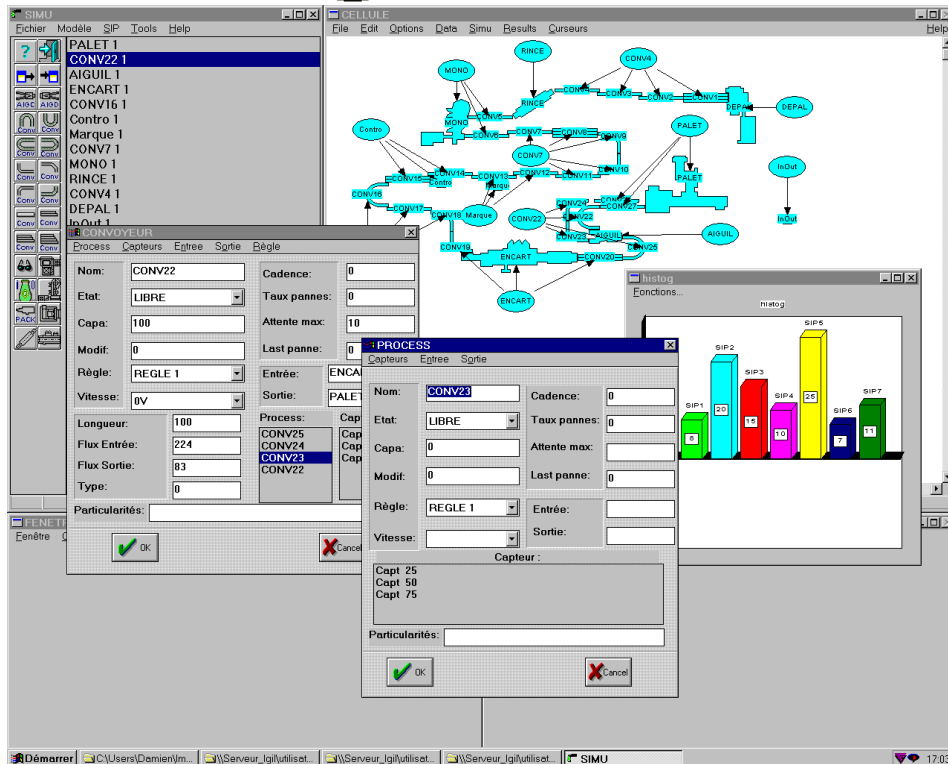
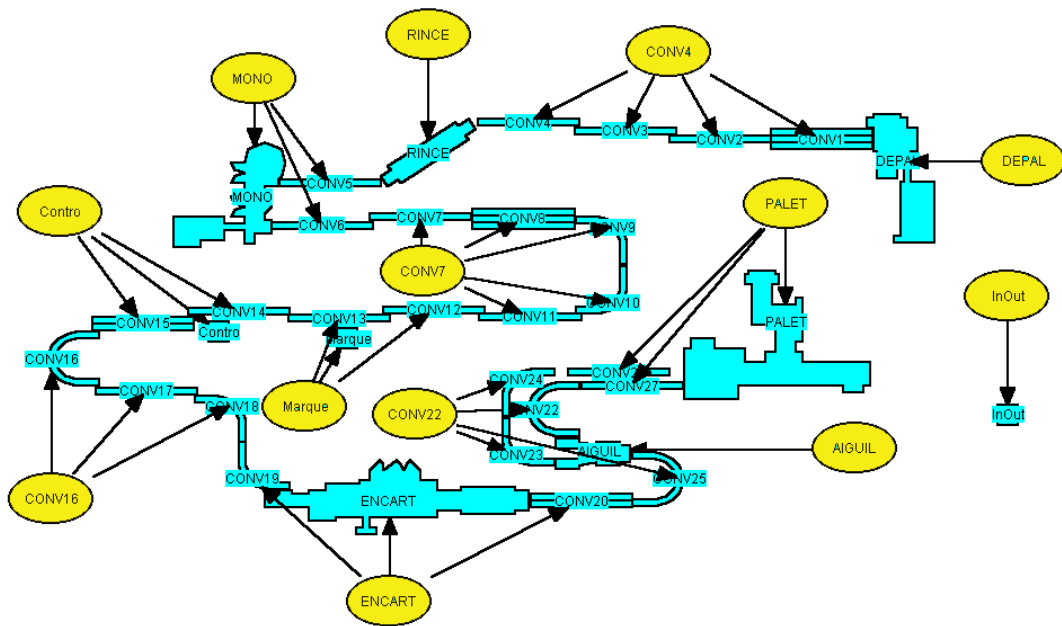


Figure 4. Agencement hétérarchique des SIP et interface du prototype de simulation.

1.2 Thème 2 : pilotage décentralisé d'ateliers de production

1.2.1 Objectif et problématique

Etant donné l'absence de flexibilité dans le parcours du produit, la faible complexité du produit et de ses composants et la relative régularité des flux de production, le pilotage d'une ligne de production doit être essentiellement réactif et à très court terme. Dans le cas des ateliers de production, le problème est sensiblement différent : la flexibilité intrinsèque des ressources, la diversité des produits générés et les contraintes de production à respecter (outillage, matière première, etc.) interdisent une approche réactive à court terme, comme dans le cas des lignes de production qui peut conduire à des sous-performances chroniques.

L'objectif de recherche relatif aux ateliers de production est de proposer puis de valider un modèle de pilotage décentralisé adapté à ce contexte. Cet objectif a constitué une première occasion d'étendre le concept de SIP.

L'extension du concept de SIP a donné naissance à un modèle d'EDP adaptables à différents contextes applicatifs (ateliers de production, lignes de production). Ce modèle d'EDP est appelé « Unité de Management Décentralisé » UMD. Les concepts généraux de ce modèle ont été présentés dans [Trentesaux et al., 2000b]. Le modèle du système de pilotage correspondant est de type C = (<DEC, II, O>, <EDP, E, Ra>).

Dans la partie suivante, nous décrivons une application du concept UMD dans le cadre des ateliers de production.

1.2.2 Contribution

Dans le cadre des ateliers de production, une UMD correspond à une unité de pilotage de ressources de production (UMD-RP).

Nous avons en particulier travaillé sur :

- la modélisation des relations verticales (ordonnancement dynamique des goulets) et horizontales (négociation) entre UMD-RP,
- la mise en évidence de l'impact des paramètres de conception et d'exploitation sur les performances globales pour, en retour, identifier les meilleurs paramétrages correspondant à un objectif donné.

1.2.2.1 Modélisation des relations verticales et horizontales

L'agencement proposé est de classe II : deux niveaux hiérarchiques sont définis, et le niveau supérieur ne contient qu'une seule entité.

L'entité de niveau supérieur (UMD-S) assure le pilotage des UMD-RP du niveau hétérarchique. Cette UMD-S est associée à un opérateur. Le rôle de cette UMD-S est principalement de détecter dynamiquement et de piloter par un ordonnancement réactif l'UMD-RP goulet et de gérer la cohérence globale des décisions locales. Les données prises en compte pour réaliser l'ordonnancement réactif du goulet sont issues de l'état des ressources de production et de la charge réelle du système de production. La détection et l'ordonnancement réactif constituent une démarche événementielle déclenchée par exemple par l'apparition de nouveaux ordres de fabrication. De cette manière, le sous-ensemble des opérations planifiées correspond aux opérations qui doivent être réalisées sur la ressource goulet durant la période considérée. L'ensemble de ces points est résumé sur la figure 5.

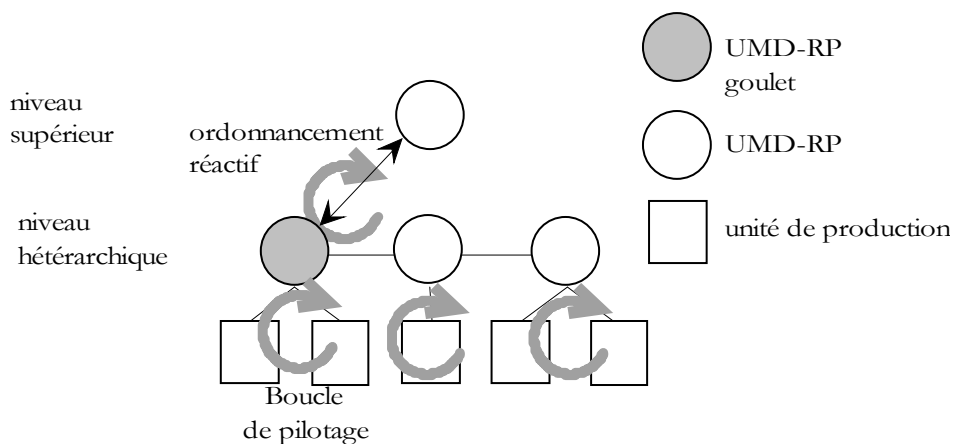


Figure 5. Agencement hétérarchique-supervisé (classe II) et pilotage de l'UMD-RP goulet.

Le concept de charge PMD (potentielle maximale dynamique) caractérise l'UMD-RP goulet. La charge PMD est maximale car le superviseur évalue en premier lieu le temps nécessaire à chaque ressource pour réaliser l'ensemble des tâches qui peuvent potentiellement lui être allouées. Les différents temps caractéristiques du processus de fabrication sont pris en compte (temps opératoires, temps de préparation, temps de changement outil, temps de réglage, etc.). Cette charge est potentielle : en effet, une opération qui peut être réalisée sous le contrôle d'une UMD-RP ne sera pas nécessairement effectuée sous le contrôle de cette UMD-RP. Elle est dynamique dans la mesure où le calcul de la charge peut être activé de manière événementielle, voire périodique, en utilisant la notion de filtre événementiel définie dans [Pesin et al., 1997], [Pesin et al., 1998a].

Le résultat correspond donc au temps maximum nécessaire à une ressource pour exécuter un ensemble de tâches non encore réalisé. La ressource la plus contraignante a priori est la ressource qui présente la charge PMD la plus élevée. Cette ressource constitue la ressource goulet jusqu'au prochain événement qui provoquera la ré-évaluation des charges et l'identification de la nouvelle ressource goulet (arrivée ou suppression d'un ordre de fabrication, etc.). Le superviseur ordonnance alors cette ressource en fonction des objectifs globaux de production.

Les tâches non planifiées sont allouées dynamiquement au cours de la fabrication selon un processus de négociation de type contract-net [Smith, 1980]. Les ressources non ordonnancées n'étant pas des ressources goulets, elles disposent d'une marge pour absorber les perturbations. Si malgré cette marge, une perturbation trop conséquente influe sur l'ordonnancement de(s) ressource(s) goulet(s), l'UMD-RP concernée peut avertir l'UMD-RP superviseur du besoin de ré-évaluer les charges et d'établir un nouvel ordonnancement.

Un aspect que nous considérons comme primordial est celui qui a trait aux prises de décision. Les UMD-RP du niveau hétérarchique mettent en œuvre deux processus décisionnels:

- un processus de pilotage, « de réalisation » : sa fonction est de piloter la réalisation d'une opération à l'aide d'un modèle comportemental des ressources de production composant le système physique. Ce modèle, décrit à l'aide de réseaux de Petri, intègre les modes de marche et d'arrêt de la ressource et les spécificités fonctionnelles de celle-ci. Il prend en compte les contraintes suivantes : prise en compte des temps opératoires variables selon les ressources, prise en compte des temps de transfert et de préparation, disponibilité variable des opérateurs et des outillages, travail à capacité finie, capacité de stockage finie, incompatibilité possible entre produits et opérations, gestion dynamique des données et de l'environnement, existence de gammes dynamiques ou alternatives, prise en compte d'aléas. Ce processus est activé dès qu'une opération a été reçue par une UMD-RP pour être réalisée par les ressources de production qu'elle pilote.
- un processus « d'allocation » : sa fonction est de répartir entre les UMD-RP les différentes opérations à ordonnancer dynamiquement, en fonction des objectifs de production, des gammes opératoires et des dates de disponibilité et de besoin des ordres de fabrication. Ce processus permet d'intégrer les contraintes de précédence entre opérations et les contraintes de faisabilité des opérations sur les ressources. Il est activé dès que le pilotage de la réalisation d'une opération prend fin et que l'ordre de fabrication correspondant n'est pas clôturé. Ce processus concerne une UMD-RP demandeur d'offre de service (qui correspond au besoin d'allocation) et un ensemble d'UMD-RP qui, en tant que contractants potentiels, répondent à l'appel d'offre.

Par conséquent, chaque UMD-RP du niveau hétérarchique met en œuvre trois décisions de type choix :

- décision 1 : choix de l'UMD-RP responsable du pilotage de la réalisation d'une opération à venir,
- décision 2 : choix du prochain ordre de fabrication parmi ceux alloués à l'UMD-RP pour lesquels l'opération en cours doit être réalisée et placement dans le temps de l'opération en cours.
- décision 3 : choix du prochain ordre de fabrication dont la réalisation de l'opération en-cours sera allouée à une UMD-RP.

En cas de contraintes spécifiques concernant le transport (par exemple, système filo-guidé, convoyeur à accumulation, chaîne logistique, entrepôts, distribution, etc.), l'ajout d'une UMD spécifique doit être envisagé pour modéliser ces contraintes de transport et optimiser éventuellement les parcours. Dans ce cas, un processus de transfert doit être défini pour compléter le processus d'allocation (en phase de transfert).

La figure 6 décrit les modèles réseaux de Petri des deux processus. Le processus d'allocation a été découpé en processus demandeur et processus contractant afin de mieux mettre en évidence les deux points de vue.

Le processus d'allocation est un protocole de communication entre UMD-RP. Il est nécessaire de le rendre, au moins partiellement, robuste vis-à-vis de certains aléas (perte de message, retard à l'acheminement). Pour ce faire, nous nous sommes basés sur l'approche suivante : on décompose en premier lieu le processus en graphes d'état indépendants puis on définit pour chaque graphe des procédures de recouvrement, de gestion de la redondance et de l'obsolescence des messages [Trentesaux, 1996].

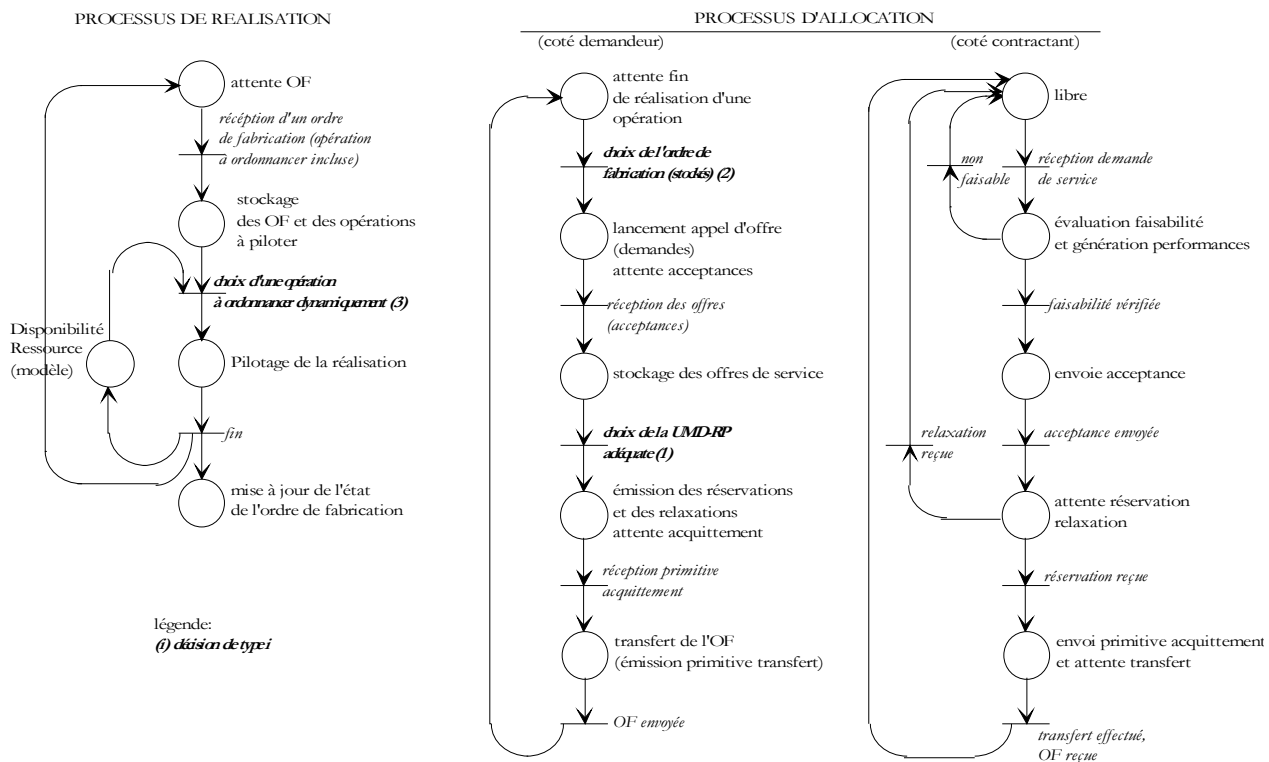


Figure 6. Modèles des deux processus.

Pour chacune des trois décisions identifiées, un ensemble de règles de décision a été établi (voir tableau 1). Chaque décision peut utiliser une seule règle ou une méta-règle composée d'une agrégation de type fonction d'utilité additive ou encore une agrégation de type multicritère (deux méthodes ont été programmées). Certaines règles sont spécifiques à certaines décisions.

Règle de décision	mesure	Décision 1	Décision 2	Décision 3
1: Nombre d'opérations en attente	Sans unité	X		
2: Temps de transport	Temps	X		
3: Qualité, fiabilité de la ressource	Pourcentage	X		
4: Coût de production	Monétaire	X		
5: Prochain temps libre	Temps	X		
6: Nombre d'opérations ordonnancées	Sans unité	X		
7: Temps cumulé de disponibilité	Temps	X		
8: Date d'arrivée opération	Temps		X	X
9: Temps opératoire	Temps	X	X	X
10: Durée des opérations restantes pour réaliser l'ordre de fabrication	Temps	X	X	X
11: Nombre d'opérations restantes pour réaliser l'ordre de fabrication	Sans unité	X	X	X
12: Date de besoin de l'ordre de fabrication	Temps	X	X	X
13: Marge disponible pour un OF	Temps	X	X	X

Tableau 1. Règles de décision.

I.2.2.2 Caractérisation de l'impact des paramètres

La partie précédente a montré l'identification de plusieurs paramètres de conception (agencement, etc.) et d'exploitation (règle de décision, pondération des méta-règles, etc.).

Nous nous sommes appuyés sur ces travaux pour caractériser l'impact de ces paramètres afin d'en déduire les jeux de paramètres pertinents selon l'objectif recherché. Les travaux menés dans ce cadre se basent par conséquent sur une démarche déductive de factorisation des éléments invariants développés dans le premier thème.

L'analyse des paramètres de conception a été détaillée dans [Trentesaux et al., 1998a], celle des paramètres d'exploitation a fait l'objet d'une collaboration avec le LAIL, dans le cadre du GRAISYHM. L'originalité de notre approche a été d'aborder le problème sous un angle multi-modèle (approches par satisfaction de contrainte et

approche hétérarchique pour générer des solutions de départ admissibles, algorithmes génétiques pour amélioration des performances, et logique floue et méthode multicritère pour réaliser l'évaluation de l'ensemble à des fins de caractérisation) [Mesghouni et al., 1999], [Trentesaux et al., 2001b], [Gzara et al., 2002]. Nous avons en particulier contribué à l'élaboration d'une méthode de sélection floue à partir de préférences floues (décrite sous forme de relation lexicographique, non pondérée). L'approche adoptée est basée sur la définition de critères d'évaluation de solutions admissibles et de règles d'inférences floues multicritères. L'utilisateur peut alors choisir un jeu de paramètres satisfaisants conduisant à l'atteinte des objectifs de performance qu'il cherche à atteindre.

I.2.3 Résultats et validation

I.2.3.1 Modélisation des relations verticales et horizontales

Une première validation a été réalisée par simulation des modèles développés. L'interface utilisateur est donnée à titre illustratif sur la figure 7. Elle montre un certain nombre de statistiques relatives aux UMD-RP telles que le nombre d'opérations pilotées, le temps moyen d'attente des ordres de fabrication au niveau de chaque UMD-RP et le nombre de contractants ayant répondu aux différents appels (processus d'allocation) ainsi que des résultats relatifs au processus de pilotage (diagramme Gantt, vue ressource).

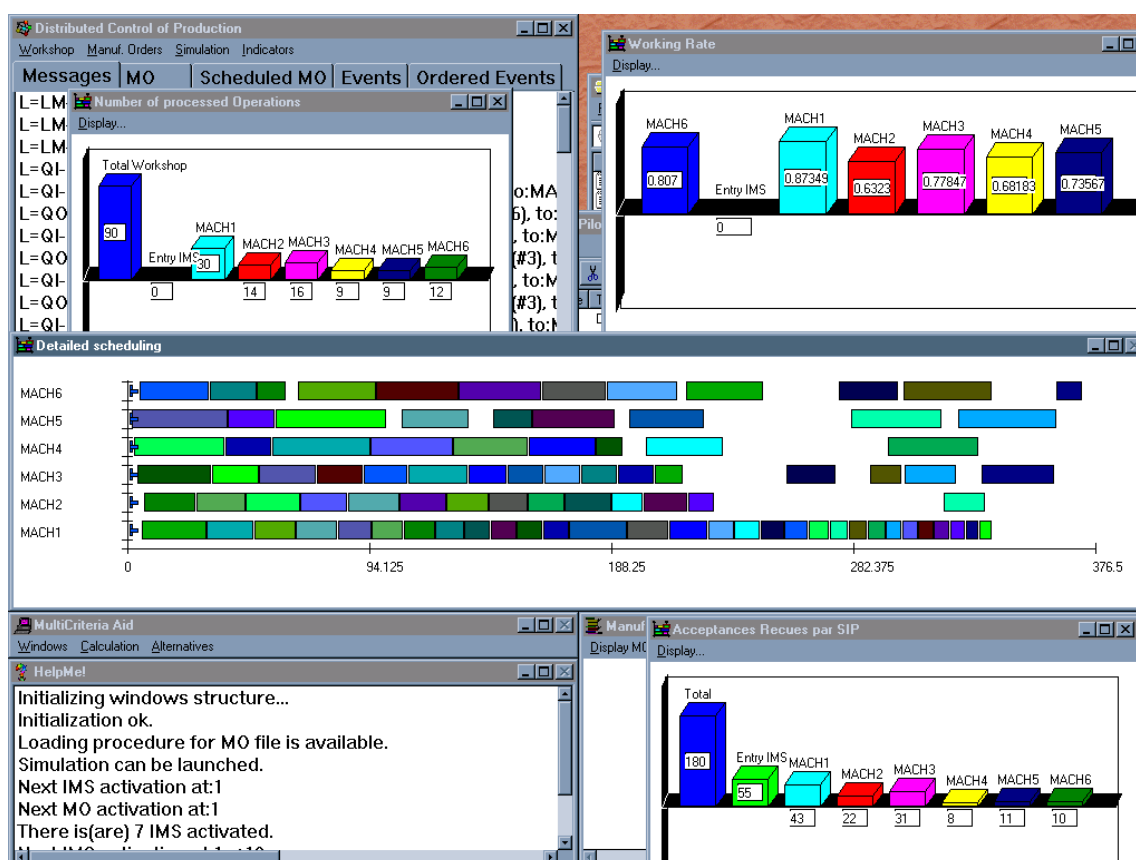


Figure 7. Interface du prototype de simulation.

Nous avons montré que notre approche offrait des performances élevées en terme de réactivité tout en maintenant un niveau de performance global satisfaisant notamment en termes de temps de réalisation.

Pour estimer les performances globales, une comparaison a été réalisée avec une méthode d'ordonnancement centralisée et statique utilisant la programmation par contraintes (logiciel CHIP). Cette comparaison a porté sur les temps de réalisation (Makespan). Elle met en évidence un temps de réalisation supérieur pour l'approche décentralisée (de 10% à 15%) [Trentesaux et al., 2001a]. La figure 8 montre cette évolution pour 30 simulations de complexité croissante (la simulation i correspond à la réalisation de i ordres de fabrication).

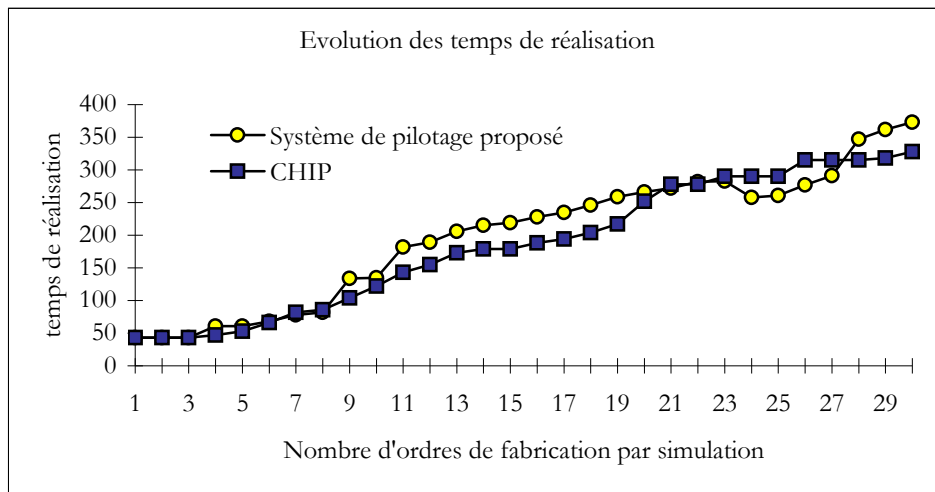


Figure 8. Evolution des temps de réalisation.

Ce différentiel de performance est dû aux faits que :

- l'algorithme d'ordonnancement modélisé avec CHIP est capable de retour en arrière ('backtracking') sur les placements alors que le modèle de pilotage ne peut pas actuellement,
- le modèle du système de production utilisé par la méthode d'ordonnancement par contraintes est fortement simplifié (temps de transfert nuls, etc.),
- la gestion des données est dynamique dans le cadre de la méthode décentralisée et statique dans le cas de la méthode par contrainte (cette dernière dispose ainsi de toutes les informations au début du calcul).

Plusieurs événements ont été simulés pour vérifier la réactivité et la robustesse. Ceci est présenté sur les figures suivantes.

La figure 9 illustre l'intégration dynamique d'une UMD-RP pilotant une ressource de production disponible à partir de la date 200 (mach4).

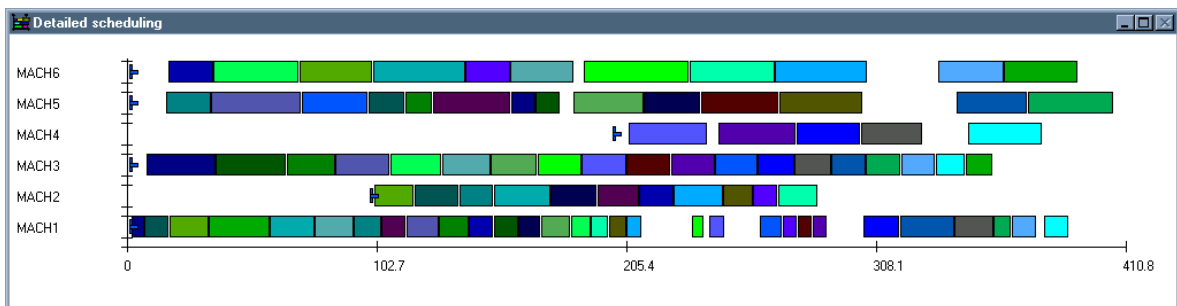


Figure 9. Prise en compte dynamique de la disponibilité d'une ressource.

La figure 10 illustre le fonctionnement robuste de l'ensemble suite à une panne sur deux ressources (mach1 et mach4) en début et en milieu de la simulation.

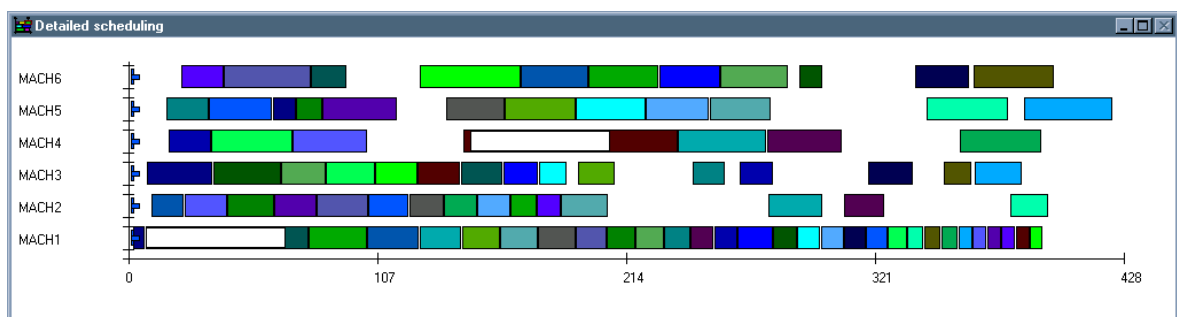


Figure 10. Mise en évidence d'une robustesse face aux dysfonctionnements.

