

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

---

UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département de Génie Industriel

---

**MEMOIRE**

PRESENTE AU

**Laboratoire d'Automatique et Productique**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MAGISTER**

Spécialité : Génie Industriel

Par

**Leila SOLTANI**

Ingénieur en informatique

**Thème**

---

**Les Systèmes Multi-Agent pour le Contrôle de  
Production**

---

Directeur de mémoire : Dr. F. ABDESSEMED

***JURY***

<b>Dr. L.H. MOUSS</b>	MC	Université de Batna	<i>Présidente</i>
<b>Dr. F. ABDESSAMED</b>	MC	Université de Batna	<i>Rapporteur</i>
<b>Dr. H. SMADI</b>	MC	Université de Batna	<i>Co-Rapporteur</i>
<b>Dr. Hocine. BENALLA</b>	PR	Université de Constantine	<i>Examineur</i>
<b>Dr. H. KALLA</b>	CC	Université de Batna	<i>Examineur</i>
<b>Mr. Elkamel. MERAH</b>	CC	C.U de Khenchela	<i>Invité</i>
<b>Mr. F. DEKHINET</b>	CC	Université de Batna	<i>Invité</i>

Année universitaire 2006-2007

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوْتَاطِئَ وَالنَّجْمَ الثَّاقِبَ  
وَمَا يَكُونُ إِلَّا فِي رَأْيِ عَالَمِ  
الْعَالَمِينَ

وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَىٰ  
وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَىٰ  
وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَىٰ  
وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَىٰ

وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَىٰ  
وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَىٰ  
وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَىٰ  
وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَىٰ

# REMERCIEMENTS

*Tout d'abord merci DIEU pour tes bienfaits et ton aide.*

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sien du **Laboratoire d'Automatique et Productique** (LAP) du département Génie Industriel de l'université de BATNA.

Je tiens à remercier, au terme de ce travail, le Dr.F. ABDESSEMED, Maître de conférence à l'université de BATNA, pour le sujet qu'il m'a proposé. Merci d'avoir accepté de suivre la réalisation du travail, pour les conseils, l'encouragement et la confiance.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude Dr.L.H. Mouss, Maître de conférence, Directrice du LAP, pour ces conseils et son soutien.

Je remercie infiniment Dr.H. Smadi, Maître de conférence, Vice-recteur de la pédagogie, d'avoir accepté le co-encadrement proposé par Dr.F. ABDESSEMED. Merci aussi pour les conseils.

Je remercie vivement les membres du jury qui m'on fait l'honneur de juger mon travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes collègues de promotion qui m'ont offert leur amitié et leur soutien.

Je remercie plus personnellement ma famille pour son soutien et sa compréhension tout au long de ce travail, et tout particulièrement S. Nouara, pour ces conseils et son aide.

*Merci*

*à tous les enseignants qui ont participé dans ma formation au cours des années.  
à tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.*

*A tout ceux qui j'aime même s'ils ne savent pas*

---

# RESUME

---

Aujourd'hui, les systèmes flexibles sont au cœur des préoccupations des entreprises quel que soit leur type de production. L'apport de ces systèmes est multiple, ils permettent l'amélioration de la productivité (grâce à l'augmentation du taux d'utilisation des machines), l'accroissement de la rentabilité (par une gestion de production évoluée permettant de minimiser les stocks de produits finis), l'amélioration des conditions de travail et l'accroissement de la qualité. Les performances de ces systèmes sont fortement liées aux performances de leur système de pilotage qui joue un rôle fondamental dans la maîtrise des activités de production et l'amélioration des performances du système flexible de production. En effet, et afin de surmonter leur complexité, leur coût de réalisation et d'assurer une rentabilité maximale de l'outil de production, une gestion très adaptée du système de production s'impose.

Du fait de la complexité des systèmes flexibles de production, constitués de machines complètement automatisées, le pilotage du système, aura un rôle primordial dans la réalisation de la production prévue dans un environnement dynamique et fortement perturbé. Ainsi, le système de pilotage doit être capable de gérer dynamiquement les ressources du système, et les différentes tâches qui doivent être réalisées. Aussi, il doit veiller à la parfaite coordination des systèmes de fabrication et de manutention tout en gérant les aléas apparaissant de manière quasi-permanente au cours de la production. Il doit assurer la synchronisation entre les flux de matière (matière première, produits finis ou semi-finis) et les flux d'information (gammes de fabrication, gammes d'assemblage, ...).