Enfin, la figure 11 présente un exemple d'intégration dynamique d'ordres de fabrication (un ordre de fabrication a été inséré à la date 200).

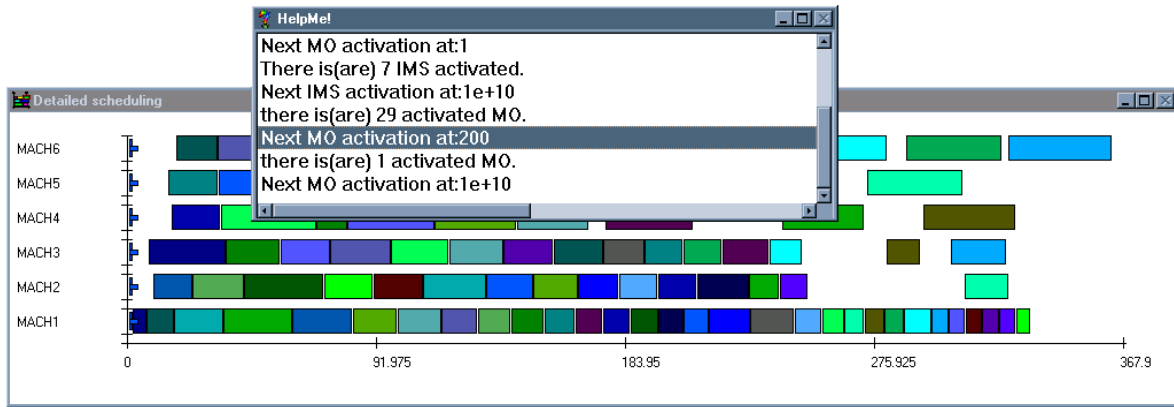


Figure 11. Prise en compte dynamique d'occurrence d'ordres de fabrication.

Deux autres validations ont été effectuées dans des cadres plus industriels :

- atelier de finition d'une fonderie [Trentesaux, 1996], [Trentesaux et al., 1998a],
- atelier AIP de Valenciennes [Berger et al., 2001].

Les validations aboutissent à des résultats similaires. L'atelier de finition constitue un cadre applicatif particulièrement intéressant. Il comporte 20 ressources de production partiellement redondantes ; un sous-traitant intervient pour les opérations spéciales et certains traitements thermiques. Les ordres de fabrication sont élaborés à partir de gammes de fabrication comportant en moyenne 12 opérations. L'étude a porté sur 30 ordres de fabrication. L'originalité (et toute la difficulté) de ce cadre applicatif réside dans la dynamique forte du processus de production: définition en ligne d'opérations (répétitions d'opération suite à un contrôle qualité négatif, compléments de spécifications clients, etc.), définition dynamique des tailles de lots (scission, regroupement) et définition dynamique des priorités des ordres de fabrication en cours (négociation avec les clients). Les résultats obtenus ont montré que notre approche supporte l'ensemble de ces spécificités tout en maintenant une performance globale (production juste-à-temps) satisfaisante comparée à l'existant [Trentesaux et al., 1998a].

D'autres résultats intéressants ont également été mis en évidence. En particulier, la capacité de notre modèle à supporter un niveau très fin de granularité des modèles de simulation des ressources de production ou des contraintes de production (temps de chargement/déchargement, temps de transport, gestion des outillages, des capacités de stockage, des gammes alternatives ou dynamiques, des disponibilités des opérateurs, etc.).

I.2.3.2 Caractérisation de l'impact des paramètres

Concernant la caractérisation de l'impact des paramètres d'exploitation, un prototype de validation a été développé. Le tableau 2 indique les différents types d'indicateurs globaux de performance qui ont été implémentés.

Type d'indicateur	Nom indicateur	unité	Type d'agrégation possible des données relatives à cet indicateur
Indicateurs sur les ressources	Charge	En nombre d'opérations ordonnancées, en temps	Somme, moy, min, max, écart type sur les charges des ressources
	Coût	Monétaire	Somme
	Taux d'occupation	Sans unité (pourcentage)	Somme, moy, min, max, écart type sur les taux d'occupation des ressources
Indicateur sur les ordres de fabrication	Retard/avance	En nombre d'ordres de fabrication, en temps	Somme, moy, min, max, écart type sur les retards/avances des OF
	Temps de réalisation	En temps	Somme, moy, min, max, écart type sur les temps de réalisation des OF
	Ratio de latence	Sans unité (pourcentage)	Somme, moy, min, max, écart type sur les ratio de latence des OF

Tableau 2. Types d'indicateurs implémentés.

La validation de cette caractérisation a été réalisée à partir de l'atelier de finition décrit auparavant. Etant donné l'objectif de production juste à temps, nous avons utilisé 10 indicateurs à minimiser (type : retard, fin de

réalisation, taux d'occupation et charge). L'évaluation a porté sur les ordonnancements obtenus suite à la simulation du processus complet de pilotage.

Sur les 288 ordonnancements obtenus, seuls 14 ordonnancements ne sont pas Pareto-dominés⁴, soit 5%. Un exemple d'ordonnement dominé est celui pour lequel les UMD-RP cherchent à réaliser systématiquement les opérations sur la même ressource. Le tableau 3 présente ces 14 ordonnancements ainsi que leurs évaluations pour l'ensemble des indicateurs choisis. Pour chaque ordonnancement, les paramètres d'exploitation considérés (règles de décision) sont donnés.

Simul.	catégorie d'indicateur:	Production/Ordres de fabrication				Production/Ressources de production					
	nom indicateur:	Retard/Avance			Réalisation	Taux d'occupation			Charge		
	numéro indicateur:	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	règle d'agrégation:	Maximum temporelle	Maximum nombre	Moyenne temporelle	Maximum temporelle	Ecart type temporelle			Ecart type temporelle		
	unité:	min	min	min	min	min			min		
monotonie:	min	min	min	min	min			min			
type d'objet de l'indicateur:	Ofs en retard	Ofs en retard	Ofs en retard	Ofs tous	DMU-RP 5,6&7	DMU-RP 9,10&11	DMU-RP 18,19&20	DMU-RP 5,6&7	DMU-RP 9,10&11	DMU-RP 18,19&20	
sous-ensemble des objets:	en retard	en retard	en retard	tous	DMU-RP 5,6&7	DMU-RP 9,10&11	DMU-RP 18,19&20	DMU-RP 5,6&7	DMU-RP 9,10&11	DMU-RP 18,19&20	
Règles de décision											
décision1/décision2/décision3:											
S1	5(min)/9(max)/9(max)	1272	25	503,5	1953	0,0144	0,152	0,054	3,79	6,1	34,1
S2	5(min)/10(max)/12(min)	1392	26	726,8	1852	0,01012	0,142	0,035	1,43	4,72	24,2
S3	1(min)/9(max)/9(min)	1450	26	507	2130	0,01077	0,155	0,115	4,07	2,46	168,85
S4	5(min)/11(max)/9(min)	1279	24	538,2	1819	0,0215	0,169	0,079	2,34	5,76	22,36
S5	5(min)/9(min)/9(min)	1182	22	435	1794	0,0124	0,152	0,034	0,94	5,32	11,87
S6	6(min)/9(max)/9(min)	1651	26	770	2595	0,125	0,044	0,177	53,6	19,07	178,29
S7	5(min)/9(min)/9(max)	1138	22	414,2	1849	0,0315	0,11	0,042	8,88	2,05	42,76
S8	6(min)/9(min)/9(max)	2478	25	924,3	3578	0,026	0,037	0,358	12,18	41,89	537,44
S9	5(min)/9(max)/9(min)	1285	25	499,9	1965	0,0238	0,149	0,032	3,52	5,33	16,8
S10	5(min)/13(min)/13(min)	618	28	442,6	1807	0,004	0,188	0,055	0,95	5,22	49,08
S11	5(min)/10(max)/13(min)	1565	29	880	2043	0,014	0,1203	0,0118	4,19	4,41	10,75
S12	5(min)/10(min)/13(min)	846	26	367,2	1937	0,0227	0,166	0,053	4,34	4,67	35,65
S13	5(min)/9(max)/13(min)	1074	29	589,2	1889	0,007	0,162	0,012	1,49	4,97	13,3
S14	6(min)/13(min)/13(min)	1045	30	653	2185	0,072	0,075	0,077	13,91	76,64	31,12

Tableau 3. Matrice d'évaluation (en ligne : les ordonnancements candidats, en ordonnées, leurs évaluations).

Le décideur établit alors les comparaisons entre les paires de critères (indicateurs), puis le degré d'appartenance de chaque critère à chaque sous-ensemble flou des critères est calculé. Dans un cadre de production juste à temps, nous supposons que l'ordre de préférence adopté par le décideur est le suivant : {C1, C2, C3} >> {C8, C9, C10} >> {C5, C6, C7} >> {C4}, « >> » signifiant « plus important que ».

L'algorithme de sélection multicritère établit une comparaison floue entre les 14 solutions admissibles. Ces comparaisons sont données tableau 4 (M signifie « meilleur que », E « équivalent à » et m « moins bon que »).

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
S1	E	M	M	m	m	M	m	M	m	m	M	m	M	M
S2		E	m	m	m	M	m	M	m	m	M	m	m	M
S3			E	m	m	M	m	M	m	m	M	m	M	M
S4				E	m	M	m	M	m	m	M	m	M	M
S5					E	M	m	M	M	M	M	M	M	M
S6						E	m	M	m	m	m	m	m	m
S7							E	M	M	M	M	M	M	M
S8								E	m	m	m	m	m	m
S9									E	m	M	m	M	M
S10										E	M	m	M	M
S11											E	m	m	m
S12												E	M	M
S13													E	M
S14														E

Tableau 4. Comparaisons relatives des 14 ordonnancements non Pareto-dominés.

⁴ c'est-à-dire que pour chacun de ces 14 ordonnancements, il n'existe pas un autre ordonnancement qui soit meilleur que les autres sur l'ensemble des indicateurs.

L'algorithme de sélection propose la solution S7. La solution S5 est également une solution intéressante. Dans ce cas d'étude, le décideur constate ainsi que la combinaison des règles 5(min)/9(min)/9(max) et éventuellement de 5(min)/9(min)/9(min) réalise le meilleur compromis dans un objectif de production juste à temps.

1.3 Thème 3 : pilotage décentralisé de l'activité de conception de produits complexes

1.3.1 Objectif et problématique

C'est durant la phase de conception d'un produit complexe, qu'est engagée la majeure partie des coûts couvrant la totalité du cycle de vie du produit et une attention particulière doit être apportée à cette phase. Or, les problèmes à résoudre sont nombreux et complexes. Ils peuvent être caractérisés selon deux problématiques relatives:

- au cycle de vie du produit: difficulté à maîtriser l'impact des décisions sur les phases en aval dans un environnement incertain et fortement variable (évolution du système de production, de la concurrence, du cadre législatif, etc.) [Brazier et al., 2001],
- au contexte multi-acteurs et multi-objectifs: difficulté à supporter les interactions entre les différents acteurs relevant de l'organisation interne l'entreprise (représentants les métiers en jeu) et des entreprises externes (clients, sous traitants, etc.) et la diversité de leurs objectifs [Lottaz et al., 2000], [Shen et Barthès, 1994], [Shen et al., 1997].

Notre approche a consisté à appréhender le pilotage de l'activité de conception d'un produit complexe selon un point de vue du pilotage décentralisé par EDP.

Nos travaux sur ce thème ont fait l'objet d'une thèse [Delsaut-Furon, 2000]. Un des résultats de la thèse est un modèle partiel de système de pilotage décentralisé de la conception de produit complexe, le modèle de produit intégrant le soutien logistique du produit dans le cadre d'une conception concurrente [Delsaut-Furon et al., 1999a], [Delsaut-Furon et al., 1999b], [Delsaut-Furon et al., 2000].

1.3.2 Contribution

Le modèle produit proposé s'articule autour du modèle de produit et du méta-modèle d'élaboration des concepts développés au sein de l'équipe LAMIH/SP sous la direction de R. Soënen [Jacquet, 1998], [Grudzien, 1999]. Ce modèle est conçu afin de supporter la complexité du produit (soutien logistique, diversité des domaines technologiques, etc.). Il ne sera pas décrit plus en détail dans ce document.

Etant donné les organisations existant généralement au sein des services de développement des entreprises, le modèle de système de pilotage proposé est de type $C = \langle \text{DEC}, \text{II}, \text{O} \rangle, \langle \text{EDP}, \text{E}, \text{Ra} \rangle$. Ce modèle met en jeu des entités de pilotage désignées par UMD-PCP (« Unité de Management Décentralisé du Processus de Conception d'un Produit ») [Trentesaux et al., 2000b].

L'originalité de ce modèle réside dans la modélisation des processus de pilotage décisionnels : pour chaque tâche de conception identifiée, il est possible de mettre en évidence les différents processus décisionnels nécessaires et les UMD qui vont mettre en oeuvre ces processus. Ces processus décisionnels sont représentés sous la forme de boucles de pilotage « furtives » où ils n'apparaissent que durant un laps de temps défini lors de la conception, contrairement aux processus de pilotage statiques existant au niveau de l'agencement du système de pilotage. Par conséquent, les boucles de pilotage furtives doivent être considérées comme des instances spécifiques, au cours du temps, des boucles de pilotage statiques. La modélisation de ces processus consiste alors à choisir les démarches de résolutions (automatique, aide à la décision) et les méthode(s) de gestion des décisions et des informations sous-jacentes (optimisation, heuristiques, règles, etc.) [Trentesaux et al., 2001c].

1.3.3 Résultats et validation

La validation a été menée dans un cadre général de conception de matériel ferroviaire (société Alstom). L'application a porté plus précisément sur la conception d'une partie du système de freinage à commande électropneumatique.

Le tableau 5 décrit les processus de pilotage décisionnels identifiés et mis en oeuvre par les différentes UMD-PCP et ce, pour chaque grande étape de la conception du produit. La Figure 12 détaille le système de pilotage

proposé. Afin de s'adapter à l'organisation d'Alstom, 4 niveaux hiérarchiques décisionnels ont été définis, des mécanismes coopératifs existant au sein de chaque niveau. Un groupe de validation a été mis en place. Il comporte : le chef de projet, un représentant de la production (typiquement, le responsable qualité) et un de l'exploitation (typiquement, le client) qui ont pouvoir de décision, des groupes de travail (GT) constitués par les ingénieurs et techniciens impliqués dans la conception. Chacun de ces groupes est sous le contrôle d'un responsable qui a également pouvoir de décision.

Processus de pilotage décisionnel PXY : processus X décomposé en Y (récuratif)	Etape de conception produit / Activité	UMD-PCP
P1 : Définition des responsables	Cadrage	Groupe de validation
P2 : Définition des GT	Cadrage	Responsables
P3 : analyse du cahier des charges	Cadrage	Tous
P31 : valider l'Analyse fonctionnelle globale	Cadrage/validation	Groupe de validation
P32 : valider l'analyse fonctionnelle par fonction	Cadrage/analyse fct.	Concepteurs + responsables
P4 : analyse du rex et recommandations de conception	Cadrage	Tous
P41 : validation du Rex globale	Cadrage/validation	Groupe de validation
P42 : analyse du rex par fonction	Cadrage/analyse rex et recommandations	Concepteurs + responsables
P5 : <u>planning et organigramme par fonction</u>	Cadrage/Lancement	Concepteurs
P6 : validation et planning global	Cadrage/Lancement	Concepteurs + responsables
P7 : validations locales aux GT des choix de conception	Conception	Responsables
P8 : Conception produit	Conception	Concepteurs
P8i : Conception au niveau i du modèle, <i>i</i> ∈ [2..4]	Conception	Concepteurs
P9 : validations globales de la conception détaillée	Conclusion	Groupe de validation

Tableau 5. Détail des processus décisionnels récuratifs.

Le groupe de validation identifie les responsables de GT et pilote l'ensemble des GT. Il fournit les données et contraintes (cahier des charges, etc.) l'ensemble des responsables de GT et suit l'évolution du système jusqu'à la conception détaillée du produit. Chaque responsable organise les membres de son équipe et identifie les moyens de fonctionnement (outils, etc.). Il pilote son groupe en affectant les tâches aux concepteurs et en coopérant avec les autres responsables (échange d'information, négociation, etc.). Chaque concepteur exploite ses propres outils (système d'information, CAO, autres logiciels, planches, etc.) qui composent le système opérant ultime afin de concevoir le produit. De manière récursive, les concepteurs et leurs outils, composant un GT, sont considérés comme le système opérant du responsable du GT. Cet ensemble, est lui-même alors considéré comme le système opérant du groupe de validation.

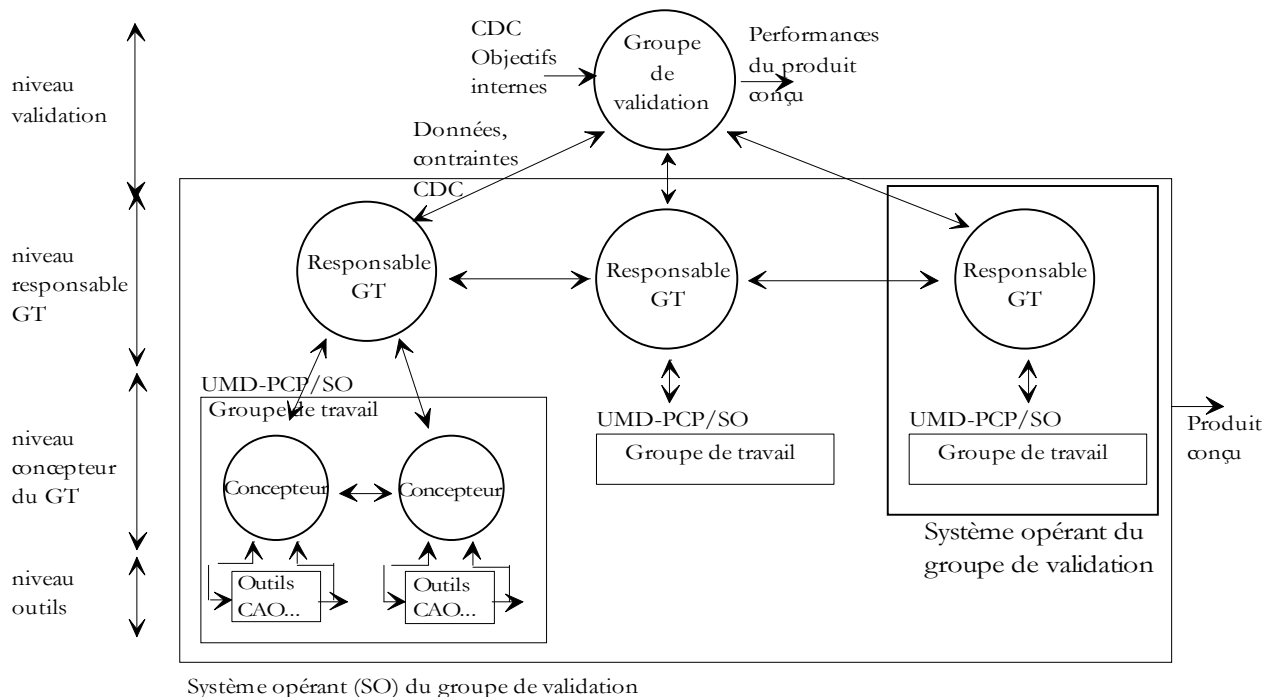


Figure 12. Agencement du système décentralisé et description des différentes UMD-PCP.

A titre illustratif, le processus de pilotage décisionnel P82 (cf. tableau 5) peut être spécifié complètement figure 13 (description de l'environnement de pilotage).

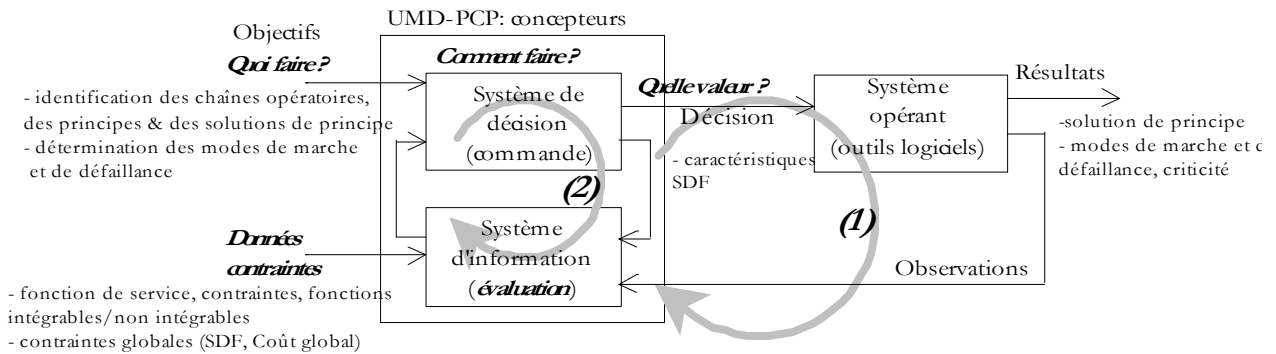


Figure 13. Processus décisionnel P82 (boucle de pilotage furtive).

Ce schéma fait apparaître deux boucles de pilotage : le pilotage de l'activité du système opérant (1) et le pilotage du système d'information (2). Il permet de mettre en évidence :

- la chronologie des activités, non explicitée dans le méta-modèle initial [Grudzien, 1999]. Le modèle de pilotage doit permettre de faire ressortir l'enchaînement des différentes étapes, les validations et les interactions entre ces étapes,
- les rôles respectifs du système opérant et du système de pilotage dans le cas de la conception. L'équipe de pilotage de la conception (système de décision) est assistée par le système d'information lui permettant de capitaliser les informations, de les gérer, de les comparer...

L'exploitation de ce système de pilotage conduit alors à la construction du modèle produit.

La validation se situe encore à un niveau essentiellement théorique. Toutefois, les premiers résultats mettent en évidence l'intérêt de notre approche en terme de gains financiers au niveau de l'architecture du produit conçu et du schéma organisationnel mettant en œuvre l'ensemble des acteurs intervenants en conception. L'intégration d'un cadre décisionnel structuré pour la conception permet de mieux maîtriser l'impact potentiel des décisions sur les coûts et les performances des produits et de capitaliser l'expérience en fonction de ces impacts.

Un projet de brevet est actuellement à l'étude par la société.

1.4 Thème 4 : pilotage décentralisé des opérations de maintenance de systèmes complexes

1.4.1 Objectif et problématique

La thèse de Yann Le Quéré, en collaboration avec l'EIMM (Etablissement Industriel de Maintenance du Matériel TGV) d'Hellemmes traite du problème de la planification et du pilotage décentralisé de la maintenance de systèmes complexes, en particulier, les rames TGV [Le Quéré et al., 2001]. L'originalité du problème posé réside en partie dans la complexité des produits traités (rames de TGV) et dans la forte dynamique intrinsèque des opérations de maintenance. Le constat effectué à l'EIMM est celui d'un accroissement régulier du nombre de rames livrées en retard. Le diagnostic réalisé sur le site met en évidence que l'EIMM doit faire face:

- à un accroissement régulier du nombre de rames à traiter pour un temps de cycle (durée d'immobilisation des véhicules) sans cesse en réduction,
- à un accroissement de la complexité des produits considérés (évolutions technologiques) et de leurs diversités (différenciation des rames), réduisant la possibilité d'apprentissage et l'élaboration de comportements de références. A titre illustratif, plus de 5000 tâches sont identifiées pour une opération mi-vie d'un TGV.
- à une méconnaissance a priori des opérations à effectuer (il faut démonter les rames avant tout diagnostic), ce qui limite la capacité de planification,

- à une absence de rationalisation des flux d'informations et de décision, entraînant l'apparition de conflits ou de retards dans la réaction à ces conflits et aux dysfonctionnements, et ce d'autant plus que de nombreux corps de métier interviennent.

En outre, un problème très spécifique à la SNCF existe dans la mesure où il est très difficile d'adapter, notamment pour des raisons réglementaires, les capacités en ressources humaines à la charge de travail (en terme d'embauche, de licenciement, de recours à l'intérim, d'heures supplémentaires). Par conséquent, un lissage des charges des personnels doit être opéré afin d'anticiper toute surcharge ou sous charge de travail, ce qui peut conduire à des retards de livraison (surcharge) ou à des problèmes de motivation (sous charge).

L'objectif est de faire évoluer le pilotage des ateliers réduit actuellement à une activité de planification fortement figée vers un système de pilotage plus réactif et adaptatif. L'approche par planification qui prévalait dans un contexte relativement stable et où la capacité permettait d'absorber les retards, ne convient plus. Le contexte actuel, caractérisé par un besoin accru en réactivité (réduction des délais, production juste à temps), en maîtrise des coûts et par un besoin de fonctionnement plus proche du juste à temps, implique de s'adapter à l'évolution de plus en plus rapide du produit et des opérations.

Une analyse de l'existant a été réalisée [Le Quéré, 2000]. L'organisation actuelle du système de pilotage de l'EIMM est schématisée figure 14.

85% des aléas sont identifiés et gérés directement par les DU. 15% sont traités par les CU-A et le coordinateur de production. Celui-ci a pour responsabilité, au cours de réunions hebdomadaires, de modifier les plannings des chefs d'unités adjoints en collaborant avec ces derniers. L'analyse a montré que les retards peuvent être imputés en grande partie à ce type d'aléa.

Cette organisation, bien qu'a priori de classe II, est relativement proche dans son fonctionnement d'une organisation de classe I (l'autonomie des différents centres de décision est très réduite) de type C = (<DEC, I, O>, <EDP, E, Ra>). Les interactions directes entre les décideurs d'un même niveau (CU-A et DU) sont inexistantes.

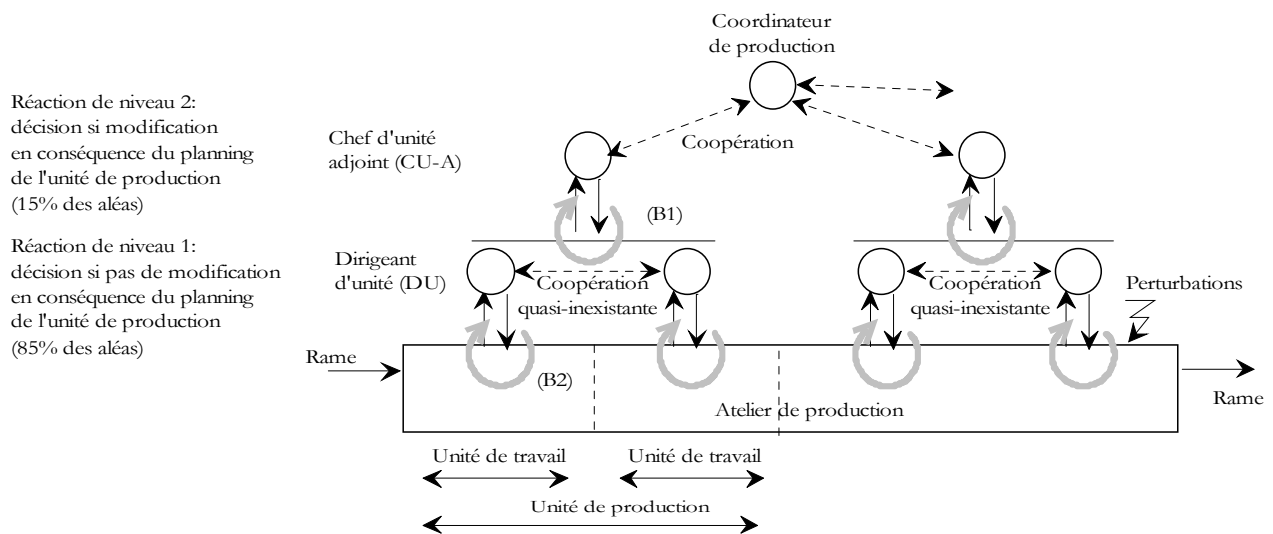


Figure 14. Agencement actuel du système de pilotage de l'EIMM.

1.4.2 Contribution

L'action proposée porte sur les aléas provoquant des retards. Nous avons proposé, compte-tenu des problématiques présentées précédemment, un système de pilotage décentralisé organisé de classe II. L'approche adoptée consiste ainsi à améliorer la capacité d'information, de décision et de coopération des dirigeants d'unités pour réduire notamment les temps de réaction et améliorer la qualité des décisions.

La proposition se développe suivant deux axes :

- Premier axe : définition et mise en œuvre d'un processus d'ordonnancement robuste dans le sens où il doit garantir un impact minimisé en terme de décalage de tâches suite à l'apparition d'aléas types recensés dans les ateliers,
- Second axe : définition et mise en œuvre d'un système d'information : constituant un support à la décision décentralisée et réactive. Ce système améliorera la qualité des informations échangées (quantité, fiabilité, obsolescence, etc.) et intégrera le processus d'ordonnancement proposé.

Concernant le premier axe, le processus d'ordonnancement robuste consiste à placer les tâches au plus tôt puis à répartir la marge libre disponible en considérant en priorité les tâches les plus critiques en termes de risque d'occurrence d'aléa : fréquence, criticité. La distribution de la marge libre est effectuée de manière à maximiser le nombre de tâches disposant d'une marge libre [Le Quéré et al., 2001], [Le Quéré et al., 2002].

Concernant le second axe, le principe retenu est basé sur les deux niveaux de boucles de pilotage décentralisé (figure 14). Ce système est de type (<DEC, II, O>, <EDP, E, Ra>). Les deux boucles sont, cf. figure 14 :

- La boucle de pilotage (B1) s'appuie sur un planning agrégé composé de macro-tâches, liées aux spécificités des unités de production. Ce planning détermine le niveau d'autonomie décisionnelle de chaque DU.
- la boucle (B2) locale aux unités. Chaque DU établit alors un ordonnancement détaillé robuste de l'activité et des ressources de son unité. Un modèle de contraintes lui permet de mettre en relation sa marge de manœuvre (autonomie décisionnelle) avec les décisions possibles en cas d'aléa. Chaque DU peut également coopérer avec un autre DU afin d'équilibrer ou de répartir les capacités pour les adapter aux charges ou pour absorber un aléa.

1.4.3 Résultats et validation

Concernant le premier axe, la figure 15a illustre, sur des cas théoriques inspirés de la situation réelle de l'PEIMM, l'évolution du temps de réalisation d'un ordonnancement élaboré à l'aide de la méthode proposée (ordonnancement robuste) et de l'ordonnancement optimum obtenu avec la programmation linéaire pour un nombre croissant d'opérations à ordonnancer. Deux aléas typiques de l'atelier (en termes de durée) ont été introduits (par exemple, suite à la mise en évidence d'une corrosion importante d'un dessous de caisse). La figure 15b illustre l'impact de ces deux aléas de production sur le nombre de tâches affectées par ces impacts, toujours en comparaison avec les résultats obtenus avec le même ordonnancement optimum.

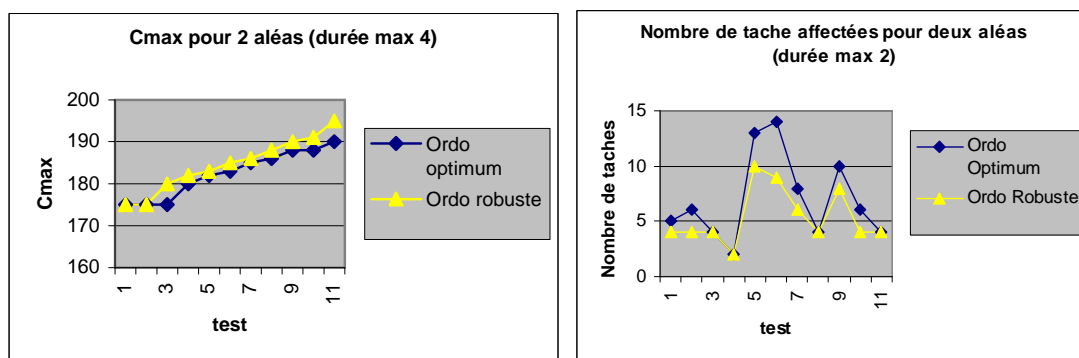


Figure 15a et 15b. Comparaison des temps de réalisation (Cmax) et du nombre de tâches affectées pour deux aléas (ordonnancement robuste et ordonnancement optimum).

Les premiers résultats obtenus ont tendance à montrer que la méthode d'ordonnancement proposée conduit à un ordonnancement plus robuste que l'ordonnancement optimum et reste toutefois performant en terme de temps de réalisation.

Un second ensemble de tests ont été effectués avec un jeu d'essais plus complet comprenant 8 remorques d'une rame TGV. La durée totale obtenue est de 26,5 jours, à laquelle il faut ajouter deux jours de découplage et de ré-accouplement de la rame et 8 jours d'essais. On obtient ainsi un total de 39,5 jours. Aujourd'hui, 50 jours sont nécessaires pour une rame de 8 remorques [Le Quéré et al., 2001], [Le Quéré et al., 2002].

Concernant le second axe, l'organisation du futur système de pilotage décentralisé a été validée par l'EIMM. Le système d'information qui servira de support aux processus de pilotage décentralisé est en cours de développement. A terme, ce système d'information intégrera le processus d'ordonnancement. Actuellement, le module de gestion graphique et de propagation des contraintes d'emplacement a été validé par la SNCF. Ce module permet (cf. figure 16) :

- d'assurer la vérification des contraintes d'emplacements et de modifier les dates de début et de fin de tâches en propageant ces contraintes,
- d'analyser l'impact d'un aléa sur l'ordonnancement et les solutions alternatives en réponse à cet aléa (recours aux heures supplémentaires, modification des engagements en personnel, etc.),
- de modifier automatiquement l'ordonnancement : on déplace en premier lieu les tâches qui ne scinderont pas un créneau "métier" en deux, puis en second lieu les déplacements qui minimisent le nombre de contraintes violées,

Les fonctionnalités en cours de développement sont les suivantes :

- intégration du processus d'ordonnancement,
- définition d'indicateurs de performances : nombre de jours perdus, nombre total de jours ouvrés, coût de production, etc.
- simulation d'ordonnancement a priori (scenarii de type « what-if ? ») ou de reprise au sein d'une même unité de production suite à un aléa,
- définition d'un processus de négociation entre CU-A dans un cadre de collaboration hétérarchique, notamment suite à l'apparition d'un aléa non absorbable par une seule unité de production ou pour établir les ordonnancements à plus long terme en concertation.

A terme, cette application sera partagée entre les différents CU-A.

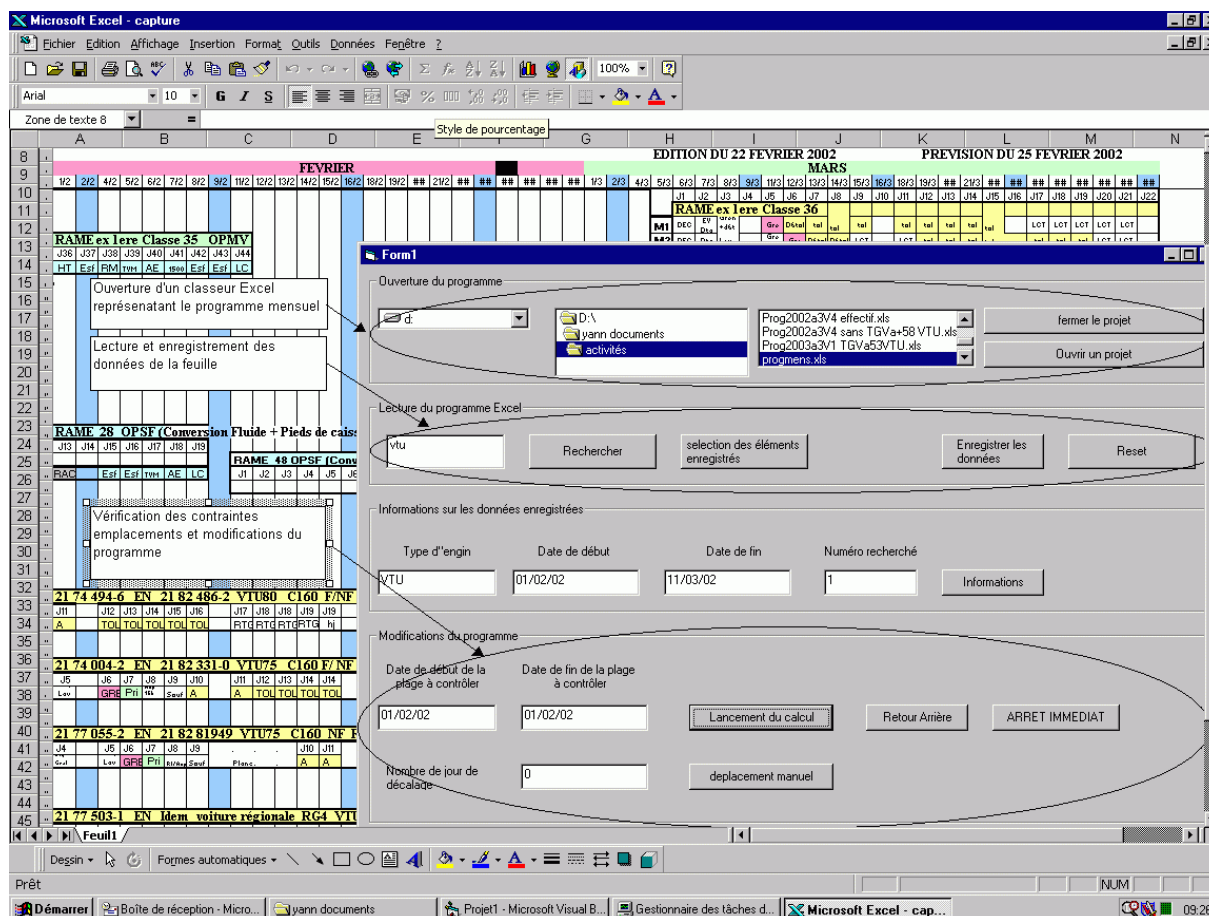


Figure 16. Interface du système d'information développé à l'EIMM.

II Axe 2 : modèles adaptatifs de pilotage

Les mécanismes d'adaptation concernent les décisions prises par les EDP. Dans la partie précédente, ces décisions sont prises de manière statique, c'est-à-dire que leur condition d'occurrence et leurs paramétrages sont déterminés et invariants. Dans cette partie, nous décrivons l'adaptation dynamique des paramètres de décisions.

Les approches proposées dans cette partie s'appuient sur un modèle de processus de pilotage décisionnel où les décisions sont déclenchées, prises, évaluées et adaptées en fonction de simulations comportementales du système opérant. Ces simulations exploitent un modèle de ce système dont les paramètres sont identifiés en temps réel.

Cette connaissance sur le système opérant permet ainsi d'élaborer des stratégies d'adaptation. Le modèle de processus de pilotage décisionnel que nous avons utilisé a été décrit dans [Tahon et Trentesaux, 2001]. La figure 17 présente un modèle général sous la forme d'un réseau de Petri.

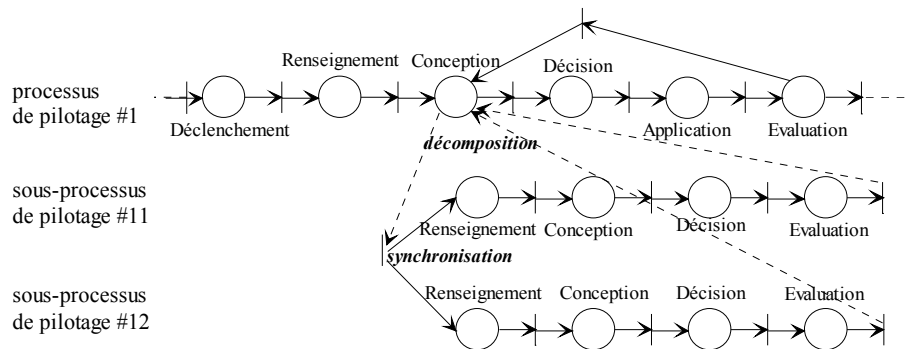


Figure 17. Un modèle de processus de pilotage décisionnel.

Les différentes activités sont les suivantes :

- L'activité de déclenchement consiste à activer un processus décisionnel. Elle est composée de quatre étapes (acquisition, typage, classification des événements et activation du processus décisionnel) [Pesin et al., 1998a].
- L'activité de renseignement consiste à rechercher l'ensemble des informations qui seront utiles lors des phases de conception, décision et évaluation.
- L'activité de conception consiste à élaborer l'ensemble des alternatives possibles et l'évaluation a priori de leur impact potentiel sur les performances du système opérant.
- L'activité de décision a été décrite en détail dans le chapitre I.
- L'activité d'application consiste à transformer une décision prise en action à mener au niveau du système opérant sous la forme d'une commande.
- Enfin, l'activité d'évaluation consiste à évaluer a posteriori l'application d'une décision. Cette évaluation a posteriori permet de valider ou non les hypothèses posées lors des évaluations a priori réalisées en phase de conception. Elle permet éventuellement d'enrichir la connaissance du comportement du système opérant par rapport à la décision prise pour améliorer, lors des processus de pilotage décisionnels ultérieurs, une nouvelle évaluation a priori.

Cet axe de recherche sur les mécanismes d'adaptation résulte des travaux menés dans le cadre du pilotage des lignes de conditionnement. En effet, les modèles de pilotage proposés n'ont pas permis de réduire suffisamment certains phénomènes (de pompage notamment). Ceci est principalement dû à :

- l'absence de l'évaluation a priori des solutions possibles concernant les variables de commande. Un pré-requis est de pouvoir disposer d'un modèle comportemental fin du système opérant afin de simuler ces solutions et d'identifier en temps réel les meilleurs paramètres de décision pour une situation donnée. Dans le domaine des lignes de conditionnement, la présence de retards importants (dus aux phénomènes d'accumulation) et la vision locale (problème de myopie) d'une SIP dans l'espace (optimisation de variables locales) et dans le temps (optimisation à court terme), ne permettent pas d'anticiper suffisamment les événements. Un premier niveau d'adaptation est alors

envisagé en identifiant des modes de fonctionnement (classes) et en adaptant, pour chaque classe, les paramètres de la méthode de décision adoptée (contrainte, pondération, etc.).

- l'absence de l'évaluation a posteriori des décisions concernant la mise en relation entre les variables de commande et d'état du système opérant. Cette évaluation permet de mettre en œuvre des mécanismes de mémorisation et d'apprentissage. Un second niveau d'adaptation est alors envisagé en validant, après mise en œuvre, les choix d'adaptation et le cas échéant, les modifier.

A partir de ce constat, nous avons cherché à travailler à la définition d'un modèle d'EDP adaptatif définissant un système de pilotage de type $\langle \text{DEC}, \text{III}, \text{O} \rangle$, $\langle \text{EDP}, \text{Rc}, \text{A} \rangle$. Nos travaux ont porté sur le problème d'évaluation a priori (premier niveau d'adaptation). Nous aborderons le second niveau d'adaptation (par apprentissage) dans la partie perspective de ce document.

Deux thèmes ont été développés :

- Thème 1 : l'adaptation dynamique des pondérations des critères de décision (en fonction des situations constatées et des comportements extrapolés) dans le cadre d'une approche de décision multicritère.
- Thème 2 : l'adaptation dynamique des contraintes par stratégie de gestion de contrainte (en fonction des situations constatées et des comportements extrapolés) dans le cadre d'une approche de décision par contrainte.

Nous décrivons ces deux thèmes.

II.1 Thème 1 : adaptation dynamique des pondérations

Les travaux menés en collaboration avec le laboratoire Leibniz de l'IMAG de Grenoble (équipe d'Hervé Raynaud) relèvent de cette thématique. Ils ont directement contribué à la thèse de Sylvain Durand [Durand, 2000].

II.1.1 Objectif et problématique

Un avantage de l'approche multicritère est le regard qu'elle permet de porter sur le mécanisme de prise de décision, sur le fait qu'il existe d'autres alternatives pour prendre une décision que de se baser sur une « classique » fonction d'utilité additive.

L'inconvénient est que la diversité des méthodes proposée requiert une analyse axiomatique fine de ces méthodes. Dans le cadre de nos travaux, une propriété importante requise est celle de la robustesse des pondérations des critères. En effet, les pondérations sont les principaux paramètres d'une méthode de décision (lorsque la méthode se base effectivement sur un ensemble de pondérations). Malheureusement, dans le cas des systèmes de production, l'impact des paramètres de décision est souvent difficile à cerner et une approche de décision multicritère fortement sensible aux pondérations peut aboutir à des résultats non conformes aux objectifs de production. C'est pourquoi, préalablement à la mise en œuvre d'un mécanisme adaptatif de premier niveau à base de décision multicritère, nous avons procédé à une analyse de robustesse des méthodes multicritères fondamentales par rapport aux pondérations.

II.1.2 Contribution

II.1.2.1 Axiomatisation de la décision

L'annexe 5 justifie, au travers de l'analyse d'un exemple simple, l'importance d'une caractérisation axiomatique de la décision et propose, pour un certain nombre de méthodes, une telle caractérisation.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à l'analyse de la robustesse par rapport aux pondérations des critères de méthodes de décision de type choix. Il s'agit tout d'abord de fournir au décideur une mesure de la robustesse locale relative à une méthode et un profil donné (indicateur de robustesse).

Nous avons choisi de comparer la fonction de choix de Borda (qui constitue la base de toute méthode d'optimisation par fonction d'utilité à base d'agrégation ordinale) et la fonction de choix du Maximin (règle prudente, agrégation ordinale, cf. annexe 5).

Concernant la méthode de Borda, pour définir un indice de robustesse locale, nous utilisons le rayon $r_B(W)$ de la plus grande boule pour la distance L_1 ($d(x, y) = \sum |x_i - y_i|$) centrée en W telle que tous les points de cette boule ont le même ensemble de choix de Borda que W . Cet indicateur est cohérent dans la mesure où les ensembles S_i , qui correspondent à l'espace des poids où l'alternative i est sélectionnée sont convexes. La figure 18 illustre ce point (les abscisse et ordonnée sont exprimées en dixième de poids, chacun variant de 1 à 4).

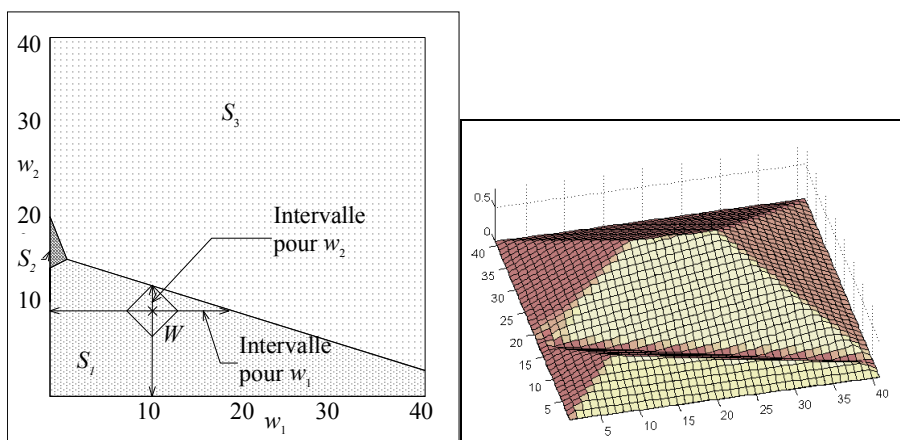


Figure 18. Espaces convexes des ensembles où une alternative est sélectionnée.

Pour la méthode maximin, les ensembles S_i ne sont malheureusement pas toujours convexes. L'indice de robustesse ne peut plus être calculé de manière aussi simple que pour la fonction de choix de Borda. Il existe des régions critiques qui nuisent à l'utilisation d'un indicateur de type « boule », cf. figure 19.

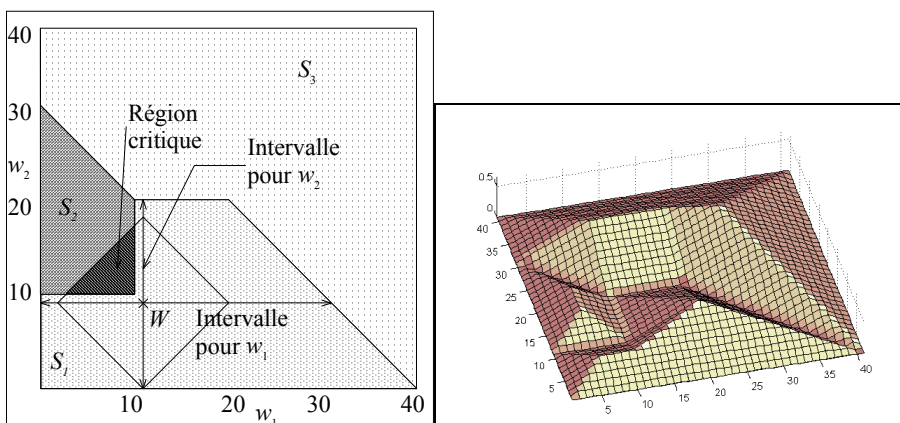


Figure 19. Espaces non convexes des ensembles où une alternative est sélectionnée (région critique).

Une approche algorithmique a alors été employée afin d'identifier une borne inférieure du rayon de robustesse à une erreur connue près.

Ces travaux ont fait l'objet de publication [Durand et Trentesaux, 1999], [Durand et Trentesaux, 2000a], [Durand et Trentesaux, 2000b] et ont été utilisés dans le cadre du pilotage adaptatif d'une partie d'une ligne de conditionnement (voir ci-après).

II.1.2.2 Méthode d'adaptation des pondérations

La méthode proposée se base sur le modèle d'EDP indiqué figure 20 (voir [Trentesaux et al., 2000b] pour une description détaillée des concepts spécifiques à ce modèle). L'EDP globale est adaptative et récursive. Elle est constituée d'une EDP interne (EDP1) qui a pour fonction, à partir d'un modèle identifié en temps réel du système opérant, de réaliser plusieurs simulations afin de générer un ensemble de couples (variables de commande VC, résultats ou variable d'état VE). Ceci correspond à l'activité de conception d'un processus de pilotage décisionnel. Cette EDP évalue alors a priori la meilleure combinaison (VC, VE) et commande en conséquence le système opérant.

Une seconde EDP (EDP2) réalise l'adaptation qui consiste à faire évoluer les pondérations des critères pour favoriser soit la régulation soit la poursuite selon la zone de fonctionnement identifiée en fonction des objectifs.

Pour ce faire, une première caractérisation pour chaque méthode de décision doit avoir lieu pour déterminer des zones de pondérations dans lesquelles auront lieu les adaptations.

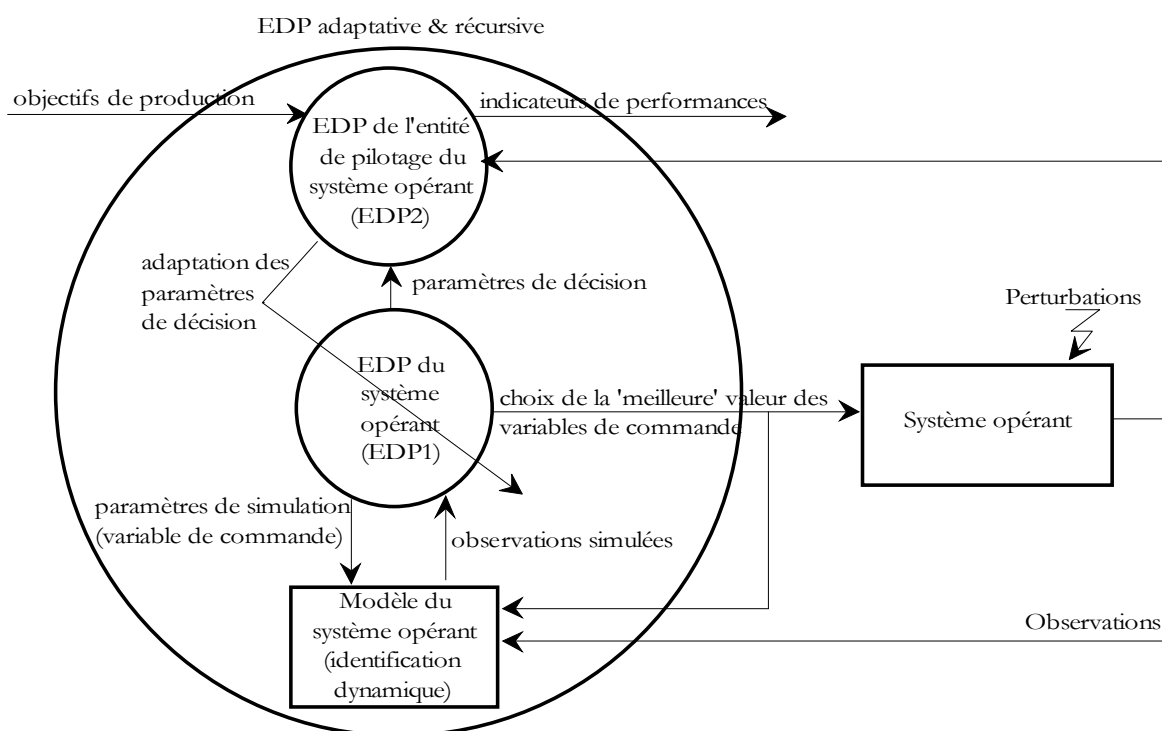


Figure 20. Agencement des EDP pour l'adaptation des pondérations.

II.1.3 Résultats et validation

II.1.3.1 Axiomatisation de la décision

Les résultats présentés ci-dessous concernent des tirages aléatoires de profils pour chaque couple (m, n) , avec $m \in \{10, 20, 30\}$ et $n \in \{10, 20, 30\}$; m désigne le nombre d'alternatives et n le nombre de critères. Un tirage aléatoire détermine les préférences de chaque critère parmi les $m!$ ordres stricts possibles. Nous faisons varier le poids de 2 critères ou de 5 critères entre 0 et 4. Les autres poids sont tirés au hasard uniformément entre 0 et 4 et gardés fixes pendant la simulation. Nous avons effectué 1000 tirages lorsque les poids de 2 critères varient et 500 tirages lorsque les poids de 5 critères varient. Pour l'indice de robustesse de la méthode maximin, la valeur du pas de discrétisation est fixée de manière à ce que l'erreur portant sur la précision soit inférieure à 0.01. Le Tableau 6 synthétise les résultats obtenus [Durand et Trentesaux, 2001].

Nb alternatives	Moyennes pour la méthode Borda		Moyennes pour la méthode maximin	
	2 poids variables	5 poids variables	2 poids variables	5 poids variables
10 critères				
10	0.25	0.14	0.26	0.14
20	0.21	0.12	0.26	0.14
30	0.17	0.10	0.23	0.13
20 critères				
10	0.28	0.15	0.28	0.15
20	0.24	0.14	0.27	0.15
30	0.20	0.11	0.26	0.14
30 critères				
10	0.29	0.15	0.28	0.15
20	0.25	0.13	0.28	0.14
30	0.20	0.11	0.26	0.13
Moyenne	0.232	0.127	0.264	0.140

Tableau 6. Indicateurs de robustesse des méthodes de Borda et maximin selon différents profils.

La conclusion de cette étude est que la méthode prudente (maximin) semble plus robuste que la méthode de Borda.

De manière plus générale, cette étude peut permettre à un décideur, dans une situation concrète de prise de décision, de connaître le degré de confiance (robustesse) qu'il peut accorder à la méthode pour un jeu de poids donné. Il nous semble en effet plus pertinent de fournir au décideur l'information « Vous êtes dans une situation où l'indicateur de robustesse est de 0.1 alors qu'il est de 0.2 en moyenne pour des instances de même taille » plutôt que de lui indiquer seulement qu'il est dans une situation où l'indicateur vaut 0.1. Le décideur possède ainsi une référence par rapport à laquelle il peut évaluer la robustesse de décisions prises avec différents paramètres.

II.1.3.2 Méthode d'adaptation des pondérations

La validation de la méthode d'adaptation des pondérations a été réalisée dans le cadre du pilotage décentralisé de ligne de conditionnement. Pour mener à cette validation, un modèle de convoyeur à accumulation à haute cadence a été proposé [Thomin et Trentesaux, 1999].

Cette validation a porté sur un tronçon final de la ligne. La figure suivante schématise le système après regroupement des convoyeurs de caractéristiques similaires selon la méthode développée dans le cadre du DEA de H. Maoudji (figure 21). Les capacités des convoyeurs relativement à la capacité maximale (convoyeur 2) et les vitesses relativement à la vitesse maximale (contrôle visuel) sont indiquées.