Le travail présenté dans ce mémoire expose une approche Multi-Agent pour le problème de pilotage en temps réel des systèmes flexibles de production en utilisant la problématique de l'intelligence collective et de l'émergence de structure par interaction. Par approche Multi-Agent le système de pilotage sera construit par un ensemble d'agent contrôlant les activités de fabrication tout au long du processus de production.

L'ordonnement des activités de production et leurs suivis sont des fonctionnalités émergentes de l'interaction entre les agents du système (les individus qui peuplent l'atelier de production). Le système ainsi conçu, permet d'assurer une gestion adaptée du système flexible de production tenant en compte l'état réel de celui-ci, en lui permettant de réagir et de s'adapter en fonction des objectifs de production, aux fluctuations des besoins et aux aléas du système.

L'approche présentée fournit une caractéristique de flexibilité au système de pilotage devant les différents changements et les nouvelles restructurations physiques de l'atelier de production (développement de nouveaux produits, ajout ou suppression de modèle de produits, ajout ou suppression des moyens de production), et aussi devant les changements des méthodes de gestion appliquées.

# SOMMAIRE

---

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **Chapitre I Les systèmes flexibles de production**

1. Introduction .....	4
2. Les systèmes de production .....	5
2.1. Définition d'un système de production.....	5
2.2. Evolution des systèmes de production .....	6
2.3. Les nouvelles caractéristiques des systèmes de production.....	8
3. Les systèmes flexibles de production .....	10
3.1. Qu'est ce que la flexibilité ? .....	10
3.2. Définition d'un système flexible de production.....	12
3.3. Classification des systèmes flexibles de production .....	13
3.4. Structure d'un système flexible de production .....	16
3.4.1. Système de fabrication .....	17
3.4.2. Système de manutention .....	18
3.4.3. Système de pilotage .....	19
4. Problèmes des systèmes flexibles de production .....	19
5. Avantages et inconvénients des systèmes flexibles de production.....	21
6. Conclusion.....	22

## **Chapitre II Les systèmes Multi-Agents**

1. Introduction.....	24
2. Agent et systèmes d'agents .....	25
2.1. L'Agent .....	25
2.1.1. Définition d'un agent.....	25
2.1.2. Architecture et comportement.....	26
2.1.3. Agent cognitif et réactif.....	29
2.2. Les systèmes Multi-Agents .....	32
2.2.1. Définition d'un système Multi-Agent .....	32
2.2.2. Organisation Multi-Agent.....	34
2.2.3. L'interaction dans les SMAs .....	35
3. Domaines d'applications des SMAs.....	38
4. Applications des SMAs dans l'industrie.....	41
5. Avantages et inconvénients des SMAs.....	43
6. Problèmes soulevés dans la conception de SMA.....	45
7. Conclusion.....	47

## **Chapitre III Pilotage des systèmes flexibles de production**

1. Introduction .....	48
2. La gestion des systèmes flexible de production .....	48

3.	Le système de pilotage en temps réel d'un SFP.....	51
3.1.	Pilotage et système de pilotage.....	51
3.2.	Le système de pilotage en temps réel.....	52
3.3.	Les architectures de pilotage .....	54
4.	Problématique de la conduite en temps réel.....	56
4.1.	La fonction conduite .....	56
4.2.	Intérêt d'un niveau décisionnel de conduite.....	57
4.3.	Approche existantes .....	58
4.3.1.	PAC.....	59
4.3.2.	ORABAID.....	61
4.3.3.	CODECO.....	61
4.3.4.	L'APPROCHE JUSTE A TEMPS.....	62
5.	Conclusion.....	63

## **Chapitre IV      Approche Multi-Agent pour le Pilotage en temps réel**

1.	Introduction .....	65
2.	Les fondements de l'approche.....	66
2.1.	Principes de base de la production .....	66
2.1.1.	Les populations impliquées dans la production.....	68
2.1.2.	Le principe d'indépendance individuelle.....	68
2.1.3.	L'interdépendance globale par rapport au but.....	69
2.2.	Pilotage du système de production.....	69
3.	Approche Multi-agent pour le pilotage en temps réel.....	70
3.1.	Principe.....	70
3.2.	Modélisation du système physique de production.....	71
3.3.	Modélisation Multi-agent d'un système de pilotage .....	73
3.3.1.	Organisation du SMA.....	74
3.3.2.	Mécanisme d'interaction .....	75
3.3.2.1.	L'appel d'offre .....	75
3.3.2.2.	Comportements sociaux .....	78
4.	Conclusion.....	81
	<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>82</b>
	<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>84</b>
	<b>Annexe.....</b>	<b>87</b>