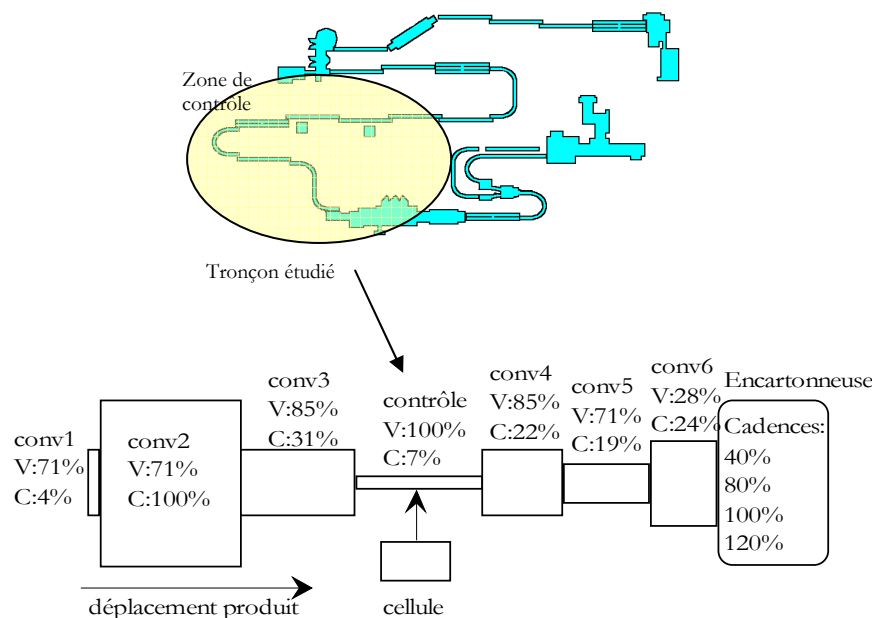


Figure 21. Synoptique du tronçon final.

Le contrôle de remplissage s'effectue sur un convoyeur par une cellule à rayonnement. La seule machine du tronçon étudié est l'encartonneuse qui forme des packs de 24 canettes en aluminium emballées sous film plastique. Sa cadence est discontinue et varie entre 40 et 120% de sa cadence nominale.

Les contraintes spécifiques de mode de marche et d'arrêt portent uniquement sur le contrôleur et l'encartonneuse. Elles sont les suivantes :

- sous peine d'arrêt complet de la chaîne (vidange), un produit ne doit jamais s'arrêter sous le rayonnement du contrôleur de niveau,
- l'encartonneuse fonctionne uniquement si le convoyeur 6 présente un niveau d'accumulation (la pression des produits doit être suffisante pour permettre l'insertion automatique des produits dans cette ressource).

Les objectifs de production sont la maximisation du flux de sortie et la régulation des convoyeurs 2 et 4 pour maintenir un taux de remplissage à 80% de ces convoyeurs. La régulation du convoyeur 2, convoyeur « poumon » (stockage), concerne le remplissage, la régulation du convoyeur 2 est destinée à éviter une accumulation des produits au niveau du contrôleur.

Les deux méthodes de décision multicritères candidates sont les suivantes :

- la méthode multicritère prudente (qui constitue une extension de la méthode maximin) caractérisée selon une approche ordinale d'agrégation des données,
- la méthode multicritère Prométhée (qui est une extension de la méthode de Borda) caractérisée selon une approche cardinale d'agrégation des données.

Les critères considérés sont le flux de sortie et le niveau de remplissage, à deux instants t et $t' > t$.

L'analyse quantitative des résultats a été réalisée dans trois cas de figure : la méthode Prométhée sans adaptation, la méthode Prudente sans adaptation et la méthode Prudente avec adaptation des pondérations. Le tableau 7 fournit les valeurs des flux de sortie (moyenne et écart type) et le niveau d'accumulation moyen des deux convoyeurs (moyenne et écart type).

	Flux de sortie		Niveau de remplissage	
	Moy.	E.Type	Moy.	E. Type
Adaptation	1,29	0,20	81,36%	8,24
Prudence	1,24	0,35	77,7%	8,65
Prométhée	1,18	0,41	54,5%	8,82

Tableau 7. Résultats sur le niveau de remplissage et le flux de sortie.

Ce tableau montre que les meilleurs résultats (moyenne et écart type) sont obtenus lorsque l'on utilise la méthode prudente avec adaptation, puis avec la méthode prudente sans adaptation, puis enfin avec la méthode Prométhée est utilisée.

A titre d'information, les adaptations des pondérations sont présentées sur la figure 22, la première adaptation ayant lieu à la date 209 s.

Indépendamment de l'adaptation, les résultats issus de la méthode prudente sont nettement meilleurs que ceux issus de la méthode Prométhée. Ceci s'explique en partie par le niveau de robustesse plus élevé de la méthode prudente par rapport à la méthode Prométhée [Durand et Trentesaux, 2000a]. Ceci est dû à une approche de décision ordinale plutôt que cardinale.

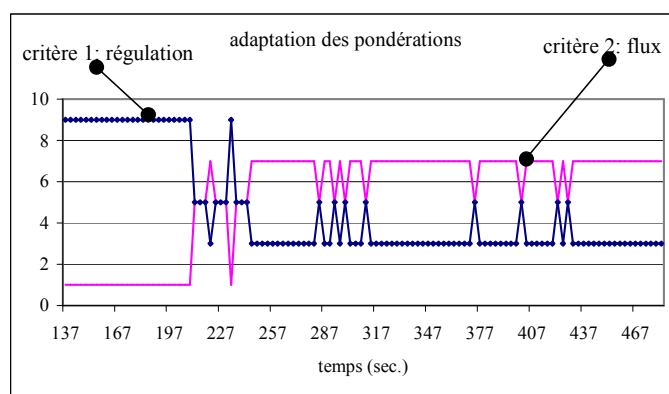


Figure 22. Adaptation des pondérations.

Ces tests montrent non seulement les possibilités offertes par un modèle adaptatif du pilotage, mais surtout l'importance qu'il faut apporter au choix de la méthode de décision et à l'analyse des propriétés de ces méthodes (dans le cas présent, le niveau de robustesse moyen).

II.2 Thème 2 : adaptation dynamique des contraintes

II.2.1 Objectif et problématique

Appliquée au pilotage, l'approche par contrainte présente de nombreux avantages (récursivité, définition d'un problème uniquement au travers de son ensemble de contraintes, non déterminisme, etc.). Plus spécifiquement pour l'adaptation de premier niveau, il est possible de définir dynamiquement l'ensemble des contraintes en fonction des classes de fonctionnement établies (mise en route, fonctionnement nominal, dégradé, arrêt, etc.). Elle

présente toutefois des inconvénients connus. Parmi ceux-ci, peut être le plus critique pour le pilotage adaptatif est qu'il n'existe peut être pas de solution au problème posé, surtout en cas de fonctionnement dégradé. La solution la plus courante consiste alors à définir des stratégies de relâchement de contraintes.

L'objectif de ce thème est ainsi de décrire une approche adaptative du pilotage en définissant des contraintes statiques garantissant l'existence d'une solution et des contraintes dynamiques relatives à la stratégie de gestion des contraintes (relâchement ou accentuation).

II.2.2 Contribution

L'EDP adaptative se compose de trois modules fonctionnels gérant le processus d'adaptation : un module adaptation événementielle, un module de gestion des contraintes et un module d'extrapolation. Nous décrivons ces trois modules [Trentesaux et al., 1999] :

- L'adaptation événementielle gère le suivi des événements (évolution de l'état des capteurs) et définit les contraintes dynamiques relatives à la stratégie d'adaptation. Ce module réduit ou accroît l'espace de recherche pour l'optimisation des variables d'action jusqu'à obtention d'une solution satisfaisante. La seule condition est de définir un fonctionnement nominal par un ensemble de contraintes statiques auxquelles correspond systématiquement au moins une solution. Les contraintes dynamiques permettent alors à l'opérateur d'introduire des connaissances supplémentaires sur le système au niveau de l'optimisation sur un horizon plus long (synchronisation des flux, etc.).

Afin de garantir l'existence d'au moins une solution au problème défini par l'ensemble des contraintes (statiques et dynamiques), une procédure de relâchement de contraintes dynamiques est utilisée. Si, après relâchement de l'ensemble des contraintes dynamiques, aucune solution n'a pu être trouvée, le mode de fonctionnement dégradé est activé et l'opérateur est alerté. Une procédure d'arrêt d'urgence est alors proposée. L'opérateur, ayant une connaissance plus précise de l'état du système décide ou non d'arrêter le système. Dans le cas où le système n'est pas arrêté, aucune modification d'état n'est réalisée jusqu'à la prochaine activation de pilotage par le filtre. Ce module est réactivé en cas d'absence de solution relevée par le module de gestion de contraintes et se réfère alors au dernier jeu de contraintes qui présentait une solution.

- Le module de gestion de contrainte gère la propagation des contraintes, l'identification de solutions de commande admissibles et l'identification du meilleur jeu de paramètres de commande en exploitant l'extrapolation du comportement du système opérant.
- Le module d'extrapolation permet d'évaluer a priori les performances du système opérant pour un jeu de paramètres de commande admissible identifié par le module de gestion de contraintes [Pesin et al., 1998a].

Ce processus, modélisé sous la forme d'un diagramme extended SADT présenté figure 23, montre que l'adaptation événementielle constitue l'interface entre une activation périodique (activation de période T_e) vers une activation de nature événementielle.

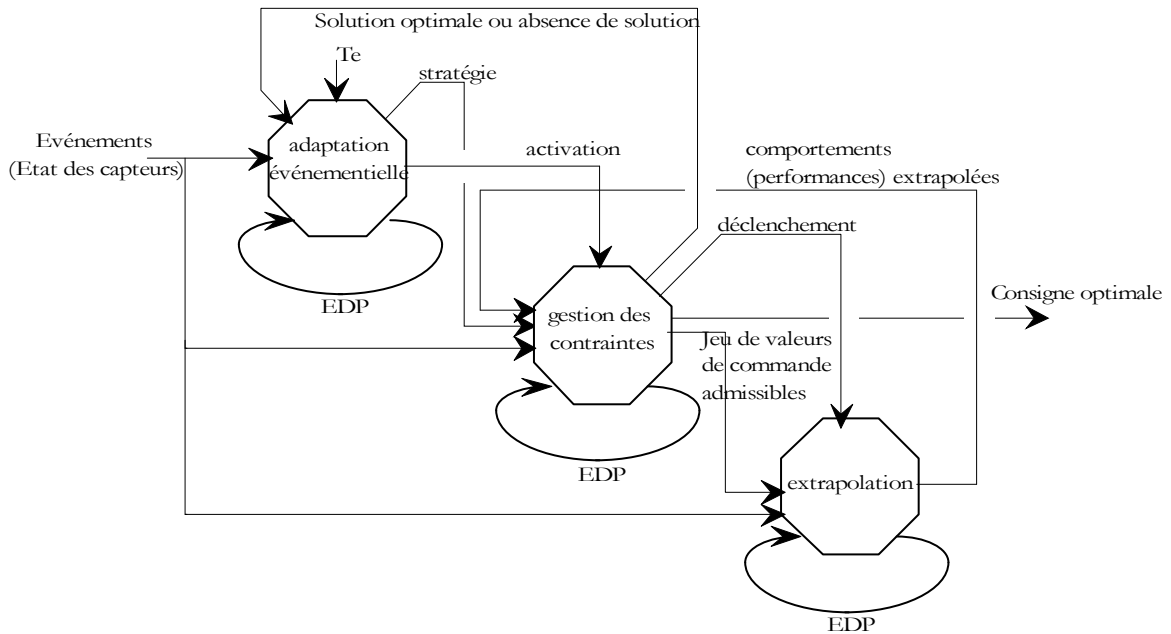


Figure 23. Diagramme extended SADT du niveau 2 du processus d'adaptation.

II.2.3 Résultats et validation

La validation a été réalisée dans le même cadre applicatif que celui du thème précédent.

Une analyse des flux de sortie de chaque ressource permet d'identifier la ressource goulet qui est le convoyeur du contrôle de niveau. La comparaison de ce flux théorique avec le flux observé en sortie de l'encartonneuse nous permettra d'évaluer l'impact du pilotage en terme de rendement.

En terme de contraintes de pilotage, le cahier des charges se traduit de la manière suivante :

- un différentiel de vitesse (δ) constant entre le contrôle et le convoyeur 3 : $V_{\text{contrôle}}(kT_e) = V_3(kT_e) + \delta$
- une vitesse minimale V_m pour le contrôle : $V_{\text{contrôle}}(kT_e) \geq V_m$,
- une consigne de remplissage de 80% du convoyeur 4 pour empêcher toute accumulation au niveau du contrôle,
- un mode de marche spécifique pour l'encartonneuse dont le fonctionnement est conditionné par un certain niveau d'accumulation sur le convoyeur 6 (poussée).
- la variation de la consigne de vitesse d'un convoyeur ne doit pas dépasser un certain seuil V_e afin d'éviter le renversement des produits : $|V_i((k+1)T_e) - V_i(kT_e)| \leq V_e$

Selon le cas, il est envisageable de poser une contrainte supplémentaire sur le différentiel maximum de vitesse entre deux convoyeurs consécutifs pour éviter une accélération/décélération brusque du produit : $|V_{i+1}(kT_e) - V_i(kT_e)| \leq V_s$. Cependant, ce problème étant généralement résolu par une technologie spécifique, il est inutile de la considérer au niveau du pilotage.

Nous illustrons le principe d'adaptation événementielle en décrivant la gestion de l'accumulation du convoyeur 2. La définition du passage du mode de fonctionnement normal au fonctionnement dégradé (et inversement) se fait par l'étude de l'état logique d'un capteur situé à l'entrée de ce convoyeur. Ce capteur mesure le niveau d'accumulation et indique si celui-ci est devenu trop important (par exemple, en raison d'une panne d'une ressource en aval). En fonctionnement normal, la fonction d'adaptation contraint la vitesse du convoyeur 1 par rapport au flux maximum du contrôle. Comme indiqué auparavant, cette contrainte stratégique n'est pas instantanée : elle est en fait introduite graduellement avec le temps. Elle est aussi relâchée graduellement (mais plus rapidement pour des raisons évidentes) en cas de fonctionnement dégradé.

La mise en œuvre du simulateur du système physique et la fonction d'adaptation (niveau 2) ont été réalisées en langage C sur PC Pentium à partir du modèle présenté. La simulation est réalisée en temps réel (la période

d'échantillonnage du simulateur de la chaîne est de 0,1 seconde). Le comportement de chaque convoyeur est simulé selon le modèle présenté dans [Thomin et Trentesaux, 1999]. La fonction de gestion de contraintes a été développée avec le langage de programmation par contraintes Chip.

Les résultats sont donnés sur la figure 24 (la vitesse relative correspond au pourcentage de la vitesse maximale admissible par le convoyeur). La perturbation (baisse de vitesse) intervient sur le convoyeur 3. Sa durée est assez importante (100 secondes à partir de la date 100) comparée aux temps moyens des micro-pannes considérées afin de mettre en évidence l'impact de ce dysfonctionnement. Les comportements les plus significatifs sont ceux de la charge du convoyeur 2 et de la vitesse du convoyeur 1.

L'analyse des flux maxima du goulet nous a permis d'élaborer le tableau 8.

Les flux moyens sont calculés entre les dates où le premier lot et le dernier lot sont formés ; les flux instantanés sont calculés uniquement sur les 5 derniers lots formés en fin de simulation (date 450). Cette table est établie avec ou sans la perturbation de vitesse.

	Flux de sortie encartonneuse			
	Avec Adaptation		Sans Adaptation	
	Moyen	Instantané	Moyen	Instantané
Avec panne	75,3%	94,1%	74,3%	94,1%
Sans panne	89,7%	94,1%	89,7%	94,1%

Tableau 8. Flux de sortie moyen et instantané en pourcentage du flux maximum.

En présence d'une perturbation, les flux de sortie sont de meilleure qualité dans le cas de l'adaptation. Ainsi, que ce soit au niveau du flux de sortie ou au niveau des variations de vitesse, le mécanisme d'adaptation présente des résultats encourageants.

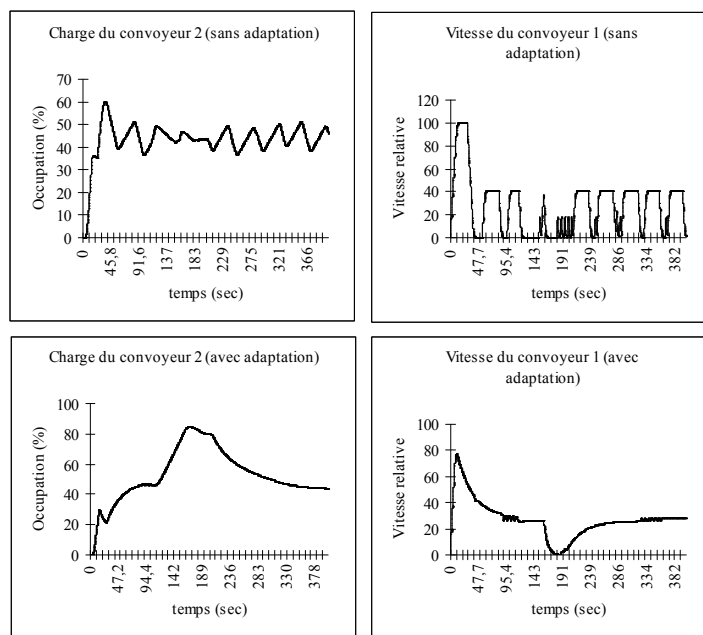


Figure 24. Evolution des charges et des vitesses avec/sans adaptation.

Les courbes de la figure 24 montrent clairement l'avantage de l'adaptation a priori qui permet de prendre en compte des informations supplémentaires pour élaborer une stratégie à plus long terme sans altérer les performances du système en terme de flux de sortie. L'illustration proposée montre clairement que cette stratégie peut être élaborée en fonction d'une dynamique de rejet de perturbation ou de poursuite d'un modèle (dépassement, temps de montée, etc.), de manière similaire à la conception des régulateurs. Cependant, étant donné la complexité du système à piloter, seule la simulation permettrait de dimensionner les paramètres de régulation et de poursuite de modèle.

Dans ce chapitre, nous avons présenté nos principaux résultats et nos principales contributions scientifiques. L'ensemble de ces travaux nous conduisent à envisager un certain nombre de perspectives de recherche qui sont détaillées dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Perspectives de recherche

Introduction

Dans ce chapitre, je présente les thèmes de recherche que je souhaite développer dans les années à venir. Ces thèmes de recherche constituent un prolongement direct à court, moyen et long terme de mes activités de recherche menées dans le cadre du pilotage hétérarchique ou distribué.

Mes travaux porteront :

- dans le cadre de développements théoriques :
 - sur les modèles pour l'amélioration continue des performances,
 - sur les modèles de systèmes coopératifs pour l'aide au pilotage distribué du cycle de vie des systèmes de production,
- dans le cadre de développements méthodologiques : sur le développement de méthodes de conception et de validation,
- et enfin, dans le cadre applicatif : sur le développement de modèles spécifiques au domaine de la production de services, et plus particulièrement, le transport multi-modal.

Ces quatre thèmes sont détaillés ci dessous.

I Modèles pour l'amélioration continue des performances

I.1 Problématique et objectifs

Sous la responsabilité de C. Tahon, je suis à l'origine d'un nouvel axe de recherche scientifique portant sur le développement d'un modèle de pilotage distribué supportant des mécanismes d'auto-organisation et d'adaptation (thèse de S. Bousbia). Dans ce cadre, le modèle sur lequel nous travaillons est de type (<DIS, III, AO>, <EPP, E, A>). Il constitue par conséquent une évolution logique vers le niveau 8 du pilotage en s'appuyant sur les travaux menés jusqu'à présent.

Un état de l'art a été réalisé sur l'auto-organisation [Bousbia et Trentesaux, 2002]. Les travaux de la communauté internationale (voir chapitre II) et mes propres travaux (voir chapitre III) se positionnent, sauf rares exceptions (travaux de Shen, Tharumarajah, Maione et Naso, Sohier, Peeters et Brooks) dans un cadre de pilotage non adaptatif, non auto-organisé de type $C = (<*, II/III, O>, <*, E, Ra>)$.

En réponse à une demande croissante des industriels (globalement caractérisée en termes d'agilité), l'approche par pilotage distribué ou décentralisé offre un potentiel important en termes de capacité d'adaptation et d'auto-organisation. Or, encore peu de travaux sont effectués afin d'exploiter réellement ce potentiel [Aydin et Öztemel, 2000]. Les résultats les plus aboutis sont en fait issus de la communauté multi-agent et de celle de l'intelligence artificielle [Butala et Sluga, 2002], [Luh et Cheng, 2002], [Aydin et Öztemel, 2000] et parmi ceux ci, encore peu s'attachent aux problématiques de pilotage dans un contexte temps-réel.

L'objectif des travaux envisagés sur ce thème est ainsi de contribuer à l'élaboration de modèles d'entités adaptatives et/ou de systèmes de pilotage auto-organisés capables non seulement de générer des solutions satisfaisantes, mais également de proposer des mécanismes d'amélioration de leurs performances.

1.2 Directions de recherche

L'extension de notre approche nous a permis d'aborder le domaine de l'auto-organisation ; c'est-à-dire la définition dynamique de l'agencement de pilotage le mieux adapté, soit de classe III ou de classe II (hétérarchique-supervisée). Le passage de l'une à l'autre se fait à partir de l'évaluation de la charge potentielle maximale dynamique (PMD) de chaque UMD-RP. En cas de fort déséquilibre entre les différentes PMD (resp. en cas de retour à l'équilibre), le mécanisme d'auto-organisation conduit à la création (resp. la suppression) d'une entité de supervision dont la fonction est d'ordonner les UMD goulets.

Dans le cadre du GRAISYHM, nous travaillons avec T. Berger et Y. Saliez, une approche non plus orientée pilotage par les ressources, mais par les produits. Ces deux approches nous semblent complémentaires, et à terme, nous envisageons leur intégration [Berger et al., 2002].

Plusieurs outils pourront avantageusement être utilisés, en particulier :

- les algorithmes génétiques, qui, couplés à des méthodes de simulation permettent de proposer et d'évaluer de nouvelles alternatives (chromosomes représentant des jeux de paramètres, etc.) dans l'objectif d'améliorer les performances,
- les réseaux de neurones et les méthodes de raisonnement à base de cas qui supportent des mécanismes de capitalisation des connaissances et de reconnaissance de situation. L'objectif est d'intégrer les expériences acquises afin de mieux décider par la suite (notamment de manière robuste) [Wang et Lee, 2000].
- l'analyse factorielle (et les plans d'expérience) permettant de réaliser une analyse de sensibilité entrées/sorties dans l'objectif d'adapter au mieux les paramètres de pilotage aux objectifs recherchés.
- Pour la mise en œuvre, les logiciels mobiles pouvant se transférer entre processeurs distants dans l'objectif d'exploiter au mieux les ressources informatiques disponibles. Les propriétés de certains virus (informatiques ou non) peuvent également être copiées avantageusement et appliquées dans le cadre du pilotage distribué : recherche de satisfaction, reproduction, mutation, autonomie, etc.

Le couplage de l'analyse factorielle et des méthodes de raisonnement à base de cas me semble tout particulièrement prometteuse dans un cadre adaptatif. Le raisonnement à base de cas est défini par l'association à un problème P d'une solution construite en réutilisant la solution mémorisée d'un problème P' jugé similaire à P [Lieber et Napoli, 1999]. Par conséquent, effectuer des raisonnements à base de cas sur les expériences relevées par chaque entité, caractérisées en termes de relation cause/effet à l'aide de l'analyse factorielle, devrait permettre d'adapter les décisions tout au long du pilotage. Des procédures d'apprentissages par simulation permettront de générer un ensemble de connaissances a priori. Un des problèmes à résoudre est alors de rendre opérationnel (dans un cadre temps réel) ces outils connus pour leur complexité de mise en œuvre et leur temps de réaction relativement important. Cependant, il semble que cette approche soit envisageable dans un cadre de pilotage [Szelke et Markus, 1997].

Les mécanismes dits 'émergents' constituent un axe de recherche novateur et encore relativement inexploré [Ueda, 2001]. Ce thème de recherche constitue une perspective à court terme sur laquelle je désire tout particulièrement m'investir à titre personnel.

La thèse de Salah Bousbia constitue une première étape dans cette voie. Cette thèse nous permet également de poursuivre de manière cohérente les travaux sur les mécanismes d'adaptation décrits dans le chapitre précédent pour aboutir à des systèmes de pilotage auto-organisés et adaptatifs de type $C = \langle \text{DIS}, \text{III}, \text{AO} \rangle, \langle \text{EPP}, \text{E}, \text{A} \rangle$.

L'approche envisagée est par apprentissage sur la base d'une évaluation a posteriori (cf. chapitre précédent) et auto-organisée. Le principe fondamental est celui-ci : un produit fini informe les produits en cours (et à venir) des performances qu'il a obtenu pour un ensemble de règles de décision. Les produits en cours prennent alors en compte les « meilleures pratiques » et adaptent leur comportement en conséquence. L'information propagée n'est donc pas seulement le meilleur chemin suivi (communication « classique » par phéromone) mais également les meilleures règles de décision. Afin de varier les expériences, un certain pourcentage de produits auraient

L'opportunité de procéder à des variations sur le choix des règles de décision (de manière similaire aux opérateurs de mutation et de croisement adoptés par les méthodes d'optimisation par population). Ce système est capable de s'adapter dans la mesure où chaque produit dispose de mécanismes d'apprentissage des meilleures pratiques. Ce système est également capable de s'auto-organiser dans la mesure où toute information relative à une situation anormale (saturation convoyeur, panne ressource, etc.) serait naturellement intégrée : en effet, les « meilleures pratiques » seraient dans ce cas naturellement modifiées. Par exemple, un produit qui n'aura pas été manufacturé sur une ressource de production soit saturée soit en panne définira une nouvelle « meilleure pratique » qui sera propagée aux autres produits. Ainsi, des solutions de remplacement seront naturellement apportées par ces essais, ce qui permettrait de modifier dynamiquement le comportement des produits en-cours. Cette même approche pourrait également être appliquée aux ressources de production.

Il est possible d'envisager une mise en œuvre réelle sous réserve de l'acquisition d'un atelier de production de démonstration fortement automatisé et informatisé. Un projet est actuellement à l'étude.

II Conception de systèmes coopératifs pour l'aide au pilotage distribué du cycle de vie des systèmes de production

II.1 Problématique et objectifs

De nombreux travaux de recherche ont été réalisés sur la coopération, pour en donner une définition ou en proposer différents modèles [Erschler et al., 1997], [Camalot, 2001], [Monteiro, 2001], [Millot, 1999], [Schmidt, 1991].

L'objectif du projet JEMSTIC est d'initier un nouvel axe de recherche sur la conception de systèmes coopératifs. Le premier résultat recherché est l'identification d'invariants relatifs aux mécanismes de coopération en suivant une double démarche ascendante/descendante :

- expliciter, dans le domaine de la coopération, les différentes expériences industrielles vécues par des chercheurs du LAMIH, puis analyser les situations de coopération pour chacune de ces expériences,
- analyser les principales définitions et concepts relatifs au domaine de la coopération émanant du monde de la recherche, nationale et internationale,
- déduire des deux points précédents un ensemble minimal et suffisant de concepts pour l'élaboration de modèles formels d'entités coopérantes,
- élaborer un prototype de simulation afin de valider ces modèles, de définir des indicateurs de performances puis d'identifier les invariants recherchés pour différents types de scénarii préalablement définis.

Cette activité de recherche prospective constitue une opportunité de formaliser une thématique de recherche existante au sein de l'équipe LAMIH/SP, mais actuellement peu structurée, autour d'une problématique scientifique et technique innovante répondant à un besoin industriel actuel.

II.2 Directions de recherche

De l'ensemble des expériences industrielles des participants à ce projet, quatre ont été retenues selon les critères de sélection suivants : mise en évidence d'un besoin en coopération, diversité des acteurs (et des objectifs), diversité des contextes (afin de couvrir au mieux les phases de conception et de réalisation d'un produit, bien ou service).

Ces expériences concernent la conception coopérative de biens de production complexes (entreprise de production de systèmes de transport ferroviaire), de services (entreprise de télécommunication), la conduite coopérative des systèmes de production (fonderie de précision) et la maintenance des systèmes complexes (entreprise de transport ferroviaire). Chacune de ces expériences a été explicitée selon un schéma commun mettant en évidence: les spécificités de l'entreprise, l'objectif recherché au travers de la coopération, une première proposition de définition du concept de coopération (dans le cadre industriel considéré) ainsi que les mécanismes

de coopération aisément identifiables (au travers de la description d'un ou deux exemples concrets). L'analyse de ces expériences a été réalisée en mettant en évidence les invariants relatifs aux questions suivantes : qui coopère avec qui ? Sur quel sujet ? Pourquoi coopère –on ? A quelles conditions ? Cette analyse a fait l'objet d'un document de travail (voir annexe 6) dont la grille d'analyse est donnée tableau 1.

Une analyse de l'état de l'art a été menée en parallèle à l'identification des concepts relevant de la coopération. Des différentes propositions émanant des acteurs du projet, une définition minimale et suffisante de la coopération a alors été établie : au moins deux entités, humaine ou artificielle, aux compétences similaires ou distinctes et possédant chacune un but propre, coopèrent selon un objectif commun afin d'obtenir chacune ou globalement un gain (financier, délai, qualité, quantité, ...). Un certain nombre de concepts ont été définis : objectif, tâche, décision, performance, gain, coût, ressource, compétence et communication. Afin de vérifier l'exhaustivité et la robustesse de ces concepts, ils ont été confrontés aux expériences industrielles.

Données globales		
Objectif global de la coopération : pourquoi ? que cherche t-on ? ...		
Sur quoi porte la coopération ? : information, compétence, tâches, autres ? préciser...		
Contraintes globales portant sur la coopération:...		
Combien de types d'entité différents et combien d'entités coopérantes ? ...		
Problèmes de communication ? vocabulaire ?...		
Autre infos pertinentes ...		
Données locales		
	Entité de type i	Entité de type j
Nom/identification des entités du type considéré :		
Objectif propre recherché par chaque type d'entité, indépendamment du cadre coopératif :		
Dimension et méthode de mesure du profit attendu par chaque type d'entité :		
Ce que la coopération permet a priori d'améliorer (profit attendu) au niveau du type d'entité :		
Contraintes spécifiques à chaque type d'entité :		
Quelles sont les tâches/activités liées à la coopération pour chaque type d'entité :		
Autres infos pertinentes :		

Tableau 1. Grille d'analyse des expériences de situations de coopération.

Les premiers modèles d'entité coopérante sont en cours d'élaboration. Afin de conserver un cadre à la fois générique et formel, l'approche de modélisation adoptée est basée sur les concepts issus de la gestion de projets multiples et sur les modèles issus de l'approche CSP (Constraint Satisfaction Problem). Ainsi, l'originalité de notre contribution se situe dans la gestion simultanée et distribuée d'un projet théorique où chaque entité coopérante dispose (éventuellement de manière confidentielle) d'un objectif, de tâches, de compétences, de ressources, de contraintes et de critères de mesure de sa performance. Dans ce contexte, des situations de coopération (par exemple, augmentative, confrontative et intégrative) peuvent alors être utiles pour une ou plusieurs entités. Des exemples sont en cours de définition et serviront à étayer les développements théoriques. Ils permettront également de réaliser des simulations de situations de coopération entre plusieurs entités (une par ordinateur, en fonctionnement autonome puis sous contrôle d'un opérateur humain). Ces exemples sont construits afin de conserver un bon équilibre entre développements purement formels et applicabilité industrielle.

D'un point de vue général, les retombées attendues de ce projet sont :

- structuration et positionnement des connaissances : un cadre conceptuel « robuste » de la coopération est en cours de définition. Ce cadre, défini et accepté par les différents acteurs du projet, a été validé par l'analyse de plusieurs cas industriels et académiques. Il sera, en retour, utilisé par ces acteurs afin de positionner leur propre activité de recherche.
- génération de connaissances : cette recherche devrait aboutir à l'élaboration d'un modèle formel d'entité coopérante et à l'identification d'invariants caractérisant les situations de coopération et leur éventuelle rentabilité.
- animation de la recherche : co-encadrement inter-équipes de DEA et doctorants,

- diffusion de connaissance : ce projet devrait conduire à terme à l'organisation d'une ou plusieurs sessions spéciales dans des conférences et congrès,
- relation avec le monde industriel : un industriel (entreprise de production de systèmes de transport ferroviaire) s'est montré intéressé par ce projet, ce qui pourrait conduire à une thèse.

Ce projet constitue ainsi une opportunité de faire émerger une nouvelle thématique de recherche liée aux mécanismes de coopération. Deux doctorants profitent directement de la dynamique de ce projet.

III Cadre méthodologique de conception

III.1 Problématique et objectifs

Chacune des contributions relevant du pilotage hétérarchique est essentiellement validée par simulation du comportement du système et peu de travaux aboutissent à une mise en œuvre opérationnelle [Cavalieri et al., 2000]. [Patrity, 1998] a relevé qu'une des causes se situe d'une part au niveau du manque de développements théoriques relevant du cadre méthodologique qui doit précéder toute mise en œuvre et d'autre part, au niveau du manque de mise en évidence de l'apport en comparaison avec d'autres approches. En outre, le manque de mise en œuvre industriel s'explique essentiellement, de notre point de vue, par le manque de preuves formelles concernant le niveau de performance garanti qu'un système de pilotage hétérarchique peut atteindre.

Toutefois, Dilts relevait en 1991 une application riche en enseignement, celle d'un atelier flexible de la division Military Aircraft de British Aerospace produisant plus de 900 types de composants et présentant une large diversité de ressources de production : robots de manipulation, systèmes de transport, machines d'usinage, centres de stockage, outillages, etc. reliées par un réseau local. Afin d'effectuer des comparaisons, un système de pilotage de classe I avait été préalablement défini. Cette approche hiérarchique était, selon les responsables, limitée en terme d'évolutivité, de reconfigurabilité, de fiabilité et de redondance. L'alternative hétérarchique mise en place a été qualifiée de flexible, sans limite au niveau de sa conception et malgré tout, robuste [Dilts et al., 1991].

En France, nous pouvons noter les travaux Limos dans ce domaine [Kouiss et al., 1997]. De notre point de vue, au niveau international, les travaux les plus aboutis sont ceux du MIT qui ont permis de valider une architecture distribuée et d'illustrer ses potentiels dans le cadre applicatif de la robotique mobile [Brooks, 1991].

Le troisième thème de recherche que nous envisageons s'inscrit dans cette perspective. L'objectif est le développement :

- de méthodes de validation par vérification formelle de propriétés ou par simulation,
- de méthodes de conception basées sur des modèles de références,
- de benchmarks permettant d'établir des référentiels de comparaison,
- de logiciels de simulation dédiés à un contexte de pilotage hétérarchique,
- de méthodes d'implantation sur site et de validation industrielle.

Ces différents points relèvent d'un thème de recherche à long terme dont l'enjeu, l'utilisation de l'approche hétérarchique dans l'industrie, constitue, de notre point de vue, un des verrous technologiques majeurs des années à venir.

III.2 Directions de recherche

Concernant le premier point, il nous semble intéressant de travailler sur la vérification des architectures de commande, en s'inspirant par exemple des travaux du LURPA [Denis et al., 1995], [Meunier et Denis, 1997] et du LISA d'Angers (algèbres des dioides) [Lhommeau et al., 2001]. Ceci requiert en particulier une formalisation du concept de pilotage hétérarchique, formalisation inexistante à ce jour.

Concernant le second point, nous avons présenté, dans le chapitre précédent, un premier modèle de référence (UMD). Nous avons proposé, dans le cadre de l'ordonnancement par simulation d'un pilotage hétérarchique

[Trentesaux et al., 2001b], une première méthode de conception. Cette méthode, nommée D-Sign, est décrite figure 1, sous la forme d'un réseau de Petri. Nous avons défini sept activités fondamentales regroupées en quatre processus : conception, exploitation, analyse et amélioration. et cinq décisions fondamentales (en gras sur le réseau de Petri).

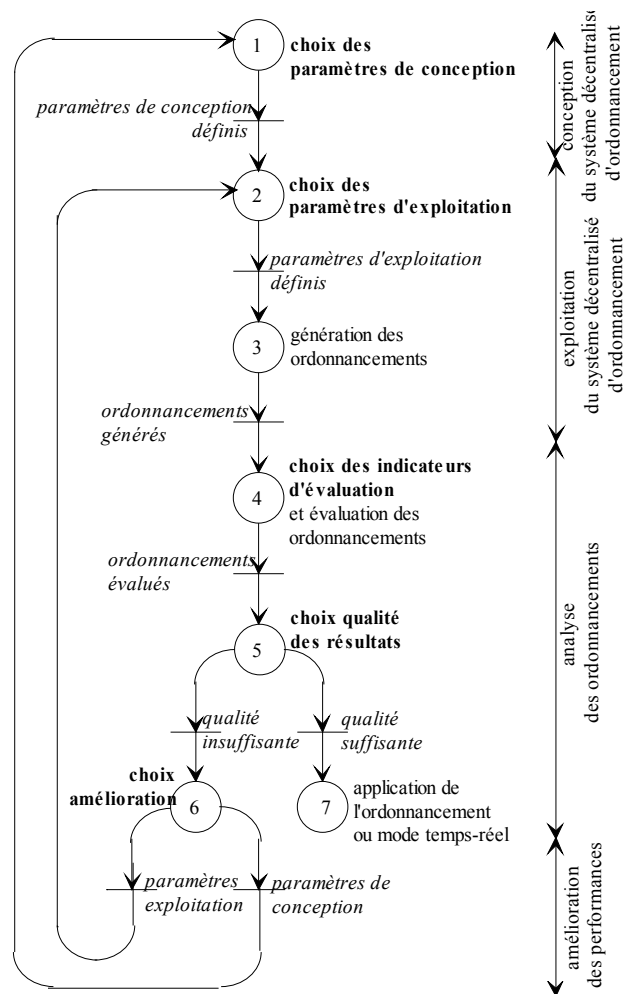


Figure 1. Méthode de conception D-Sign.

Cette méthode est utilisée conjointement avec les modèles développés pour la caractérisation de l'impact des paramètres (cf. chapitre précédent). Les premiers résultats semblent encourageants, mais les travaux doivent être poursuivis.

Concernant le troisième point, une solution courante consiste à proposer des référentiels d'étude (bancs d'essai) à partir desquels des évaluations quantifiées sont possibles. La nature très diversifiée des systèmes étudiés rend difficile toute comparaison, si ce n'est au travers de leurs performances [Cavaliere et al., 2000]. Dans [Caridi et Sianesi, 2000], on peut trouver quelques éléments de caractérisation, mais dans un cadre applicatif limité (ligne d'assemblage).

Concernant les quatrième et cinquième points, l'approche proposée au LGP (Tarbes) portant sur les développements de modules fonctionnels informatiques qu'il est possible de structurer et d'ingérer (chaînage, parallélisme, etc.) nous semblent prometteurs.

IV.1 Problématique et objectifs

La présence systématique à tous les niveaux de l'entreprise des notions de compétence et de décision individuelle et un constant besoin en contrôle dynamique laissent envisager une large diversité des cadres applicatifs des modèles développés pour le pilotage hétérarchique [Cantamessa, 1997]. Si la majorité des références traite du pilotage hétérarchique du niveau opérationnel de la production de biens et dans la majorité des cas, des ateliers flexibles de production, un nombre croissant de travaux concerne le domaine des services.

C'est le cas par exemple des travaux de K. Cetnarowicz dans le domaine de l'aide médicale [Cetnarowicz et Cetnarowicz, 2000]. L'action spécifique GHC (Gestion Hospitalière Coopérative) du CNRS-STIC devrait mettre en évidence les besoins importants en terme d'organisation dans le domaine hospitalier. Cette analyse est confirmée par l'analyse des flux logistiques que nous avons effectuée au centre hospitalier de Valenciennes. J'ai participé à deux études, dans le domaine de la construction [Tonarelli et al., 2000] et dans celui de la reconnaissance visuelle [Samyn, 1998] qui illustrent l'intérêt d'une approche hétérarchique du pilotage.

Dans le secteur des transports, un des thèmes du projet SART (Système d'Aide à la Régulation de Réseaux de Transports multimodaux, projet MOST/CPER volet III) porte sur l'application du concept de pilotage hétérarchique des systèmes multimodaux.

Nous nous proposons dans cette perspective de travailler à la conception de modèles de systèmes de pilotage hétérarchique adapté au cadre de la production de services. En particulier, nous nous intéressons au transport multimodal, qui constitue un cadre applicatif naturel du pilotage hétérarchique. En effet, plusieurs modes de transports (tramway, camion, bus, train, fer-routage, etc.) doivent co-exister, chacun présentant des contraintes ou des spécificités propres, des objectifs différents et des moyens différents.

Les enjeux de cette thématique sont importants (développement durable, environnement, etc.), ce qui nous permet d'envisager de développer ce thème de recherche sur le long terme.

IV.2 Directions de recherche

Les travaux menés en collaboration avec la société Semurval sur le thème précédent concernait:

- l'identification des concepts communs et des différences entre la production de biens (atelier de production) et de services (transport bi-modal tramway-bus) au travers d'une analyse comparative,
- la proposition d'un modèle générique fédérant les concepts communs et leur mise en œuvre au travers d'un prototype de simulation de pilotage hétérarchique d'une bimodalité tramway-bus.

Les travaux ont conduit à l'élaboration d'un modèle de système multimodal en vue de son pilotage. Le système de pilotage est de type $C = (<DEC, II, O>, <EDP, E, A>)$ [Pesin et al., 1998b].

Il nous semble important de poursuivre dans cette voie de recherche originale, notamment dans le cadre du projet CPER/SART qui offre une opportunité intéressante.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quatre thèmes de recherche que nous souhaitons développer à plus ou moins long terme. L'application des concepts de pilotage hétérarchique ou distribué a été illustrée par de nombreux travaux relevant de cadres applicatifs variés. La connaissance théorique du problème nous permet d'envisager à terme une expérimentation sur site, notamment à l'AIP de Valenciennes. Un premier article décrit la simulation du système de pilotage envisagé [Berger et al., 2002]. Nous estimons qu'à ce niveau de la recherche une application réelle nous permettra non seulement de vérifier la validité de nos propositions, mais sera riche en enseignements sur la faisabilité industrielle. Cette validation sur site constitue une étape importante de l'activité d'un chercheur dans un domaine applicatif.

Conclusion générale

Le pilotage non centralisé constitue un thème de recherche à la fois ancien (systèmes de pilotage hiérarchique) et récent (systèmes de pilotage hétéarchique).

La description et le positionnement des contributions de la communauté francophone montrent que cette dernière s'est fortement spécialisée dans les systèmes de pilotage décentralisé appliqués aux finalités opérationnelles du pilotage, plus rarement aux finalités tactiques et stratégiques. Cette communauté a en outre une vue relativement « statique » du pilotage (absence notable de mécanismes d'auto-organisation et d'adaptation). Même si certains proposent des modèles auto-organisés, l'auto-organisation y est relativement peu développée car elle concerne essentiellement l'ajout ou la suppression dynamique d'entités de pilotage. Un côté « cartésien » pousse à concevoir des systèmes plutôt hiérarchiques et préalablement déterminés et semble subsister [Niel, 1999], [Doumeingts, 1990] dans un environnement industriel où, paradoxalement, les concepts d'agilité, d'adaptation, d'émergence et d'auto-organisation prennent de plus en plus d'importance.

Au niveau international, la communauté scientifique a depuis longtemps considéré les systèmes hétéarchiques comme l'un des prochains enjeux mondiaux, tant au niveau d'un robot ou d'un réseau d'entreprise, dans le domaine de la production de biens que dans celui de la production de services. Le principal intérêt réside dans la capacité de l'approche hétéarchique à faciliter la mise en œuvre de mécanismes relatifs à la vue évolutionniste des systèmes, tels que l'adaptation et l'auto-organisation (les approches de classe I ne permettent pas d'intégrer ces mécanismes liés à la vue évolutionniste des systèmes : l'existence de liens hiérarchiques constitue un frein à l'adaptation et n'est pas compatible dans un contexte d'auto-organisation).

Parmi les laboratoires français impliqués dans la recherche en productique, certains mènent depuis très longtemps, une activité de recherche sur l'agencement hétéarchique des entités de pilotage : en particulier le LSIS, le LAG, le LAAS ou le CRAN. Cependant, depuis plusieurs années, d'autres laboratoires attachés traditionnellement à une vue hiérarchique du pilotage abordent la problématique de l'hétéarchisation. Parmi ces laboratoires, relevons en particulier le GRAI.

Ce thème de recherche est très ouvert et les résultats actuels souffrent de plusieurs faiblesses, concernant notamment la viabilité industrielle, la preuve de cette viabilité ou l'évaluation de l'apport des agencements hétéarchiques par rapport aux agencements classiques. Ces faiblesses constituent des verrous technologiques et méthodologiques majeurs qu'il sera nécessaire de résoudre dans les années à venir.

Références

- [AFGI, 1992] AFGI, Association Française de Gestion Industrielle, Dictionnaire, 1992.
- [AFNOR, 1988] AFNOR, Association Française pour la Normalisation, Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Recueil de Normes Françaises, 3ème édition, 1988.
- [AFNOR, 2000] AFNOR, Association Française pour la Normalisation, Norme internationale ISO 9000 :2000, Recueil de Normes Françaises, 2000.
- [Agimont, 1996] G. Agimont, Modélisation et simulation des organisations multi-agents, dissertation de doctorat en sciences appliquées, faculté polytechnique de Mons, 1996.
- [Anthony, 1965] R. N. Anthony, Planning and control systems: a framework for analysis, Harvard university, Graduate school of business administration, Cambridge, Massachusetts, USA, 1965.
- [APICS, 1998] APICS, The educational Society for Resource Management, APICS Dictionary, 9th ed., Falls Church, VA, USA, 1998 (ISBN 1-55822-162-X).
- [Archimède, 1991] B. Archimède, Conception d'une architecture réactive distribuée et hiérarchisée pour le pilotage des systèmes de production, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Bordeaux, 1991.
- [Archimède et Coudert, 2001] B. Archimède et T. Coudert, Reactive scheduling using a multi-agent model: the SCEP framework, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 14, 2001, pp. 667 – 683.
- [Aydin et Öztemel, 2000] M. E. Aydin et E. Öztemel, Dynamic job-shop scheduling using reinforcement learning agents, Robotics and Autonomous Systems, vol. 33, 2000, pp. 169-178.
- [Azevedo et Sousa, 2000] A.L. Azevedo et J.P. Sousa, a component-based approach to support order planning in a distributed manufacturing enterprise, Journal of Materials Processing Technology, vol. 107, 2000, pp. 431-438.
- [Baillet, 1994] P. Baillet, Contribution à l'amélioration de la réactivité dans les systèmes de production notamment par la mise en œuvre des concepts de décentralisation des fonctions de décision, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, 1994.
- [Baker, 1991] A. D. Baker, Manufacturing Control with a Market-Driven Contract Net, thèse de doctorat, ECSE Dept., Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 1991.
- [Baker, 1998] A. D. Baker, A survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterarchy: dispatching, scheduling, and pull, Journal of Manufacturing Systems, vol. 17, n°4, 1998, pp. 297-320.
- [Bakker, 1988] H. Bakker, DFMS : A new control structure for FMS, Computers In Industries, vol. 10, 1988, pp. 1-9.
- [Bel, 1991] G. Bel, Rapport introductif du thème 'pilotage et gestion d'atelier', colloque actions de recherche en robotique et productique du MRT, paris, 1991, pp. 551-562.
- [Berchet et al., 1999] C. Berchet, G. Habchi et A. Courtois, Intégration du processus de pilotage à la simulation des systèmes de production, conférence MOSIM'99, SCS éditions, Annecy, pp. 337-343.
- [Berger et al., 2000] T. Berger, Y. Sallez, D. Trentesaux et C. Tahon, Comparison of two heterarchical multiagent approaches for FMS dynamic scheduling, Fourth biannual World Automation Congress WAC'2000, Seventh International Symposium on Manufacturing with Applications ISOMA052, (Maui, Hawaii, 11-16 Juin 2000),

- Jamshidi, Borne, Maciejewski, Nahavandi, Lumia, Fathi & Furuhashi (eds), TSI Press series on Intelligent Automation and Soft Computing (CD-Rom), ISBN : 1-889335-10-X, Albuquerque, USA, 2000.
- [Berger et al., 2002] Berger T., Sallez Y., Trentesaux D., Tahon C., Two heterarchical multi-agent approaches for FMS dynamic scheduling, *Systems Analysis – Modelling – Simulation*, ISSN 0232-9298, Taylor & Francis, vol. 42, n° 5, 2002, pp. 757-768.
- [Berrah, 1997] L. Berrah, Une approche d'évaluation de la performance industrielle, Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 1997.
- [Berruet, 1998] P. Berruet, Contribution au recouvrement des systèmes flexibles de production manufacturière : analyse de la tolérance et reconfiguration, thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille, 1998.
- [Bescos et al., 1995] P.L. Bescos, P. Dobler, C. Mendoza et G.Naulleau, Contrôle de gestion et management, (Montchrestien Ed.) coll. *Entreprendre*, Guide des techniques et de la décision, Paris, 3ème éd, 1995.
- [Beslon et al., 2001] G. Beslon, C. Bournez et J. Favrel, Adaptive reactive agents for industrial system control : the Arapsi project, 2nd IFAC/IFIP/IEEE Conf. On Management and Control of Production and Logistics, MCPL 2000 (Grenoble, juillet 2000), Z. Binder (ed), Pergamon, ISBN 0-08-043621 8, 1st edition, Oxford, Elsevier Science Ltd., vol. 1, 2001, pp. 431-436.
- [Beving, 1995] J.M. Beving, Généralités sur les systèmes, La modélisation systémique en entreprise, C. Braesch & A. Haurat (éd.), Hermès, Paris, 1995 (ISBN : 2-86601-508-8), pp. 17-43.
- [Bongaerts et al., 2000] L. Bongaerts, L. Monostori, D. McFarlane, B. Kadar, Hierarchy in distributed shop floor control, *Computers in Industry*, vol. 43, 2000, pp. 123-137.
- [Boulding, 1956] K. Boulding, General system theory : the skeleton of sciences, *Management Science*, 1956.
- [Bourrières et al., 2001] J. P. Bourrières, T. Lecompte, J.C. Deschamps et R. Alami, Un cadre formel de décision pour la planification multi-niveau des systèmes de production distribués, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 35, n° 7-8, 2001, pp.859-883.
- [Bouissou et Pirlot, 1995] D. Bouyssou et M. Pirlot, Choosing and ranking on the basis of fuzzy preference relations with the "min in favor", Multi-criteria decision making, Proc. of the 12th int. Conf., Hagen, Allemagne, Juin 1995.
- [Bousbia et Trentesaux, 2002] S. Bousbia et D. Trentesaux, Self-Organization in Distributed Manufacturing Control: state-of-the-art and future trends, IEEE International conference on Systems, Man & Cybernetics, El Kamel, Mellouli & Borne (eds), CD-Rom, ISBN: 2-9512309-4-X, (Hammamet, Tunisie, Octobre 2002), paper #WA1L1, 6 p.
- [Burlat et Boucher, 2001] P. Burlat et X. Boucher, Pilotage distribué des groupements d'entreprises – modélisation et perspectives, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 35, n° 7-8, 2001, pp.991-1018.
- [Butera, 1991] F. Butera, La métaphore de l'organisation : du château au réseau ; chapitre 2 : les nouveaux modèles d'entreprise : vers l'entreprise réseau, Les éditions d'organisation, Paris, 1991.
- [Braesch et Haurat, 1995] C. Braesch et A. Haurat, L'entreprise système, La modélisation systémique en entreprise, C. Braesch & A. Haurat (éd.), Hermès, Paris, 1995 (ISBN : 2-86601-508-8), pp. 83-88.
- [Brazier et al., 2001] F. M. T. Brazier, L. V. Moshkina, N. J. E. Wijngaards, Knowledge level model of an individual designer as an agent in collaborative distributed design, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 15, 2001, pp. 137-152.
- [Brennan et al., 1997] R.W. Brennan, S. Balasubramanian et D.H. Norrie, Dynamic Control Architecture for Advanced Manufacturing Systems, In *Proceedings of International Conference on Intelligent Systems for Advanced Manufacturing*, Pittsburgh, PA, 1997.
- [Brennan, 2000] R.W. Brennan, Performance comparison and analysis of reactive and planning-based control architectures for manufacturing, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Pergamon/Elsevier, vol. 16, 2000, pp. 191-200 (ISSN 0736-5845).
- [Brezocnik et Balic, 2001] M. Brezocnik et J. Balic, A genetic-based approach to simulation of self-organizing assembly, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 17, 2001, pp. 113-120.

- [Broissin, 1999] N. Broissin, Contribution à l'amélioration de la réactivité des systèmes de production automatisés et flexibles grâce à un pilotage basé sur une génération de tâches décentralisée, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, 1999.
- [Brooks et Flynn, 1989] R. A. Brooks et A. M. Flynn, Fast, cheap and out of control : a robot invasion of the solar system, *Journal of British Interplanetary Society*, vol. 42, 1989, pp. 478-485.
- [Brooks, 1991] R. A. Brooks, The Role of Learning in Autonomous Robots, *Proceedings of the Fourth Annual Workshop on Computational Learning Theory (COLT '91)*, Santa Cruz, CA, Morgan Kaufmann Publishers, 1991, pp. 5-10.
- [Browne et al., 1996] J. Browne, J. Harhen et J. Shivnan, *Production Management Systems – an integrated perspective*, Addison-Wesley Publishers Ltd. (2nd ed.), 1996.
- [Browne et al., 1999] J. Browne et J. Zhang, Extended and virtual enterprises – similarities and differences, *International Journal of Agile Management Systems*, vol. 1, n° 1, 1999, pp. 30-36.
- [Brun-Picard, 1988] D. Brun-Picard, Contribution à l'élaboration d'un modèle de commande décentralisée, Thèse de Doctorat ès Sciences, Université d'Aix-Marseille III, 1988.
- [Burke et Prosser, 1991] P. Burke et P. Prosser, A distributed asynchronous system for predictive and reactive scheduling, *Artificial Intelligence in Engineering*, 1991, vol. 6, n°3, pp. 106-124.
- [Butala et Sluga, 2002] P. Butala et A. Sluga, Dynamic structuring of distributed manufacturing systems, *Advanced Engineering informatics*, vol. 16, 2002, pp. 127-133.
- [Camalot, 2000] J. P. Camalot, aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources, thèse de doctorat, LAAS, 2000.
- [Campagne et al., 1995] J. P. Campagne, J. H. Jacot, Y. Frein et G. Vitry, A framework to specify a reactive and proactive management system, *ETFA'95 Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation*, INRIA/IEEE, Institut national de Recherche en Informatique Et en Automatique / Industrial Electronics Society, Paris, France, Octobre, 1995.
- [Campagne et al., 2000] J. P. Campagne, J. Erschler et D. Trentesaux, Special Session on Cooperative and Coordinated Decision in Distributed Enterprise, *2nd IFAC/IFIP/IEEE Conf. On Management and Control of Production and Logistics, MCPL 2000* (Grenoble, juillet 2000), Z. Binder (ed), Pergamon, ISBN 0-08-043621 8, 1st edition, Oxford, Elsevier Science Ltd., vol. 3, 2001, pp. 1019-1020.
- [Cantamessa, 1997] M. Cantamessa, Agent-based modeling and management of manufacturing systems, *Computers in Industry*, vol. 34, 1997, pp. 173-186.
- [Caridi et Sianesi, 2000] M. Caridi et A. Sianesi, Multi-agent systems in production planning and control : an application to the scheduling of mixed-model assembly lines, *international journal of production economics*, vol. 68, 2000, pp. 29-42.
- [Caro et Dorigo, 1998] D.G. Caro et M. Dorigo, AntNet : Distributed Stigmergic Control for Communications Networks, *Journal of Intelligence Research*, vol. 9, pp. 317-365.
- [Cavalieri et al., 2000] S. Cavalieri, M. Garetti, M. Macchi et M. Taisch, An experimental benchmarking of two multi-agent architectures for production scheduling and control, *Computers in Industry*, vol. 43, 2000, pp. 139-152.
- [Cetnarowicz et Cetnarowicz, 2000] K. Cetnarowicz et E. Cetnarowicz, Multi-agent decentralised system of medical help, *2nd IFAC/IFIP/IEEE Conf. On Management and Control of Production and Logistics, MCPL 2000* (Grenoble, juillet 2000), Z. Binder (ed), Pergamon, ISBN 0-08-043621 8, 1st edition, Oxford, Elsevier Science Ltd., vol. 1, 2001, pp. 463-467.
- [Cetnarowicz et al., 2000] K. Cetnarowicz, E. Nawarecki et G. Dobrowolski, Multi-agent MRP class system for production and disassembling, *2nd IFAC/IFIP/IEEE Conf. On Management and Control of Production and Logistics, MCPL 2000* (Grenoble, juillet 2000), Z. Binder (ed), Pergamon, ISBN 0-08-043621 8, 1st edition, Oxford, Elsevier Science Ltd., vol. 1, 2001, pp. 439-444.
- [Chan et al., 1999] C.Y. Chan, F.W. Lam et C.P. Lee, Considerations for using cellular manufacturing, *Journal of Materials processing technology*, vol. 96, 1999, pp. 182-187.