# *Introduction Générale*

# *Introduction Générale*

La fonction production est la pierre angulaire de l'entreprise manufacturière. Son succès est directement lié à sa capacité de maintenir de façon constante une production de qualité supérieure et à moindre coût dans un environnement économique caractérisé par une forte compétitivité et une forte exigence clientèle (en matière de coût, de délai et de qualité). L'entreprise cherche donc et en continuité les moyens permettant d'utiliser au mieux les ressources de son système opérant et réagir le plus rapidement à la flexibilité de la demande.

Grâce aux progrès considérables des technologies, l'introduction d'un haut degré d'automatisation dans l'industrie manufacturière a conduit vers la construction d'ateliers de production de plus en plus autonomes et flexibles. Cependant, la performance de ces systèmes automatisés est conditionnée par la performance de leur système de conduite. Le degré d'automatisation, de réactivité et de flexibilité exigé des systèmes de production allant croissant. Le système de conduite pèse de plus en plus lourd dans leur conception à la fois sur le plan technique et sur le plan économique.

Le système de pilotage joue un rôle fondamental dans la maîtrise des activités de production et l'amélioration des performances du système flexible de production. En effet, et afin de surmonter leur complexité, leur coût de réalisation et d'assurer une rentabilité maximale de l'outil de production, une gestion très adaptée du système de production s'impose.

Les mécanismes habituels, centralisés et séquentiels, de conception, de planification, d'ordonnancement et de supervision se révèlent trop rigides et ne permettent pas aux entreprises de faire face, et encore moins d'anticiper les fluctuations du marché et l'évolution de la demande. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre une conduite au plus près, voire en temps réel, du système de production. Ceci signifie une gestion qui prenne en compte l'état réel de celui-ci, ainsi qu'une conduite réactive, permettant au système de réagir et de s'adapter, en fonction des objectifs de production, aux fluctuations des besoins et aux différents aléas.

Dans ce contexte, l'informatique sur laquelle s'appuie les entreprises doit intégrer de nouveaux concepts, s'appuyant sur de nouvelles technologies afin de proposer des

architectures logicielles permettant au système flexible de répondre et réagir dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe. Les années 80 ont vu l'apparition de nouvelles branches de l'intelligence artificielle délibérément orientées vers la réalisation de processus automatique intelligent, mais à l'inverse de l'intelligence artificielle classique, privilégiant l'aspect comportemental à l'aspect décisionnel.

La notion d'émergence est fortement liée aux systèmes Multi-Agents et à l'intelligence collective. C'est en effet dans les systèmes distribués comportant un nombre important d'éléments (tels les colonies d'insectes sociaux) que le phénomène émergent prend toute son ampleur : l'ensemble de la colonie présente des fonctionnalités (approvisionnement du groupe, soins au couvain, construction d'un nid,...) dont ne dispose aucun des agents locaux.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est d'aborder le problème de pilotage en temps réel des systèmes flexibles de production par une approche Multi-Agent. L'idée première, autour de laquelle s'articule ce travail, est l'idée de *fonctionnalité émergente*.

Les différentes fonctionnalités d'un agent autonome, quel qu'il soit, sont le produit de ses multiples interactions avec un environnement complexe. Dès lors, les spécifications d'un système ne sont explicites que par rapport à un contexte donné dans un environnement donné. Une conséquence directe du principe de fonctionnalité émergente est l'impossibilité, pour le concepteur du système autonome, de définir un algorithme de résolution (planification). Il doit au contraire concevoir une boucle d'interaction (entre le système et l'environnement) qui converge vers l'état souhaité.