- [Charpentier et al., 2001] P. Charpentier, F. Chaxel, A. Thomas et E. Muhl, Quelques approches de pilotage distribué et leur formalisation, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 35, n° 7-8, 2001, pp. 885-904.
- [Chébéane et Echalié, 1997] H. Chébéane et F. Echalié, An approach based on multiagents for the reactive control of manufacturing workshop, *IEPM conf.*, Lyon, 1997, pp. 206-215.
- [Chébéane et Echalié, 1999] H. Chébéane et F. Echalié, Towards the use of multi-agents event based design to improve reactivity of production systems, *Computer & Industrial Engineering*, vol. 37, 1999, pp. 9-13.
- [Chi et Turban, 1995] R.T. Chi et E. Turban, Distributed intelligent executive information systems, *Decision Support Systems*, vol. 14, 1995, pp. 117-130.
- [Cockburn et Jennings, 1994] D. Cockburn et N. R. Jennings, Archon: a Distributed Artificial Intelligence System for Industrial Applications, in *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, O'Hare and Jennings, eds., Chap. 4, Wiley Inter-Science, 1994.
- [Coudert, 2000] T. Coudert, Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement: application aux fonctions production et maintenance, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, décembre 2000.
- [David et Alla, 1989] R. David et H. Alla, *Du Grafcet aux réseaux de Petri*, Hermès, 1989.
- [Delsaut-Furon et al., 1999a] S. Delsaut-Furon, D. Trentesaux et C. Tahon, Industrial State of Art in Logistic Support and Future Trends, *International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, (Glasgow, Juillet 1999), Fucam (ed), ISBN 2-930294-03-5, Mons, Belgique, 1999, tome I, pp. 418-425.
- [Delsaut-Furon et al., 1999b] S. Delsaut-Furon, D. Trentesaux et C. Tahon, Soutien Logistique Intégré et Méthodologie de conception, *Journées JDA*, (Nancy, septembre 1999), pp. 321-324.
- [Delsaut-Furon et al., 2000] S. Delsaut-Furon, D. Trentesaux et C. Tahon, Le soutien logistique intégré pour la conception de systèmes sûrs de fonctionnement, 12^{ème} congrès $\lambda\mu$ '2000, (Montpellier, mars 2000), pp. 463-471.
- [Delsaut-Furon, 2000] S. Delsaut-Furon, Proposition de l'intégration du soutien logistique en phase de conception pour l'amélioration de la disponibilité des systèmes complexes et la maîtrise du coût global, thèse de doctorat de l'université de Valenciennes, décembre 2000.
- [Denis et al., 1995] B. Denis, J. J. Lesage et J. M. Roussel, A method for design and valuation of manufacturing system control architecture, *IEEE international conference on Systems, Man & Cybernetics*, Vancouver, Canada, Octobre, 1995, pp. 4486-4491.
- [De Smet, 1995] O. De Smet, Contribution à la planification et à l'ordonnancement de systèmes flexibles de production sujets à pannes, thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1995.
- [De Smet et Abou-Kandil, 1995] O. De Smet et H. Abou-Kandil, Ordonnancement temps-réel pour des systèmes flexibles de production sujets à pannes, *Revue d'Automatique et de Productique Appliquées*, vol. 8, n° 2-3,, 1995, pp. 291-296.
- [Dilts et al., 1991] D.M. Dilts, N.P. Boyd et H.H. Whorms, The evolution of control architectures for automated manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 10, n° 1, 1991, pp. 79-93.
- [Dindeleux, 1992] E. Dindeleux, Proposition d'un modèle et d'un système interactif d'aide à la décision pour la conduite d'atelier, thèse de doctorat, université de Valenciennes, 1992.
- [Dindeleux, 1998] R. Dindeleux, Propilot: une contribution à la modélisation des processus industriels, thèse de doctorat, Université de Savoie, 1998.
- [Doumeingts, 1984] G. Doumeingts, Méthode Grai: méthode de conception des systèmes en productique, thèse d'état, Université de Bordeaux I, 1984.
- [Doumeingts, 1990] G. Doumeingts, Méthodes pour concevoir et spécifier les systèmes de production, *CIM'90: productique & intégrations*, éd. productic A., Centre Méditerranéen du Commerce International, Marseille, 1990, pp. 89-103.
- [Duffie et Piper, 1986] N.A. Duffie et R.S. Piper, Non-Hierarchical Control of Manufacturing Systems, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 5, n° 2, 1986, pp. 137-139.

- [Duffie et Piper, 1987] N.A. Duffie et R.S. Piper, Non-hierarchical control of a flexible manufacturing cell, Robotics and computer integrated manufacturing, vol. 3, n° 2, 1987, pp. 175-179.
- [Duffie et al., 1988] N.A. Duffie, R. Chitturi, J.I. Mou, Fault-tolerant heterarchical control of heterogeneous manufacturing system entities, Journal of Manufacturing Systems, vol. 7, n° 4, 1988, pp. 315-327.
- [Duffie et Prabhu, 1994] N.A. Duffie et V. Prabhu, Real-time distributed scheduling of heterarchical systems, Journal of Manufacturing Systems, vol. 13, n° 2, 1994, pp. 94-107.
- [Duffie et Prabhu, 1996] N.A. Duffie et V. Prabhu, Heterarchical control of highly distributed manufacturing systems, international Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 9, n°4, 1996, pp. 270-281.
- [Dupas et al., 1999] M. Dupas, Y. Sallez, T. Berger et R. Soënen, Reconfiguration des systèmes automatisés de production, 3^{ème} congrès GI, Montréal, Canada, 1999, vol. 3, pp. 2007-2012.
- [Durand et Trentesaux, 1999] S. Durand et D. Trentesaux, Robustesses comparées de différentes fonctions de choix, Groupe de Travail Européen Aide Multicritère à la Décision, 50^{ème} journées, (Cerisy La Salle, France, septembre/octobre 1999), pp. 78-79.
- [Durand, 2000] S. Durand, Sur quelques paradoxes en théorie du choix social et en décision multicritère, thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 2000.
- [Durand et Trentesaux, 2000a] S. Durand et D. Trentesaux, Des indices de robustesses pour la méthode prudente et pour la fonction de choix de Borda, *Journal of Decision Systems*, ISSN 1166-8636, Hermès, vol. 9, n° 2, 2000, pp. 269-288.
- [Durand et Trentesaux, 2000b] S. Durand et D. Trentesaux, Robustness of choice function regarding weights of criteria, EURO XVII, (Budapest, Hongrie, juillet 2000), p. 73.
- [Erschler et al., 1997] J. Erschler, M.J. Huguet et G. de Terssac, Décision distribuée en gestion de production : exploitation et régulation de l'autonomie, in Concepts et outils pour les systèmes de production, coord. J.C. Hennet, éd. Cepadues, Toulouse, 1997, pp. 109-131 (ISBN 2-85428-437-2).
- [Feller et Rucker, 1989] A. Feller et R. Rucker, Extending Structured Analysis Modeling with A.I.: an application to MRPII profiles ans SFC data communications requirements specifications, Conférence IFIPS, 1989.
- [Ferber, 1995] J. Ferber, Les systèmes multi-agents – vers une intelligence collective, InterEditions, Paris, 1995 (ISBN 2-7296-0572-X).
- [Ferber, 1997] J. Ferber, Les systèmes multi-agents : un aperçu général, Techniques et science informatiques, vol. 16, n°8, 1997, pp. 979-1012.
- [Ferrarini et al., 1993] A. Ferrarini, L. Couvreur et D. Brun-Picard, A new decentralized approach for FMS control, proc. Of the 7th IEEE annual Computer European Conference on Computers in Design, Manufacturing and Production, Paris, Mai 1993, pp. 410-416.
- [Fontan et al., 1997] G. Fontan, C. Mercé et J.B. Lasserre, Structures décisionnelles multi-niveaux, in Concepts et outils pour les systèmes de production, coord. J.C. Hennet, éd. Cepadues, Toulouse, 1997, pp. 13-21 (ISBN 2-85428-437-2).
- [Forrester, 1980] J. W. Forrester, Principes des systèmes, traduit par P. Sylvestre-Baron, Presse universitaire de Lyon, 1980.
- [Giard, 1988] V. Giard, Gestion de la production, 2nd éd., Collection gestion, Paris, France, 1988.
- [Gjerdrum et al., 2001] J. Gjerdrum, N. Shah et L.G. Papageorgiou, A combined optimization and agent-based approach to supply chain modelling and performance assessment, Production, Planning & Control, vol. 12, n° 1, 2001, pp. 81-88.
- [Gouardères, 1999] E. Gouardères, Un modèle fonctionnel multi-agents pour le pilotage des systèmes de production, Conférence Mosim'99, 6-8 octobre, Annecy, 1999, pp. 345-350.
- [GRAISYHM, 1998] Rapport d'activité du Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée des Systèmes Homme-machine (Région Nord Pas de Calais), Mai, 1998, <http://www.univ-valenciennes.fr/graisyhm/>
- [Grudzien, 1999] L. Grudzien, Contribution à l'intégration de la sûreté de fonctionnement au sein d'une démarche de conception multimétiers, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, France, 1999.
- [Gunasekaran, 1999] A. Gunasekaran, Agile manufacturing: A framework for research and development, Int. J. Production Economics, vol. 62, 1999, pp. 87-105.

- [Gzara et al., 2002] M. Gzara, D. Trentesaux, S. Hammadi, C. Tahon et P. Borne, Fuzzy Multi-criteria scheduling support tool for complex industrial systems, *International Journal of Fuzzy Systems*, 2002.
- [Hachette, 2000] Hachette, Dictionnaire multimédia, 2000.
- [Hafri et Najid, 2001] Y. Hafri et N. M. Najid, Utilisation de l'approche multi-agents pour le pilotage en temps réel des systèmes de production, 3^{ème} Conférence MOSIM'01, Modélisation et simulation, Troyes, éd. SCS, A. Dolgui & F. Vernadat (éds), vol. 1, 2001, pp. 255-262.
- [Hammami et al., 2001] A. Hammami, P. Burlat et J. P. Campagne, Contribution à la conception et au pilotage d'une entreprise en réseau, 3^{ème} Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation, MOSIM'01 Troyes, 2001, pp.
- [Hirsch et al., 1996] B.E. Hirsch, Kuhlmann T., Massow C., Oehlmann R. et Thoben K.D., A conceptual system support framework for distributed product development and manufacturing, in *Life cycle modelling for innovative products and processes* (Berlin, Novembre/Décembre 1995), H. Jansen et F-L Kraüse (eds), Chapman&Hall, ISBN 0-412-75590-4, Londres, 1996, pp. 553-564.
- [Huguet, 1996] P. Huguet, Conception de systèmes de pilotage d'atelier : modèles de référence et adaptation d'une méthodologie objet, thèse de doctorat, université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.
- [Huhns, 1987] M. N. Huhns, *Distributed Artificial Intelligence*, research notes in artificial Intelligence, vol. 1, ed. Pitman, Londres, 1987.
- [IGL, 1989] I.G.L. Technology, SADT : un langage pour communiquer, éditions Eyrolles, Paris, France, 1989.
- [IMS, 2000] IMS Annual Progress Report, IMS International (ed), Japon, 2000, <http://www.ims.org>
- [Jacquet, 1998] L. Jacquet, Contribution à l'élaboration d'une démarche de spécification fonctionnelle, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, France, 1998.
- [Kallel, 1985] Kallel G., Proposition d'une conduite décentralisée coordonnée pour un atelier de fabrication, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 1985.
- [Khoo et al., 2001] L.P. Khoo, S.G. Lee et X.F. Yin, Agent-based multiple shop floor manufacturing scheduler, *International Journal of Production Research*, vol. 39, n° 14, 2001, pp. 3023-3040.
- [Kim et al., 1996] K. H. Kim, J. W. Bae, J. Y. Song et H.Y. Lee, A distributed scheduling and shop floor control method, *Computer and Industrial Engineering*, vol. 31, n° 3-4, 1996, pp. 583-586.
- [Kimemia, 1982] J.G. Kimemia, Hierarchical control of production in flexible manufacturing systems, Ph. D. thesis, MIT, 1982.
- [Koestler, 1967] A. Koestler, *The Ghost in the Machine*, Arkana Books, Londres, 1967.
- [Kondoh et al., 2000] S. Kondoh, Y. Umeda, T. Tomiyama, and H. Yoshikawa, Self Organization of Cellular Manufacturing Systems, *Annals of the CIRP*, Vol. 49, n°1, 2000, pp. 347-350.
- [Kouiss et al., 1997] K. Kouiss, H. Pierreval, N. Mebarki, Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 8, n° 1, pp. 41-47, 1997.
- [Kouiss et Pierreval, 1999] K. Kouiss et H. Pierreval H., Pilotage réactif d'une cellule flexible de l'Ifma, *Modélisation des systèmes réactifs – MSR'99*, (J.J. Lesage coord.), 1999, pp. 417-426.
- [Krothapalli et Deshmukh, 1997] N.K.C Krothapalli et A.V. Deshmukh, Effects of negotiation mechanisms on performance agent-based manufacturing systems, M.M. Ahmad et W.G. Sullivan (eds), *Proc. of the 7th international conference on flexible automation and intelligent manufacturing*, 1997, pp. 704-717.
- [LAMIH/SP, 2001] C. Tahon, D. Trentesaux, M. Sevaux, S. Galvani, O. Dussart, P. Herlem et J.M. Celeste, Gestion des flux du Centre Hospitalier de Valenciennes, Rapport intermédiaire de contrat LAMIH/CHV, 2001.
- [LAMIH/SP, 2002] C. Tahon, D. Trentesaux, M. Sevaux, L. Carette, R. Cipcia, M. Hongrois, J. Jolly et F. Passave, Etude du flux des plateaux repas (nouvelle UCPC), Rapport intermédiaire de contrat LAMIH/CHV, 2002.
- [Landau, 1996] I. D. Landau, *Identification et commande des systèmes*, Hermès, 2^{ème} éd., Paris, 1996 (ISBN : 2-86601-365-4).
- [Larousse, 2000] Larousse, Dictionnaire, 2000.

- [Lecompte-Alix, 2001] T. Lecompte-Alix, Un cadre formel de décision pour la planification multi-niveau des systèmes de production réticulaires, thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 2001.
- [Le Gallou, 1992] F. Le Gallou, B. Bouchon-Meunier (Coord.), Systémique, Théorie et applications, Technique & Documentation - Lavoisier, Paris, 1992.
- [Le Quéré, 2000] Y. Le Quéré, Analyse des problèmes de réactivité des ateliers de l'EIMM d'Hellemmes, rapport intermédiaire, LAMIH, 2002.
- [Le Quéré et al., 2001] Y. Le Quéré, M. Sevaux, D. Trentesaux et C. Tahon, Planification réactive des opérations de maintien et d'actualisation réglementaire et technologique des systèmes complexes, *International Conference on computer aided maintenance ; tools methods & technologies*, (Rabat, Maroc, Novembre 2001), pp. A15/1 – A15/12.
- [Le Quéré et al., 2002] Y. Le Quéré, M. Sevaux, D. Trentesaux et C. Tahon, Résolution d'un problème industriel de maintenance des TGV à la SNCF, congrès Roadef'02, (ENST Paris, février 2002), pp. 191-192.
- [Le Méhauté, 1990] A. Le Méhauté, Les géométries fractales, Hermès, traité nouvelles technologies, 1990.
- [Lemoigne, 1994] J.L. Lemoigne, La théorie du système général– théorie de la modélisation, éd. Presses universitaires de France, 1ère éd. 1977, 4ème éd. 1994.
- [Lhommeau et al., 2001] M. Lhommeau, L. Hardouin et B. Cottenceau, A propos de la commande juste-à-temps de systèmes à événements discrets décrits dans les diodes, Journées Doctorales d'Automatique, Toulouse, septembre, 2001, pp. 31-36.
- [Lhote et al., 1999] F. Lhote, P. Chazelet et M. Dulmet, The extension of principles of cybernetics towards engineering and manufacturing, *Annual Reviews in Control*, vol. 23, Pergamon, 1999, pp. 139-148.
- [Lieber et Napoli, 1999] J. Lieber et A. Napoli, Raisonnement à base de cas et résolution de problèmes dans une représentation à objet, *Revue d'intelligence artificielle*, vol. 13, 1999, pp. 9-35.
- [Lin et Soldberg, 1992] G. Y. Lin et J. J. Soldberg, Integrated shop floor control using autonomous agents, *IIE Transactions*, vol. 24, n° 3, 1992, pp. 57-71.
- [Longchamp, 1995] R. Longchamp, Commande numérique de systèmes dynamiques, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1995 (ISBN : 2-88074-282-X).
- [Lottaz et al., 2000] C. Lottaz, I.F.C. Smith, Y. Robert-Nicoud et B.V. Faltings, Constraint-based support for negotiation in collaborative design, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 14, 2000, pp. 261-280.
- [Lu et Yih, 2001] T-P Lu et Y. Yih, An agent-based production control framework for multiple-line collaborative manufacturing, *international journal of production research*, vol. 39, n°10, 2001, pp 2155-2176.
- [Luh et Cheng, 2002] G.C. Luh et W.C. Cheng, Behavior-based intelligent mobile robot using an immunized reinforcement adaptive learning mechanism, *Advanced Engineering informatics*, vol. 16, 2002, pp. 85-98.
- [Macchiaroli et Riemma, 2002] R. Macchiaroli et S. Riemma, A negotiation scheme for autonomous agents in job-shop scheduling, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 15, n° 3, 2002, pp. 222-232.
- [MacLean et al., 1987] C. R. MacLean et P. F. Brown, The architecture of the NBS factory automation research testbed, proceedings IFAC 10th trienal world congress, Munich, Allemagne, 1987.
- [Maione et Naso, 2001] B. Maione et D. Naso, Evolutionary adaptation of dispatching agents in heterarchical manufacturing systems, *international journal of production research*, vol. 39, n°7, 2001, pp. 1481-1503.
- [Mandiau et Grislin, 2002] R. Mandiau et E. Grislin, Systèmes multiagents, *Techniques de l'ingénieur, traité Informatique industrielle*, S 7 216, 2002, pp. 1-16.
- [Maoudji, 1999] H. Maoudji, Méthode de conception d'une structure de pilotage distribué d'une ligne de conditionnement, rapport de DEA en Automatique des systèmes industriels et humains, université de Valenciennes, 1999.
- [Massotte, 1999] P. Massotte, Auto-organisation dans les structures et les systèmes complexes, Conférence MOSIM'99, Modélisation et simulation des flux physiques et informationnels, G. Habchi & A. Haurat (eds), Annecy, octobre 1999, SCS International, Ghent, Belgique pp. 21-29 (ISBN 1-56555-176-1).

- [Massotte et Bataille, 2000] P. Massotte et R. Bataille, Future production systems : influence of self-organization on approaches to quality engineering, international journal of production economics, vol. 64, 2000, pp. 359-377 (ISSN 0925-5273).
- [Maturana et al., 1999] F. Maturana, W. Shen et D.H. Norrie, Metamorph : an adaptative agent-based architecture for intelligent manufacturing, International Journal of Production Research, vol. 37, n° 10, 1999, pp. 2159-2173.
- [Maturana et al., 1999] F. Maturana, W. Shen et H. Norrie, MetaMorph :an adaptative agent-based architecture for intelligent manufacturing, international journal of production research, vol. 37, n°10, 1999, pp. 2159-2173.
- [McCulloch, 1945] W. S. McCulloch, A Heterarchy of values Determined by the Topology of Nervous Nets, Bull. math. biophys., vol. 7, 1945, pp. 89-93.
- [Mebarki et al., 1996] N. Mebarki, H. Pierreval et K. Kouiss, Une approche multi-agents pour l'ordonnancement dynamique d'un système de production flexible, ingénierie des systèmes d'information, vol. 4, n° 5, 1996, pp. 621-636.
- [Meinadier, 1998] J. P. Meinadier, Ingénierie et intégration des systèmes, Hermès, Paris, 1998 (ISBN 2-86601-720-X).
- [Mélèze, 1972] J. Mélèze, L'analyse modulaire des systèmes de gestion, une méthode efficace pour appliquer la théorie des systèmes au management, Puteaux, Ed. Hommes et techniques, Paris, 1972.
- [Mercé et Fontan, 2001] C. Mercé et G. Fontan, hiérarchisation de la fonction planification, in Organisation et gestion de production, J. Erschler et B. Grabot (coord.), traité IC2, Hermès Sciences Publication, ISBN 2-7462-0265-4, Paris, 2001, pp. 51-88.
- [Mesarović et al., 1980] M. D. Mesarović, D. Macko et Y. Takahara, théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples, Economica, Paris, 1980 (ISBN 2-7178-0269-X).
- [Mesghouni et al., 1999] K. Mesghouni, P. Pesin, D. Trentesaux, S. Hammadi, C. Tahon et P. Borne, Hybrid approach to decision making for job-shop scheduling, *Production Planning and Control*, Taylor & Francis, ISSN 0953-7287, vol. 110, n° 7, 1999, pp. 690-706.
- [Meunier et Denis, 1997] P. Meunier et B. Denis, Validation du comportement dynamique des architectures de conduite des systèmes de production par simulation, 1^{ère} Conférence Modélisation et Simulation (MOSIM'97), Rouen, 1997, pp. 229-238.
- [Millot, 1999] P. Millot, Systèmes homme-machine et automatique, Journées Doctorales d'Automatique, JDA'99, Nancy, pp. 1-24.
- [Mintzberg, 1982] H. Mintzberg, Structure et dynamique des organisations, éd. Organisation, Paris, 1982. (ISBN 2-7081-0463-2)
- [Monteiro, 2001] T. Monteiro, Conduite distribuée d'une coopération entre entreprises – le cas de la relation donneurs d'ordres – fournisseurs, thèse de doctorat, INPG, 2001.
- [Monteiro et Ladet, 2001] T. Monteiro et P. Ladet, Formalisation de la coopération dans le pilotage distribué des flux interentreprises, JESA, vol. 35, n° 7-8, 2001, pp. 963-990.
- [Montreuil et al., 2000] B. Montreuil, J.M. Frayet et S. D'amours, A strategic framework for networked manufacturing, Computers in industry, vol. 42, 2000, pp. 299-317.
- [M'Rabet et al., 2001] M'Rabet W., T. Moncef, M. Ben Ahmed et D. Trentesaux, Système interactif d'aide à la reconfiguration des systèmes de production (SIAR), 3^{ème} conférence Modélisation et Simulation des flux physiques et informationnels, Mosim'01, (Troyes, 25-27 avril 2001), Dolgui A. & Vernadat F. (eds), SCS Europe (Ghent, Belgique), ISBN 1-56555-212-1, vol. 1, pp. 515-521.
- [Mulken, 1995] H. Mulken, De la vision interne à l'ouverture, La modélisation systémique en entreprise, C. Braesch & A. Haurat (éd.), Hermès, Paris, 1995 (ISBN : 2-86601-508-8), pp. 91-107.
- [Murata et al., 2001] S. Murata, E. Yoshida, H. Kurokawa, K. Tomita et S. Kokaji, Concept of self-reconfigurable modular robotic system, Artificial Intelligence in Engineering, vol. 15, 2001, pp. 383-387.
- [Neubert, 1997] G. Neubert, Contribution à la spécification d'un pilotage proactif et réactif pour la gestion des aléas, Thèse de Doctorat en Sciences, INSA de Lyon, 1997.
- [Niel, 1999] Sécurité opérationnelle des systèmes de production, Techniques de l'ingénieur, R 7 640, pp. 1-13.

- [Ochoa, 1997] Ochoa M., The Toyota production system: a study of its components, Bachelor of Sciences, MIT, 1997.
- [Okino, 1993] N. Okino, Bionic Manufacturing System, in Flexible Manufacturing System : past – present – future, J. Peklenik (ed), CIRP, Paris, 1993, pp. 73-95.
- [Okongwu, 1990] U. Okongwu, Contribution à la formalisation du concept de flexibilité des systèmes industriels, étude de cas pratique, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1990.
- [Ouelhadj et al., 1998] C. Ouelhadj, C. Hanachi, B. Bouzouia, F. Kara Hassan et Hadj-Mohamed, Multi-Agent System For Dynamic Control in Manufacturing Cells, 2nd IMACS IEEE International Multiconference CESA'98, Nabeul-Hammamet, Tunisia, April 1-4, 1998, pp. 387-391.
- [Ounnar, 1999] F. Ounnar, Prise en compte des aspects décision dans la modélisation par réseaux de Petri des systèmes flexibles de production, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 1999.
- [Oustaloup et al., 1996] A. Oustaloup, X. Moreau et M. Nouillant, The Crone Suspension, Control Engineering Practice, vol. 4, n° 8, 1996, pp. 1101-1108.
- [Parunak, 1985] H. V. D. Parunak, Manufacturing experienced with contract net, Proc. of Distributed Artificial Intelligence Workshop, Décembre, 185, pp. 67-91.
- [Parunak, 1994] H. V. D. Parunak, Applications of Distributed Artificial Intelligence in Industry, in Foundations of Distributed Artificial Intelligence, O'Hare and Jennings, eds., Chap. 4, Wiley Inter-Science, 1994.
- [Parunak et al., 1998] H. V. D. Parunak, A. D. Baker et S. J. Clark, The AARIA Agent Architecture: From Manufacturing Requirements to Agent-Based System Design, Proc. of the First International Conference on Autonomous Agents, ICAA'98, Minneapolis, MN, 1998.
- [Parunak et Brueckner, 2001] H. V. D. Parunak et S. Brueckner, Entropy and Self-Organization in Multi-Agent Systems, Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents, 2001, pp. 124-130.
- [Patriiti et al., 1997] V. Patriiti, K. Schäfer, M. ramos, P. Charpentier, P. Martin et M. Veron, Multi-agent and manufacturing- a multileve point of view, Proc. Of the IFIP international conference on Computer Applications in Production and Engineering (CAPE'97), F. Pionka et G. Olling (eds), Chapman & Hall, 1997, pp. 570-577.
- [Patriiti, 1998] V. Patriiti, Systèmes de pilotage auto-organisé et gammes distribuées : méthode de conception et application à une machine outil, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 1998.
- [Peeters et al., 2001] P. Peeters, H. Van Brussel, P. Valckenaers, J. Wyns, L. Bongaerts, M. Kollingbaum et T. Heikkilä, Pheromone-based emergent shop floor control system for flexible flow shops, Artificial Intelligence in Engineering, vol. 15, 2001, pp. 343-352.
- [Pellet, 1985] X. Pellet, Sur la hiérarchisation des décisions. Application à la conduite d'ateliers, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 1985.
- [Pesin et al., 1997] P. Pesin, D. Trentesaux et C. Tahon, The event filter concept : a way to improve the reactive management of complex industrial systems, *International conference on Industrial Engineering and Production Management*, (Lyon, octobre 1997), pp. 581-591.
- [Pesin et al., 1998a] P. Pesin, D. Trentesaux et C. Tahon, Proposal of an event filtering approach to improve the reactive management of complex industrial systems *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Hermès, ISSN 1269-6935, vol. 32, n°4, 1998, pp. 487-508.
- [Pesin et al., 1998b] P. Pesin, D. Trentesaux et C. Tahon, Towards a design methodology of a multi-agents structure integrating the human operator for the activity control of complex industrial systems, *17^{eme} European Annual Manual EAM'98*, (Valenciennes, décembre 1998), pp. 111-120.
- [Pétin et al., 1998] J. F. Pétin, B. Iung et G. Morel, Distributed intelligent actuation and measurement IAM system within an integrated shop-floor organisation, *Computers in Industry*, vol. 37, 1998, pp. 197-211.
- [Pomerol, 1997] J.C. Pomerol, Artificial Intelligence and human decision making, *EJOR*, n° 99, 1997, pp. 3-25.
- [Pujo et al., 1999] P. Pujo, N. Broissin, S. Meyer et J.C. Bertrand, Pilotage décentralisé des systèmes de production, congrès GI, Montréal, 1999, pp. 1975-1981.

- [Pujo et Ounnar, 2001] P. Pujo et F. Ounnar, Proposition d'un pilotage décentralisé auto-organisé et rapproché pour système automatisé flexible – application à un hub de transbordement robotisé fer/fer, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 35, n° 7-8, 2001, pp. 905-932.
- [Rabelo et al., 1999] R.J. Rabelo, L.M. Camarinha-Matos et H. Afsarlanesh, Multi-agent-based agile scheduling, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 27, 1999, pp. 15-28.
- [Rasmussen, 1983] J. Rasmussen, Skill, Rules and knowledge: signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, *IEEE SMC*, vol. 13, n° 3, 1983, pp. 257-266.
- [Rolstadas, 1995] A. Rolstadas, Entreprise modelling for competitive manufacturing, *International Journal of Control Engineering Practice*, vol. 31, 1995, pp. 43-50.
- [Ross, 1977] .D T. Ross, Structured Analysis (SA): a language for communicating ideas, *IEEE Trans. On Software Engineering*, vol. SE-3, n° 1, 1977.
- [Roubellat et al., 1995] F. Roubellat, J.C. Billaut et M. Villaumie, Ordonnancement d'atelier en temps réel: d'ORABAID à ORDO, *Revue d'Automatique et de Productique Appliquée*, Hermès, Vol. 8, n°5, pp. 683-713, 1995.
- [Roy et Bouyssou, 1993] B. Roy et D. Bouyssou, Aide multicritère à la décision : méthode et cas, *Economica*, Collection Gestion, Paris, 1993.
- [Roy, 1998] D. Roy, Une architecture hiérarchisée multi-agents pour le pilotage réactif d'ateliers de production, Thèse de doctorat, Université de Metz, 1998.
- [Roy et Anciaux, 2001] D. Roy et D. Anciaux, Shop-floor control : a multi-agent approach, *International journal of computer integrated manufacturing*, vol. 14, n° 6, 2001, pp. 535-544.
- [Sage, 2000] A. P. Sage, Complex systems and the IEEE-SMC society : the evolution and interaction of cybernetics, systems humans and organizations, Plenary talk, IEEE-SMC conference, 2000.
- [Samyn, 1998] K. Samyn, Taakverdeling in een gedistribueerd computersysteem, Koninklijke militaire school, rapport de projet pour l'obtention du grade d'ingénieur polytechnique, Bruxelles, 1998.
- [Sanchis et al., 2001] E. Sanchis, Z.Y. Pan et J.L. Selves, Agents logiciels mobiles, facilitateurs de l'émergence de solution en co-conception et en conception distribuée, 4ème congrès international de génie industriel (Aix/Marseille, juin 2001), J.C. Bertrand et J.P. Kieffer (eds), IUSPIM, ISBN 2-9517004-0-7, Marseille, vol. 1, 2001, pp. 45-55.
- [Schmidt, 1991] K. Schmidt, Cooperative work: a conceptual framework, in *Distributed decision making: cognitive models for cooperative work*, J. Rasmussen, B. Brehmer et J. Leplat (eds), pp. 75-110, Wiley, New-York, 1991.
- [Sénéchal et Trentesaux, 2002] O. Sénéchal et D. Trentesaux, Evaluation en phase d'exploitation du système de production, in *Evaluation des performances des systèmes de production*, C. Tahon (coord.), traité IC2, Hermès Sciences Publication, Paris, 2002.
- [Shen et Barthès, 1994] W. Shen et J.P. Barthès, A Distributed Architecture for Design Environment Using Asynchronous Cognitive Agents, *proc. of the Second Singapore International Conference on Intelligent Systems*, Singapore, 1994.
- [Shen et al., 1997] W. Shen, F. Maturana, D. Norrie et J.P. Barthès, Agent-based approaches for advanced CAD/CAM systems, *Proc. of the Fifth International Conference on CAD/Graphics*, Shenzhen, Chine, 1997, pp 609-615.
- [Shen et al., 1998] W. Shen, D. Xue et D.H. Norrie, An Agent-Based Manufacturing Enterprise Infrastructure for Distributed Integrated Intelligent Manufacturing Systems, In *Proceedings of PAAM'98*, Londres, 1998.
- [Shen et Norrie, 1999] W. Shen et D.H. Norrie, Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey. *Knowledge and Information Systems*, an International Journal, vol. 1, n° 2, 1999, pp. 129-156.
- [Shih et Srihari, 1995] W. Shih et K. Srihari, Distributed Artificial Intelligence in Manufacturing Systems Control, *Computer and Industrial Engineering*, vol. 29, n° 1-4, 1005, pp. 199-203.
- [Simon, 1977] H. A. Simon., *The new science of management decision*, Prentice-Hall, New-Jersey, USA, 1977.

- [Smith, 1980] R. G. Smith, The contract net protocol: High level communication and control in a distributed problem solver, *IEEE Transactions on Computer*, vol. C29, n°12, 1980, pp. 1104-1113.
- [Smith et Davis, 1981] R. G. Smith et R. Davis, Framework for cooperation in distributed problem solving, *IEEE transactions on system, man and cybernetics*, vol. 11, n° 1, 1981.
- [Sohier, 1996] C. Sohier, Pilotage des cellules adaptatives de production : apport des systèmes multi-agents, thèse de doctorat, ENS Cachan, 1996.
- [Sohier et al., 1998] C. Sohier, B. Denis et J.J. Lesage, eco-problem solving for the adaptive control of production systems : the casper project, 9th INCOM symposium, IFAC, Nancy/Metz, 1998, tome III, pp. 65-70.
- [Sousa et Ramos, 1999] P. Sousa et C. Ramos, A distributed architecture and negotiation protocol for scheduling in manufacturing systems, *Computers in Industry*, vol. 38, 1999, pp. 103-113.
- [Stroustrup, 1997] B. Stroustrup, *The C++ programming Language*, 3^{ème} Edition, Addison-Wesley, 1997.
- [Szelke et Markus, 1997] E. Szelke et G. Markus, A learning reactive scheduler using CBR/L, *Computers in Industry*, vol. 33, 1997, pp. 31-46.
- [Tahon et Trentesaux, 2001] C. Tahon C. et D. Trentesaux, Aide à la décision en gestion de production, in *Organisation et gestion de production*, J. Erschler et B. Grabot (coord.), traité IC2, Hermès Sciences Publication, ISBN : 2-7462-0265-4, Paris, 2001, pp. 171-218.
- [Takahashi et Nakamura, 2002] K. Takahashi et N. Nakamura, Decentralized reactive Kanban system, *European Journal of Operational Research*, vol. 139, 2002, pp. 262-276.
- [Tchako, 1994] J. F. N. Tchako, Contribution à la conception d'un système de pilotage distribué pour les systèmes automatisés de production, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1994.
- [Tchako et al., 1994] J. F. N. Tchako, B. Beldjilali, D. Trentesaux et C. Tahon, Modelling with coloured Petri nets and simulation of a dynamic and distributed management system for a manufacturing cell, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Taylor & Francis, ISSN 0951-192X, vol. 7, n° 6, 1994, pp. 323-339.
- [Tharumarajah et al., 1996] A. Tharumarajah, A.J. Wells et L. Nemes, Comparison of the bionic, fractal and holonic manufacturing systems concepts, *Int. J. of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 9, n° 3, 1996, pp. 217-226.
- [Tharumarajah, 1998] A. Tharumarajah, A Self-Organizing Model for Scheduling Distributed Autonomous Manufacturing Systems, *Cybernetics & Systems*, vol.29, n° 5, 1998, pp. 461-480.
- [Tharumarajah, 2001] A. Tharumarajah, Survey of resource allocation methods for distributed manufacturing systems, *Production, Planning & Control*, Taylor & Francis, vol. 12, n°1, 2001, pp. 58-68 (ISSN Print 0953-7287).
- [Thiel, 1993] D. Thiel, Enquête et analyse des décisions dans les systèmes de production, *APII*, vol. 27, n°2, 1993, pp. 167-188.
- [Thomin et Trentesaux, 1999] P. Thomin et D. Trentesaux, Modèle de simulation de convoyeurs à haute cadence, 2^{ème} conférence Modélisation et Simulation des flux physiques et informationnels, Mosim'99 (Annecy, octobre 1999), G. Habchi & A. Haurat (eds), SCS International, ISBN 1-56555-176-1, Ghent, Belgique, 1999, pp. 297-302.
- [Tomiyama, 1997] T. Tomiyama, A Manufacturing Paradigm Toward the 21st Century, *Integrated Computer Aided Engineering*, Vol. 4, n° 3, 1997, pp. 159-178.
- [Tonarelli et al., 2000] P. Tonarelli, D. Trentesaux et C. Tahon, Proposition d'un système d'information pour le pilotage du cycle de vie d'un produit complexe. Application au domaine de la construction, *2nd international conference on Decision Making in Urban and Civil Engineering*, (Lyon, novembre 2000), J.C. Mangin et M. Miramond (eds), ISBN 2-868-34-117-9, Lyon, 2000, tome II, pp. 969-980.
- [Tranvouez et al., 1999] E. Tranvouez, B. Espinasse et A. Ferrarini, Résolution coopérative et distribuée de problèmes : une application multi-agents au ré-ordonnement d'atelier, congrès GI, Montréal, 1999, pp. 1543-1552.
- [Tranvouez, 2001] E. Tranvouez, IAD et ordonnancement, une approche coopérative du réordonnement par systèmes multi-agents, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, 2001.

- [Trentesaux et Tahon, 1994] D. Trentesaux et C. Tahon, Modèle de communication inter-agents pour une structure de pilotage temps réel distribuée, *Revue d'Automatique et de Productique Appliquées*, vol. 7, n° 6, 1994, pp. 703-727.
- [Trentesaux et al., 1994] D. Trentesaux, R. Dindeleux et C. Tahon, A MultiCriteria Decision Support System for Dynamic task Allocation in a Distributed Production Activity Control Structure, *INRIA European Workshop on Integrated Manufacturing Systems Engineering*, (Grenoble, décembre 1994), pp. 383-393.
- [Trentesaux et Tahon, 1995a] D. Trentesaux et C. Tahon, DPACS : a self-adaptive production activity control structure, *INRIA/IEEE conference on emerging technologies and factory automation* (Paris, Octobre 1995), IEEE (ed), ISBN 0-7803-2535-4, Danvers, USA, 1995, Tome II, pp. 543-551.
- [Trentesaux et Tahon, 1995b] D. Trentesaux et C. Tahon, Dynamic and Distributed Production Activity Control : a multicriteria approach for task allocation problematic, *International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, (Marrakech, Maroc, avril 1995), pp. 137-154.
- [Trentesaux, 1996] D. Trentesaux, Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production, Thèse de Doctorat en Sciences, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [Trentesaux et al., 1996] D. Trentesaux, J. F. N. Tchako et C. Tahon, Distributed and multicriteria management tools for integrated manufacturing, in *Life cycle modelling for innovative products and processes* (Berlin, Novembre/Décembre 1995), H. Jansen et F-L Krause (eds), Chapman&Hall, ISBN 0-412-75590-4, Londres, 1996, pp. 576-588.
- [Trentesaux et al., 1997] D. Trentesaux, N. Moray et C. Tahon, Integration of the Human Operator into Responsive Discrete Production Management Systems, 7^{ème} int. Conf. EURO 1997, (Bruges, Belgique, mars 1997), p. 66.
- [Trentesaux et Tahon, 1998] D. Trentesaux et C. Tahon, Intégration de l'analyse multicritère pour le pilotage réactif des systèmes de production, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Hermès, ISSN 1269-6935, vol. 32, n°5-6, 1998, pp. 693-723.
- [Trentesaux et al., 1998a] D. Trentesaux, C. Tahon et P. Ladet, Hybrid Production control approach for J.I.T. scheduling, *Artificial Intelligence in Engineering*, Elsevier, ISSN 0954-1810, vol. 12, 1998, pp. 49-67.
- [Trentesaux et al., 1998b] D. Trentesaux, R. Dindeleux et C. Tahon, A MultiCriteria Decision Support System for Dynamic task Allocation in a Distributed Production Activity Control Structure, *Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Taylor & Francis, ISSN 0951-192X, Vol. 11 n°1, 1998, pp. 3-17.
- [Trentesaux et al., 1998c] D. Trentesaux, N. Moray et C. Tahon, Integration of the human operator into responsive discrete production management, *European Journal of Operational Research*, Elsevier, ISSN 0377-2217, vol. 109, n°2, 1998, pp. 342-361.
- [Trentesaux et al., 1999] D. Trentesaux, P. Pesin et C. Tahon, Pilotage adaptatif par contraintes des systèmes de production linéaires à haute cadence, in *Modélisation des systèmes réactifs* (Cachan, mars 1999), J.J. Lesage (ed), Hermès, ISBN 2-7462-0017-1, Paris, 1999, pp. 287-300.
- [Trentesaux et al., 2000a] D. Trentesaux, P. Pesin et C. Tahon, Distributed artificial intelligence for FMS scheduling, control and design support, *J. of Intelligent Manufacturing*, Kluwer Academic Publishers, ISSN 0956-5515, vol. 11, n° 6, 2000, pp. 573-589.
- [Trentesaux et al., 2000b] D. Trentesaux, J. P. Campagne et J. Erschler, A generic design framework for decentralized control: the DMU model, *2nd IFAC/IFIP/IEEE Conf. On Management and Control of Production and Logistics, MCPL 2000* (Grenoble, juillet 2000), Z. Binder (ed), Pergamon, ISBN 0-08-043621 8, 1st edition, Oxford, Elsevier Science Ltd., vol. 3, 2001, pp. 1021-1026.
- [Trentesaux et Hammadi, 2001] D. Trentesaux et S. Hammadi, Méthodes de planification, d'optimisation et d'ordonnancement des systèmes complexes, exposé dans le cadre du projet MOST1, Béthune, mars 2001.
- [Trentesaux et Pujon, 2001] D. Trentesaux et P. Pujon, Pilotage distribué des systèmes de production, éditorial du numéro spécial du *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Hermès, ISSN 1269-6935, vol. 35, n° 7-8, 2001
- [Trentesaux et al., 2001a] D. Trentesaux, P. Pesin et C. Tahon, Comparison of Constraint Logic Programming and Distributed Problem Solving: a case study for interactive, efficient and practicable job-shop scheduling, *Computer and Industrial Engineering*, Elsevier, ISSN 0360-8352, vol. 39, 2001, pp. 187-211.

- [Trentesaux et al., 2001b] D. Trentesaux, M. Gzara, S. Hammadi, C. Tahon et P. Borne, D-Sign : un cadre méthodologique pour l'ordonnancement décentralisé et réactif, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Hermès, ISSN 1269-6935, vol. 35, n° 7-8, 2001, pp. 933-962.
- [Trentesaux et al., 2001c] D. Trentesaux, S. Delsaut-Furon et C. Tahon, Proposition d'un système de pilotage décentralisé pour l'aide à la conception de produits complexes, *4^{ème} congrès international de génie industriel* (Aix/Marseille, juin 2001), J.C. Bertrand et J.P. Kieffer (eds), IUSPIM, ISBN 2-9517004-0-7, Marseille, vol. 2, 2001, pp. 1187-1196.
- [Trentesaux et Sénéchal, 2002] D. Trentesaux et O. Sénéchal, Conduite des systèmes de production manufacturière, *Techniques de l'ingénieur*, 2002.
- [Trentesaux et Tahon, 2002] D. Trentesaux D. et C. Tahon, Ordonnancement distribué dans les ateliers flexibles, in *organisation et application des SMA*, R. Mandiau, E. Grislin Le Strugeon, A. Péninou (éds), Hermès Sciences Publication, Paris, 2002, pp. 293-305.
- [Ueda, 2001] K. Ueda, Synthesis and emergence - research overview, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 15, 2001, pp. 321-327.
- [Ueda et al., 2001] K. Ueda, A. Markus, L. Monostori, H.J.J. Kals et T. Arai, Emergent Synthesis methodologies for manufacturing, *Annals of the CIRP*, Vol. 50, n°2, 2001, pp. 536-551
- [Ulieru et al., 2000] M. Ulieru, D. Norrie, R. Kremer et W. Shen, A multi-resolution collaborative architecture for web-centric global manufacturing, *Information Sciences*, vol. 127, 2000, pp. 3-21.
- [Van Brussel et al., 1998] H. Van Brussel, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts et P. Peeters, Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA, *Computers in industry*, Elsevier, vol. 37, 1998, pp. 255-274 (ISSN 0166-3615).
- [Van Leeuwen et Norrie, 1997] E. H. Van Leeuwen et D. H. Norrie, Intelligent manufacturing: holons and holarchies, *Manufacturing Engineer*, vol. 76, n° 2, 1997, pp. 86-88.
- [Vautier, 2001] J.F. Vautier, Systèmes complexes : Présentation générale, *Techniques de l'ingénieur, traité L'entreprise industrielle*, AG 1 500, 2001, pp. 1-7.
- [Vernadat, 1999] F. Vernadat, *Techniques de modélisation en entreprise : applications aux processus opérationnels*, collection Gestion, éd. Economica, Paris, 1999 (ISBN 2-7178-3853-8).
- [Waldo et al., 1994] J. Waldo, G. Wyant, A. Wollrath et S. Kendall, A note on distributed computing, rapport Sun Microsystems, SMLI TR-94-29, 1994.
- [Wang et Lee, 2000] J. S. Wang et C. S. G. Lee, Structure and Learning in Self-Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems, *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 2, n°1, 2000, pp 12-22.
- [Warneke, 1993] H. J. Warneke, *The fractal company*, Springer Verlag, 1993.
- [Wiener, 1948] N. Wiener, *Cybernetics or Control and Communication in the animal and in the machine*, Hermann, Paris, 1948.
- [Zhang et al., 2000] X Zhang, S. Balasubramanian, R. W. Brennan et D. H. Norrie, Design and implementation of a real-time holonic control system for manufacturing, *Information Sciences*, vol. 127, 2000, pp. 23-44.
- [Zwingelstein, 1995] G. Zwingelstein, *Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels, traité des nouvelles technologies*, éd. hermès, Paris, 1995.
- [Zwingelstein, 1996] G. Zwingelstein, *La maintenance basée sur la fiabilité – guide pratique d'application de la RCM, diagnostic et maintenance*, éd. Hermès, Paris, 1996.

Annexes

I Annexe 1 : Liste des principaux acronymes

Les principaux acronymes utilisés dans ce document sont les suivants (ordre alphabétique) :

CHV : Centre Hospitalier de Valenciennes.

CNAM : Centre Nationale des Arts et Métiers.

DEA IU : Diplôme d'Etudes Approfondies en Ingénierie Urbaine.

EIGIP : Ecole d'Ingénieur en Génie Informatique et Productique.

EIMM : Etablissement Industriel de Maintenance du Matériel TGV.

ENSAIT : Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries textiles.

ENSIAME : Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Informatique, Automatique, Mécanique, Energétique et Electronique de Valenciennes.

ENSIEG : Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs Electriciens de Grenoble.

ENSIMEV : Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Mécanique et en Energétique de Valenciennes.

GHC : Action Spécifique « Gestion Hospitalière Coopérative » du CNRS-STIC.

GRAISYHM : Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Hommes/Machines – région Nord Pas de Calais.

GRP : Groupement de Recherche en Productique.

GRRT: Groupement Régional Nord Pas de Calais pour la Recherche dans les Transports.

I3D : Interaction, Image & Ingénierie de la Décision.

INPG : Institut National Polytechnique de Grenoble.

INRETS : Institut National de recherche sur les transports et leur sécurité.

IUP ELC : Institut Universitaire Professionnalisé en Economie et logistique de la construction.

LAG : Laboratoire d'Automatique de Grenoble.

LAMIH : Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines.

LAIL : Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille.

LGI2A : Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois.

LIRMM : Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro-électronique de Montpellier.

MOST : Méthodologies pour l'Optimisation dans les systèmes de Transports et de Télécommunications.

SART : Système d'aide à la régulation de trafic du réseau de transport.

SHM : Equipe « Systèmes Homme-Machine » du LAMIH.

SP : Equipe « Systèmes de Production » du LAMIH.

TACT : Technologies Avancées dans le domaine de la Communication et des Transports.

UVHC : Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

II Annexe 2 : résumé des thèses co-encadrées

Dans cette annexe, sont donnés les résumés des thèses co-encadrées. Les résumés des thèses de S. Delsaut-Furon et Y. Le Quéré sont détaillés dans le chapitre III. Les résumés des thèses de W. M'Rabet et S. Bousbia sont donnés dans le chapitre IV. Cette annexe fournit également un certain nombre d'informations complémentaires relatives au contexte des thèses co-encadrées : dates, nature de la thèse, publications relatives, etc.

II.1 Thèse de Stéphanie Delsaut-Furon

Début de la thèse : 03/1997.

Date de soutenance : 20/12/2000 (Mention : Très Honorable).

Co-encadrement : 70% sous la responsabilité du professeur C. Tahon.

Nature de la thèse : BDI-CNRS.

Titre : Contribution à la mise en oeuvre du Soutien Logistique: éléments méthodologiques pour une conception fondée sur un modèle de produit global.

Situation actuelle du docteur : ingénieur conseil au sein de la société Ligeron SA.

Publications : [Delsaut-Furon et al., 1999a], [Delsaut-Furon et al., 1999b], [Delsaut-furon et al., 2000], [Trentesaux et al., 2001c].

Résumé de la thèse [Delsaut-Furon, 2000] :

La conception de systèmes complexes (train, avion, char, etc.) constitue un problème industriel actuel important. En effet les entreprises doivent fournir des systèmes toujours plus sûrs, de meilleure qualité, dans des délais courts et répondant à l'ensemble des exigences de leurs utilisateurs. Ces contraintes impliquent pour les industriels de fournir des systèmes globalement performants, c'est-à-dire rentables pour l'entreprise et répondant aux besoins des utilisateurs tout au long du cycle de vie de ces systèmes. Cette caractéristique met intuitivement en évidence l'importance de la conception des systèmes complexes mais aussi leur soutien logistique durant leur utilisation.

Ces remarques nous ont menés à réfléchir sur la performance globale d'un système et comment l'obtenir. C'est ainsi que, dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à la performance globale des systèmes complexes. Plus particulièrement, étant donnée l'importance de la phase de conception, nous nous intéressons à la prise en compte du soutien logistique des systèmes complexes durant cette phase.

En premier lieu, nous avons précisé les concepts fondamentaux – système, cycle de vie et performance globale – sur lesquels s'appuient nos travaux. Dans un second temps, un état de l'art des méthodes de conception contribuant à la recherche de la performance globale a été réalisé. L'analyse de ces méthodes montre qu'elles ne sont pas totalement adaptées à la recherche de la performance globale. En effet nous montrons que la plupart d'entre elles ne mettent en œuvre qu'une partie des phases et traitements requis.

C'est pourquoi, nous avons développé un modèle de produit et un processus de conception constituant notre proposition de méthode de conception, contribuant à la recherche de la performance globale. Nous avons établi les spécifications du processus de conception et avons mis en évidence d'une part les liens organisationnels existant entre un processus, et plus particulièrement un processus de conception, et un projet, et d'autre part l'intérêt de la notion de pilotage de la conception. Nous avons alors précisé le modèle de processus de conception permettant l'élaboration du modèle de produit. Un système de pilotage décentralisé de type (<DEC, II, O>, <EDP, E, Ra>) a été proposé.

Nous avons appliqué nos travaux à un système de transport ferroviaire. Développée au sein de la société Alstom Transport, Unité de Valenciennes, cette étude nous a permis de valider une partie de nos propositions. Toutefois, les gains réels n'ont pu être chiffrés, l'étude industrielle n'étant pas terminée. Suite à la soutenance de cette thèse, un dépôt de brevet est à l'étude.

II.2 Thèse de Yann Le Quéré

Début de la thèse : 05/2000.

Date de soutenance prévue : 12/2003.

Co-encadrement : 50% en collaboration avec Marc Sevaux, maître de conférences LAMIH/SP sous la responsabilité du professeur C. Tahon.

Nature de la thèse : convention CIFRE avec l'EIMM (« Etablissement Industriel de Maintenance du Matériel »), Hellemmes.

Titre : Proposition d'un système de planification de projets réactive et décentralisée. Application à la maintenance des TGV.

Publications : [Le Quéré et al., 2001], [Le Quéré et al., 2002], [Le Quéré, 2000].

Résumé de la thèse :

L'EIMM doit faire face à un accroissement régulier du nombre de rames livrées en retard. Les causes relevées sont principalement celles relatives à :

- un accroissement régulier du nombre de rames à traiter pour un temps de cycle (durée d'immobilisation des véhicules) sans cesse en réduction,
- un accroissement de la complexité des produits,
- une méconnaissance a priori des opérations à effectuer,
- une absence de rationalisation des flux d'informations et de décision

L'objectif est de faire évoluer le pilotage des ateliers réduit actuellement à une activité de planification fortement figée vers un système de pilotage plus réactif et adaptatif capable de s'adapter à l'évolution de plus en plus rapide du produit et des opérations.

L'action proposée porte sur les aléas qui provoquent les jours de retard. Nous avons proposé, compte-tenu des problématiques présentées précédemment, un système de pilotage décentralisé organisé de classe II. L'approche adoptée consiste ainsi à améliorer la capacité d'information, de décision et de coopération des dirigeants d'unités pour réduire notamment les temps de réaction et améliorer la qualité des décisions.

La proposition porte sur les éléments suivants :

- la définition et mise en œuvre d'un processus de planification et de réaction basé sur un ordonnancement robuste des tâches,
- la modélisation d'un système de pilotage décentralisé de type (<DEC, II, O>, <EDP, E, Ra>),
- La définition et mise en œuvre d'un système d'information.

Ce travail doit aboutir à l'élaboration d'un prototype de simulation du fonctionnement de l'ensemble du système de pilotage puis à une mise en œuvre sur le site.

II.3 Thèse de Salah Bousbia

Début de la thèse : 09/2001

Date de soutenance prévue : 2004

Co-encadrement : 80% sous la responsabilité du professeur C. Tahon.

Nature de la thèse : MRE.

Titre : Maîtrise et amélioration des performances globales des systèmes de pilotage distribué.

Publications : [Bousbia et Trentesaux, 2002].

Résumé de la thèse :

Dans une économie de vitesse et de variété, les exigences de réactivité, de réduction des délais et des coûts entraînent à la fois un accroissement de l'autonomie des unités de production et une externalisation ou une délocalisation de nombreuses activités (problématique intra-entreprise), ainsi que des dépendances entre entreprises de plus en plus fortes (problématique interentreprises).

Dans ce contexte d'entreprise étendue et de décision distribuée, des organisations (du niveau de l'atelier de production jusqu'aux niveaux les plus élevés des entreprises) combinant les logiques de réseaux et de hiérarchie sont mises en place. Ces nouvelles formes d'organisation ne peuvent être abordées d'un simple point de vue de gestion opérationnelle locale. Il importe au contraire de mettre en œuvre de nouveaux mécanismes de coordination et de coopération assurant la synchronisation des flux pilotés et la cohérence des décisions prises.

Malgré une forte implication de la communauté de recherche pour répondre à cette problématique, peu de recherches sont menées afin d'intégrer des mécanismes qui permettent, par capitalisation et ré-utilisation des expériences, non seulement de maintenir, mais également d'améliorer les performances globales.

L'objet de cette thèse est ainsi d'apporter, dans un cadre formalisé rigoureux, quelques éléments en réponse à cette problématique. La première année de la thèse a été consacrée à l'analyse de l'état de l'art et un article accepté à la conférence IEEE-SMC (octobre, 2002, Hammamet) nous permet de faire le point dans le domaine de l'auto-organisation. L'objectif est de proposer un système de pilotage distribué de type ($\langle \text{DIS}, \text{III}, \text{AO} \rangle$, $\langle \text{EPP}, \text{E}, \text{A} \rangle$). Les premiers modèles sont en cours de développement.

II.4 Thèse de Wiem M'Rabet

Début de la thèse : 09/2000

Date de soutenance prévue : 12/2003

Co-encadrement : 30% sous la responsabilité des professeurs C. Tahon / M. Ben Ahmed de la Faculté des sciences de Tunis.

Nature de la thèse : co-tutelle Franco-Tunisienne.

Titre : Vers un système de reconfiguration automatique des systèmes complexes par des agents intelligents.
Application : les systèmes de production.

Publications : [M'Rabet et al., 2001].

Résumé de la thèse :

La problématique de la thèse s'inscrit dans le cadre de l'intelligence artificielle et vise à élaborer des modèles qui permettent de construire et de simuler des agents capables d'évoluer dans un environnement incertain.

L'objectif de la thèse est de concevoir des agents artificiels capables d'assister des opérateurs humains dans la réalisation de tâches complexes quelles soient de nature cognitives et/ou perceptives, et de développer un système intelligent à double rôle, d'une part le pilotage temps réel et d'autre part la reconfiguration automatique des systèmes automatisés de production.

L'approche adoptée est de type $C = (\langle \text{DEC}, \text{III}, \text{O} \rangle, \langle \text{EDP}, \text{E}, \text{Ra} \rangle)$. Cette approche est fondée sur une décentralisation totale des capacités de décision parmi un ensemble de ressources pilotant un centre de production.

La coordination entre les différents centres de production doit être implantée au niveau local des EDP sans faire appel à un mécanisme central d'ordonnement. Nous utilisons pour cela l'approche multi-agent et nous exploitons les outils développés en informatique pour l'Intelligence Artificielle Distribuée (Coopération implicite, coordination, négociation inter-agents). Un premier modèle d'agent caractérisé par la mise en œuvre de méthodes lui permettant d'agir avec autonomie. Par exemple pour la réalisation de tâches non critiques effectuées par un robot mobile, l'autonomie est totale. Puisque les tâches de reconfiguration et de pilotage sont des tâches complexes qui nécessitent un contrôle humain, les agents artificiels agissent en interaction avec un ou plusieurs opérateurs humains. Dans ce cas, ils sont destinés à renforcer la sûreté de fonctionnement des systèmes en soulageant la charge de l'opérateur dans les situations critiques.

Les modèles sont en cours d'élaboration. Un prototype de simulation est en cours de réalisation.

III Annexe 3 : les neuf niveaux de complexité d'un système

Il existe 9 niveaux de complexité d'un système [Boulding, 1956] cité dans [Braesch et Haurat, 1995] et dans [Lemoigne, 1994] :

- niveau 1: le système est identifiable (différenciation avec l'environnement),
- niveau 2: le système est perçu actif (il fait quelque chose),
- niveau 3: le système est perçu actif mais sous une forme stable et régulière (il existe un mécanisme interne non erratique),
- niveau 4: le système s'informe (sur son comportement, sur le monde réel), émergence de l'information,
- niveau 5: le système est également capable de traiter son information pour élaborer son comportement : émergence de la décision,
- niveau 6: le système est capable de mémoriser les informations et autorise ainsi les traitements différés : émergence de la mémorisation,
- niveau 7: le système est capable de coordonner ces actions à chaque instant : émergence du pilotage,
- niveau 8: le système est capable d'élaborer de nouvelles formes d'action : émergence de l'imagination ou de l'intelligence,
- niveau 9: le système peut remettre en cause ses décisions : émergence de la conscience et de l'auto-finalisation.

Il est possible d'associer trois groupes de niveaux :

- niveaux 1, 2, 3 et 4: niveau machine,
- niveaux 5, 6 et 7: niveau vie,
- niveaux 8 et 9 : niveau humain.

Cette typologie en 9 niveaux est à l'origine du modèle fondamental OID de Lemoigne [Braesch et Haurat, 1995].

IV.1 Outils de modélisation

Les outils de modélisation identifiés dans l'état de l'art peuvent être regroupés en plusieurs catégories :

- Modèles fonctionnels :
 - SADT[Ross, 1977], [Igl, 1989], E-SADT [Feller et Rucker, 1989], analyse fonctionnelle.
- Modèles décisionnels :
 - Formalisme mathématique : méthodes exactes, heuristiques et méta-heuristiques, mono ou multicritère, décision automatisée ou aide à la décision [Trentesaux et al., 1998b], [Trentesaux et al., 1998c].
 - Intelligence artificielle : raisonnement à base de cas, inférences, modèles d'intentions et de croyances, propagation de contraintes, réseaux de neurones, éco-résolution, règles comportementales.
- Modèles de simulation :
 - modèles continus (à domaine de variable continue) : fonction de transfert, commande par état,
 - modèles discrets (à domaine de variable numérisée, temps discret ou continu) : réseaux de Petri, Grafset [David et Alla, 1989], graphes d'état, etc. (Systèmes à événements discrets – SED).

IV.2 Outils de mise en œuvre

Les mises en œuvre sont surtout réalisées à partir d'outils informatiques de simulation. Elles illustrent ainsi la faisabilité des modèles sans toutefois prouver cette faisabilité dans un cadre général et les mécanismes de vérification sont assez rares (bien que scientifiquement souhaitables). Le laboratoire Lurpa de l'ENS Cachan travaille toutefois dans ce sens, selon une approche originale [Denis et al., 1995], [Sohier et al., 1998].

Les outils utilisés sont:

- des langages de programmation de bas niveau: C++, Java, Lisp, SmallTalk, Prolog,
- des langages de programmation de haut niveau (programmation graphique): Simulateurs dédiés (Arena, Simple++, SimFactory, Quest, etc.),

On peut à ce niveau identifier trois types de mise en œuvre informatique :

- un premier type consiste à générer une exploitation centralisée (simulation centralisée) d'un système de pilotage distribué en mettant en œuvre au sein d'un unique processus l'ensemble du système distribué. L'on préfère parler de simulation car les problèmes d'asynchronisme et de communication sont fortement réduits (le processus gère séquentiellement et de manière synchrone chacune des entités avec une horloge unique).
- Une configuration plus évoluée consiste à distribuer les processus au sein d'un même calculateur (approche multi-thread). A une entité correspond au moins un 'thread' (tâche, process). Cependant, bien que les situations d'asynchronisme apparaissent, les problèmes de communication sont toujours simplifiés (accès direct en mémoire).
- L'étape la plus aboutie consiste à associer à une entité un calculateur spécifique. Dans ce cas, les problèmes d'asynchronisme et de communication sont à résoudre. L'analyse de la littérature montre cependant qu'une grande majorité des validations est réalisée via une simulation centralisée, ce qui réduit fortement la qualité de la validation. Peu d'expériences ont réellement abouti à des prototypes de pilotage distribué physiquement distribué.

Relevons enfin l'émergence de plusieurs approches modulaires de la programmation à notre avis prometteuses telles que les agents logiciels mobiles [Sanchis et al., 2001] ou les modules logiciels interconnectables en cours de développement au LGP de l'ENI de Tarbes. Un état de l'art détaillé est décrit dans [Shen et Norrie, 1999].

Annexe 5 : importance d'une caractérisation axiomatique de la décision

L'importance de l'approche axiomatique peut clairement être illustrée au travers de l'analyse de l'impact des phénomènes de compensation de l'exemple suivant (tableau 1). Soient à choisir parmi 3 alternatives possibles, a1, a2 et a3. Ces alternatives sont évaluées selon trois critères c1, c2 et c3 qui sont à maximiser et de poids respectifs 4, 3 et 2. Les évaluations sont données dans la table suivante, et dans deux cas de figure légèrement différents (la différence entre les deux se situe au niveau des évaluations de a3 par rapport à c2 et c3).

	c1	c2	c3
	4	3	2
	Max.	Max.	Max.
a1	5	15	20
a2	15	10	15
a3	20	20	30

	c1	c2	C3
	4	3	2
	Max.	Max.	Max.
a1	5	15	20
a2	15	10	15
a3	20	5	5

Tableau 1. Matrices de décisions.

Trois méthodes de résolution sont envisagées : une méthode par fonction d'optimisation globale additive, une méthode de type prudente et une méthode de type lexicographique.

La méthode par fonction d'optimisation globale additive est actuellement la plus répandue. Elle consiste à sélectionner l'alternative dont la somme pondérée par les coefficients des critères de ses évaluations est optimale (ici, maximale). Dans le premier cas et selon cette méthode, l'alternative a3 est sélectionnée, alors que dans le second cas, c'est l'alternative 2 qui est sélectionnée.

La méthode prudente constitue une généralisation de la méthode majoritaire fondée sur le principe plus général du min-in-favor [Bouissou et Pirlot, 1995]. Pour chaque critère, les alternatives sont classées dans l'ordre induit par leur performance. Le coefficient de surclassement d'une alternative a1 par rapport à une alternative a2 est la somme des poids des critères pour lesquels a1 est classée avant a2. La fonction de choix prudente consiste à choisir les alternatives pour lesquelles le coefficient de surclassement minimum par rapport à une autre alternative est le plus grand possible. On obtient donc les deux matrices de surclassement donnée tableau 2 (l'alternative de la ligne i surclasse l'alternative de la colonne j en ij).

	a1	a2	a3
a1	X	5	0
a2	4	X	0
a3	9	9	X

	a1	a2	A3
a1	X	5	5
a2	4	X	5
a3	4	4	X

Tableau 2. Matrices de surclassement.

Pour la matrice de surclassement représentée dans la table 4.a, on obtient $\min(a1) = 0$, $\min(a2) = 0$ et $\min(a3) = 9$. De même, pour la matrice représentée dans la table 4.b, on obtient $\min(a1) = 5$, $\min(a2) = 4$ et $\min(a3) = 4$. Dans le premier cas, l'alternative a3 est sélectionnée (maximin = 9), alors que dans le second cas, c'est l'alternative a1 qui est sélectionnée (maximin = 5).

La méthode lexicographique consiste à ordonner les critères selon un ordre d'importance (généralement identique à celui de l'ordre donné par les poids décroissants des critères, ce qui sera le cas ici : l'ordre est c1, puis c2 puis c3) puis à sélectionner l'alternative qui optimise le premier critère, et de prendre en considération les critères suivants si ex-aequo. Pour les matrices d'évaluations représentées dans les deux tables 3.a et 3.b, on obtient le même résultat : l'alternative a3 est sélectionnée car elle surclasse dans les deux cas les alternatives a1 et a2 pour le critère c1, sans ex-aequo.

Ainsi, dans le premier cas, les trois méthodes sont convergentes : la meilleure alternative est a3 alors que dans le second cas, chaque méthode sélectionne une des trois alternatives ! Laquelle de ces méthodes est la meilleure ? Ainsi, sur un exemple très simple, il est possible de mettre en évidence des comportements radicalement différents. Dans le premier cas de figure, on constate que l'alternative a3 est dominante car elle est meilleure que les deux autres sur tous les critères. Les trois méthodes « détectent » cet état de fait et sélectionnent logiquement cette alternative (ces méthodes respectent le principe de Pareto dominance). Dans le second cas de figure, il n'existe aucune alternative dominante et les divergences apparaissent. On constate cependant que la méthode

lexicographique conserve l'alternative a3 comme la meilleure, alors que les deux autres méthodes modifient leur sélection. Ceci illustre une propriété fondamentale, celle de compensation possible ou non au sein des méthodes de résolution candidates.

Cette caractérisation a été effectuée pour plusieurs méthodes de résolution couramment rencontrées en gestion de production. Elle est présentée dans le tableau 3.

Méthode Caractéristiques	Optimisation par somme pondérée	Méthode lexico- graphique	Prudence]	Prométhée I & II	Série des Electre	AHP
Nature des données	Cardinales	Ordinales, cardinales	Ordinales, Cardinales	Ordinales, Cardinales	Ordinales, Cardinales	Cardinales
Nature des critères	Vrai	Vrai	Vrai	Vrai / quasi	Vrai / quasi / pseudo, etc.	Vrai
Problématique de décision	Choix, Tri	Choix	Choix	Tri	Choix, Tri, Rangement	Choix
Pareto Dominance	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Compensation	Totale	Nulle	Partielle	Partielle	Partielle	Partielle
Prudence	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Analyse de sensibilité	Aisée	Aisée	Difficile	Aisée	Complexe	Aisée
Agrégation de critères	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Automatisation de la décision	Possible	Possible	Possible	Possible	Impossible (la notion de noyau ne permet pas de proposer systématiqueme nt une alternative)	Possible
Paramétrage	Pondération critères, normalisation	Ordre des critères	pondération critères	Pondération critères, nature des fonctions d'utilité, paramètres des fonctions d'utilité	Pondération critères, nature des fonctions d'utilité, paramètres des fonctions d'utilité, seuils de veto.	Aucun
Simplicité de la méthode	Elevée	Elevée	Moyenne	Elevée	Moyenne	Faible

Tableau 3. Caractérisations des principales méthodes de décision en gestion de production.

VI Annexe 6 : analyses industrielles réalisées dans le cadre du projet Jesmtic

Nous donnons les trois analyses industrielles dans le cadre du projet JEMSTIC (tableaux 4, 5 & 6).

Données globales								
Objectifs globaux	Satisfaire le client en nombre de train par rapport à la demande, en assurant un niveau de sécurité maximum, en augmentant la performance du service rendu.							
Que cherche-t-on ?	dynamiser le processus de coopération, augmenter la flexibilité du système global							
Sur quoi porte la coopération ?	partage d'information, négociation des objectifs locaux							
Contraintes globales	Cadre législatif (objectif sécuritaire) Nombre de rame disponible pour répondre aux grille horaires établies							
Entités coopérantes	huit entités : trois directions cinq établissements							
Problèmes de communication ?	problèmes liés à la dynamique du système d'information (aléas sur les activités de maintenance, aléas sur l'exploitation des rames) problèmes liés au mode de décision partagé.							
Autres informations	Les engagements sont pour l'instant contractualisés ce qui permet de travailler sur des données statiques, la responsabilité des aléas incombant uniquement à l'entité locale l'ayant subi							

Cas industriel

EIMM Hellemmes

Y Lequéré

Données locales								
Nom des entités	<i>Direction Grandes Lignes</i>	<i>Direction du Matériel et de la Traction</i>	<i>Directions régionales</i>	<i>EIMM Hellemmes</i>	<i>EIMM Bischheim</i>	<i>EIM chatillon</i>	<i>EIM Le Landy</i>	<i>EIM Paris Sud Est</i>
Objectifs propres	Répondre aux demandes du client	Assurer la sécurité d'utilisation des rames, réduire les coûts de maintenance et de modification du matériel	Réduire les coûts de maintenance	Réduire les délais d'immobilisation	Réduire les délais d'immobilisation	Réduire les délais d'immobilisation	Réduire les délais d'immobilisation	Réduire les délais d'immobilisation
Dimension et méthodes de mesure	Nombre de rame disponibles, performance du service rendu	niveau de sécurité, coût de maintenance	nombre d'agents	nombre de jours d'immobilisation	nombre de jours d'immobilisation	nombre de jours d'immobilisation	nombre de jours d'immobilisation	nombre de jours d'immobilisation
Profit attendu de la coopération	augmentation de la disponibilité, diminution du temps de mise en place des modifications sur l'ensemble des rames	sécurité maximale, réduction des coûts de maintenance	diminution des effectifs	productivité	productivité	productivité	productivité	productivité
Contraintes spécifiques	demandes des clients, contraintes d'exploitation	demande en nombre de rame	Budget total alloué	délais attribués, contraintes d'atelier	délais attribués, contraintes d'atelier	délais attribués, contraintes d'atelier	délais attribués, contraintes d'atelier	délais attribués, contraintes d'atelier
Tâches à réaliser	Grille horaire des rames, modifications à réaliser	Affectation des opérations (modification ou déposes d'organes) aux immobilisations (niveau 1,2,3,4,5) coordination des immobilisations	Affectation d'un nombre d'agents par établissement	Maintenance niveau 4 et 5	Maintenance niveau 4 et 5	Maintenance niveau 1,2,3	Maintenance niveau 1,2,3	Maintenance niveau 1,2,3

Tableau 4. Analyse industriel, cas EIMM.

Données globales	
Objectifs globaux	Dans un environnement concurrentiel et mondialisé, concevoir des services de téléphonie fixe ou mobile novateurs, utilisables et utilisés.
Que cherche-t-on ?	Dans une approche de coopération intégrative, à intégrer les multiples expertises métiers (téléphonie, logiciel, ergonomie, linguiste, marketing, financier, utilisateur) distribuées intervenant dans l'activité de conception de services ; à gérer les contraintes globales et privées ; à maîtriser les coûts, les délais, la qualité, la sécurité du développement de service (mise en place d'indicateurs) ; à gérer les versions (traçabilité de la conception) ; à assurer la compréhension inter-acteurs ; ...
Sur quoi porte la coopération ?	Les expertises multiples et distribuées sur les aspects structurel, fonctionnel et comportemental du service
Contraintes globales	Expertises multiples et distribuées; Temporelles séquentielles et parallèles; Coûts, délais, qualité, moyens; Compréhension par chaque acteur du vocabulaire métier des autres
Entités coopérantes	8 types d'entité différentes et coopérantes avec le chef de projet.
Problèmes de communication ?	Les entités sont géographiquement distribuées et des "passerelles de traduction" sont à mettre en place pour assurer la compréhension.
Autres informations	La modélisation de Produits services est propre de celle de Produits biens...

Cas industriel
France Telecom
P. Caulier

Données locales						
<i>Nom des entités</i>	<i>Téléphonie</i>	<i>Logiciel</i>	<i>Marketing</i>	<i>Financier</i>	<i>Ergonomie</i>	<i>Linguiste</i>
Objectifs propres	Adéquation du service aux réseaux supports.	Faisabilité logicielle du service.	Adéquation du service au marché ; utilité ; réponse à l'attente client ; "push" de service ; veille concurrence.	Respect du budget (investissement, fonctionnement), des délais ; retour sur investissement.	Utilisabilité du service ; qualité de service ; homogénéité des services ; respect de l'image de marque.	S'agissant de services essentiellement vocaux : homogénéité, cohérence vocale des services.
Dimension et méthodes de mesure	Nombre de version du service diminué ; supervision aisée du service ; réutilisabilité de solutions.	Conception plus rapide et plus efficace (moins de papiers, de réunions, de déplacements,...) ; réutilisabilité de solutions.	Impact social du service ; meilleure connaissance du service et de l'offre de service.	Indicateurs de coûts financiers et temporels du développement et de l'utilisation.	Prise en compte de son avis ; meilleure IHS.	Prise en compte de son avis ; meilleure IHS.
Profit attendu de la coopération	Prise en compte des contraintes de support réseaux dans la conception des services.	Prise en compte de l'utilisateur et de l'expertise en téléphonie ; meilleure réactivité ; éviter de refaire (réutiliser).	Augmenter l'offre de services ; répondre aux attentes clients ; maintenir la compétitivité.	Personnaliser par service les investissements et retours sur investissements.	Meilleure prise en compte de l'utilisateur.	Cohérence inter-services.
Contraintes spécifiques	Hébergement technique du services sur les réseaux.	Ressources logicielles et matérielles parfois hétérogènes et limitées ; performances du service.	Disposer d'indicateurs fiables ; devancer/susciter la demande.	Contraintes économiques ; gérer les priorités.	Vocabulaire spécifique ; productivité non immédiate ; nécessité d'un panel d'utilisateurs représentatifs.	Vocabulaire spécifique ; nécessité d'un panel d'utilisateurs représentatifs.
Tâches à réaliser	Modélisation et réalisation des couches basses.	Modélisation et réalisation des couches hautes.	Veiller au respect du cahier des charges ; intégrer des innovations récentes.	Définition des contraintes financières et veiller à leur respect.	Tests expérimentaux ; validation ergonomique ; mode d'emploi.	Tests expérimentaux ; validation ergonomique.
Moyens						
Autres informations						

Sont à gérer dans une aide à l'activité de conception de Produit coopérative et distribuée : les caractéristiques Produit ; les divers acteurs ; la coopération ; la distribution ; les ressources ; les multiples coûts ; les délais ; les gains ; la réutilisabilité ; les flux de connaissances, d'informations de contrôle, ... ; les versions ; les divers vocabulaires métiers ; la traçabilité ; ...

Tableau 5. Analyse industriel, cas France Télécom.

Données globales		
Objectifs globaux	Développer une démarche de progrès continu en améliorant le processus de conception des roulements	Cas industriel
Que cherche-t-on ?	A instrumenter le processus de conception concurrente	SNFA
Sur quoi porte la coopération ?	Le partage de connaissances et de savoir-faire.	O. Sénéchal
Contraintes globales	Diversité des acteurs : métiers (concepteurs, acheteurs, responsables qualité, ...), rôle (client, fournisseur, filiale...), culture (européens, américains, asiatiques), localisation (France, Angleterre, Suisse, Canada, Inde...); Le système obtenu devra être le plus autonome possible au niveau informatique (le moins possible de développements spécifiques, pas besoin d'un informaticien à temps plein pour faire vivre de système)	
Entités coopérantes	Sur une session de coopération, limitation des acteurs à 3 pour le partage d'applications, et jusqu'à une vingtaine pour la visio conférence.	
Problèmes de communication ?	La communication est le principal levier d'action envisagé sur la coopération. Il n'y a pas de problèmes particuliers de vocabulaire à résoudre.	
Autres informations	Le groupe SNFA vient de se faire racheter par le groupe allemand FAG !!!	

Données locales			
<i>Nom des entités</i>	<i>Bureau d'études</i>	<i>Interlocuteur filiales</i>	<i>Achats</i>
Objectifs propres	Apporter une solution technique aux spécifications du client dans les meilleures conditions de qualité, de délais et de coût	coordonner les efforts de recherche et développement entre filiales pour l'activité « machines-outils »	Assurer la prise en compte des critères commerciaux dans la majorité des négociations
Dimension et méthodes de mesure	Temps passé sur les études ; Nombre de modifications techniques exigées par le client	Nombre de contacts avec les filiales ; Nombre de déplacements	Nombre de documents papier supprimés
Profit attendu de la coopération	offrir une plus grande disponibilité au client (fournir un plus grand nombre de services) ; favoriser, le plus possible, la pénétration du client chez la SNFA ; avoir un retour d'information sur les potentiels de fonctionnement des roulements : transmis	l'amélioration de la transparence au sein des différents partenaires dans la mesure où ces derniers auront accès aux mêmes informations ; l'augmentation de la réactivité (diminution des pertes de temps liées à la recherche d'informations) ; la réduction	limitation de la production de documents papier ; passation et suivi de commandes via Internet ; utilisation d'Internet pour limiter les problèmes liés à l'importation des matières premières au niveau de la douane (certificat de conformité à l'expédition)
Contraintes spécifiques	Contraintes techniques et économiques de réalisation des roulements	différence de culture et d'organisation entre les entreprises ; niveau d'équipement informatique des entreprises du réseau informatique	Contact humain indispensable
Tâches à réaliser	Conception ; modifications techniques ; Expertises	Partage de connaissance technique ; Partage de connaissance commerciale	Echanges de plans et de CFR (Commande Fourniture Réception)
Moyens			
Autres informations	Migration prochaine du système de CAO Euclid vers CATIA		

REMARQUE : Nous ne disposons à ce jour que des points de vue d'une petite partie des acteurs concernés par la coopération (voir ci-dessous), sachant qu'il y a autant de types d'acteurs que de combinaisons des caractéristiques métier/rôle/culture/localisation décrites ci-dessus.

Tableau 6. Analyse industriel, cas SNFA.

VII Annexe 7 : validation des concepts proposés dans le cadre de la conduite d'ateliers de finition

Le modèle de l'agencement du système de conduite de l'atelier de finition est le suivant (figure 1).

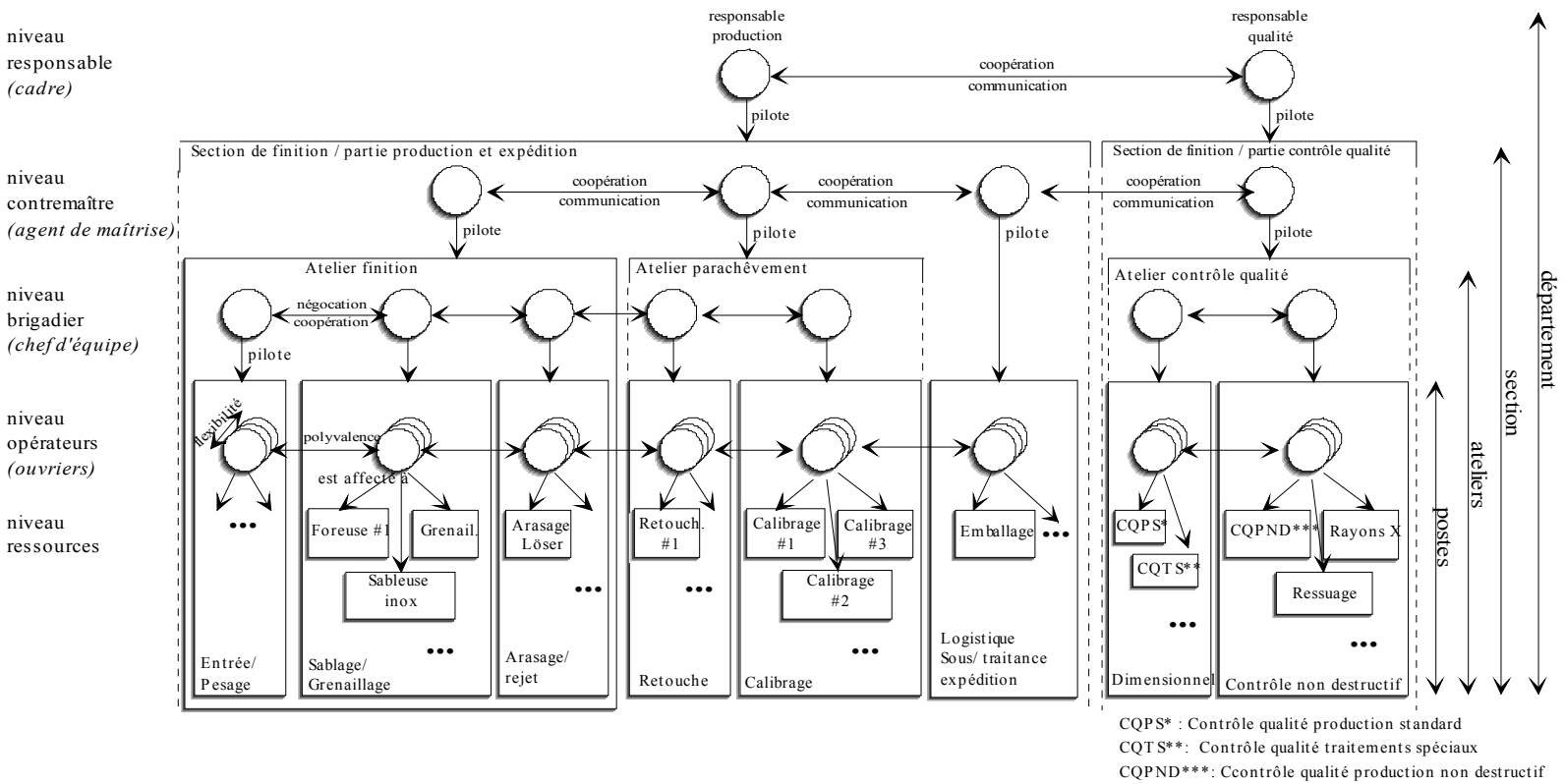


Figure 1. Agencement du système de conduite.

Le tableau 7 décrit les processus de conduite décisionnelle mis en oeuvre dans cet atelier.

Processus de pilotage décisionnel				
Contrôle		Supervision		
Décision, conception	Application	Déclenchement	Renseignement, évaluation	
Conduite des quantités	CQ1 : Choix mise au rebut O/N	Immédiat dès que pièce déclarée bonne ou mauvaise	Suite à une opération de contrôle (événementiel)	Données BE, relevés de contrôle
	CQ2 : choix correction rebut O/N (si non, destruction)	Jour	Périodique (quotidien)	Coût des retouches, nombre de retouches
Conduite des gammes	CG1 : choix création de gammes alternatives O/N	Immédiat	Si CQ2 = Oui et historique	Connaissances lots similaires, retours clients
	CG2 : choix annulation d'opérations O/N	Immédiat	Evénements spécifiques Ou si PGG1 génère redondance d'opération	Constat sur lot
Conduite des lots	CL1 : choix scission de lots O/N	Opérateur informé de la scission	Demande client (événementiel)	Données client
		Opérateur informé de la scission	si CQ1 = Oui (événementiel avec seuil)	Répartition pièces bonnes/mauvaises
	CL2 : choix blocage de lots ou libération du lot	immédiat	Demande client (événementiel)	Données client
		Immédiat	Anticipation demande client (événementiel)	Prévision besoins
		immédiat	Si CQ1 = Oui (événementiel avec seuil)	Répartition pièces bonnes/mauvaises
		Immédiat	Si absence outillage (événementiel)	Présence outillage
CL3 : choix blocage prioritaire d'un lot O/N	Immédiat force sur le lot en question la décision CL2 à l'état « blocage » (prioritaire)	si CQ1 = Oui (événementiel avec seuil)	Historiques, statistiques	
Conduite des ressources humaines	CRH1 : choix ré-affectation opérateurs sur postes O/N Si oui, choix poste affecté + choix opérateur	Jour	Urgence du lot, retard du lot (événementiel avec seuil)	Affectations actuelles, degré d'urgence ou de retard du lot, files d'attente, graphiques de charge
	CRH2 : Choix type de poste (1X8, 2X8, 3X8)	Semaine	Charge globale (événementiel)	Profil des charges/ateliers, files d'attente, type de poste actuel, politique établissement
	CRH3/CRH4 : choix chômage partiel ou appel à interim O/N Si oui, choix du poste affecté	Variable	Charge globale (événementiel)	Profil des charges/ateliers, type de poste actuel, politique établissement

Tableau 7. Détail des processus de conduite décisionnelle.

Enfin, le tableau 8 décrit, pour chaque processus de conduite, les ressources supports et les liens de coopération possibles.

Processus de conduite	support du processus	Liens de coopération avec...
CQ1	Opérateur de contrôle	-
CQ2	Contremaîtres	Autres contremaîtres et Responsables qualité
CG1	Brigadiers	-
	Opérateurs contrôle	-
CG2	Brigadiers	-
CL1	service commercial	planning
	Service assurance qualité	-
CL2	planning	Service commercial
	Planning	-
	Service assurance qualité	Service commercial
	Chef d'atelier concerné	-
CL3	Service assurance qualité	-
CRH1	Brigadiers	Autres brigadiers
CRH2	Contremaître	Responsable production
CRH3/CRH4	Responsable de production	Direction générale, représentants ouvriers, responsable personnel

Tableau 8. Liste des ressources supports et liens de coopérations possibles.