Dans les systèmes flexibles de production, le système de pilotage a un rôle principal dans la réalisation de la production prévue dans un environnement dynamique et fortement perturbé. Le système de pilotage doit être capable de gérer *dynamiquement* les ressources du système, et les différentes tâches qui doivent être réalisées. Aussi, il doit veiller à la parfaite coordination des systèmes de fabrication et de manutention tout en gérant les aléas apparaissant de manière quasi-permanente au cours de la production.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres dont une brève description est donnée ci-dessous :

Le chapitre 1 présente dans un premier temps l'évolution des systèmes de production et leurs nouvelles caractéristiques dans le cadre de l'internationalisation des échanges. Ensuite, il présente une vue simplifiée des systèmes flexibles de production.

Le chapitre 2 vise à présenter un panorama simplifié des concepts liés aux notions d'agent et de système Multi-Agent. Il présente aussi les applications générales des SMAs et quelques applications industrielles.

Le chapitre 3 présente à travers les notions de pilotage et de système de pilotage la problématique de pilotage en temps réel des systèmes flexibles de production.

Enfin, le chapitre 4 présente le principe de l'approche et le modèle retenu pour la description du système physique de production et décrit l'architecture Multi-Agent proposée pour la conception des systèmes de pilotage des systèmes flexibles de production.

# *Chapitre I*

---

## *Les systèmes flexibles de production*

# 1. Introduction

Les activités de production constituent la base du système économique des nations, elles transforment les ressources humaines, matérielles et financières en biens et services. L'importance de ces activités impose aux entreprises, devant un marché fortement concurrentiel et une évolution importante en matière de production, de pouvoir s'adapter le plus rapidement possible aux changements et aux évolutions de la production.

Sous la pression concurrentielle, les entreprises sont contraintes d'offrir à leurs clients de la variété, des produits différenciés, nouveaux, innovants, peu chers et personnalisés, tout en assurant l'objectif final qui est bien évidemment la pérennisation de la rentabilité financière. Le souci de l'entreprise est donc de fabriquer des produits de qualité en quantité variante et à moindre coût! et de chercher les moyens à mettre en oeuvre pour atteindre ces buts.

L'entreprise industrielle, dans la vision taylorienne, dispose d'un système productif mettant en oeuvre les concepts d'organisation scientifique du travail proposés par Frederick W.Taylor. Cette organisation a permis la production d'un nombre important de produits, mais il s'agit toujours du même produit, sans variation possible. De plus, un autre point négatif est à mettre en évidence : comment absorber les à-coups de production provoqués par des perturbations dans des chaînes de fabrication composées de postes placés en série, reliés par des liaisons rigides ? et comment affronter les pertes de temps dues aux transferts et à l'attente des pièces ainsi que la multiplication des temps de réglage des outils de production.

Le premier pas accompli pour remédier à ces problèmes est l'introduction des machines à commande numérique. Il s'agit de machines-outils pourvues de nombreuses possibilités de réglage et capables de réaliser des opérations d'usinage aussi diverses que complexes. Ensuite, les progrès considérables de l'informatique et de la robotique ces dernières années ont permis l'introduction d'un haut degré d'automatisation dans l'industrie manufacturière qui s'est traduit par :

- # Une production élevée et régulière ;
- # Une amélioration de la qualité des produits ;
- # Une amélioration des conditions de travail et de sécurité.

Grâce à ces évolutions, les entreprises ont opté pour des nouveaux systèmes de production ayant des nouvelles caractéristiques, permettant la possibilité de répondre

rapidement aux désirs des clients, à moindre coût à l'aide d'une grande capacité de traitement des produits différents. Ces nouveaux systèmes ont permis la naissance de nouveaux types d'atelier de fabrication : les ateliers flexibles dont leur objectif est de concilier à la fois la productivité des lignes de production et la flexibilité des ateliers à tâches.

Aujourd'hui, l'atelier flexible est au cœur des préoccupations des entreprises quel que soit leur type de production, leurs apports sont multiples : l'amélioration de la productivité (grâce à l'augmentation du taux d'utilisation des machines), l'accroissement de la rentabilité (par une gestion de production évoluée permettant de minimiser les stocks de produits finis), l'amélioration des conditions de travail et l'accroissement de la qualité. Avec l'introduction de la notion de flexibilité, les systèmes de production doivent être non seulement capables de réaliser plusieurs types de produits, mais aussi de suivre l'évolution du marché et par conséquent de modifier progressivement les produits réalisés initialement au sein du système de production.

Dans ce chapitre, nous mettons en lumière les nouveaux systèmes de production. Nous commençons par une présentation de l'évolution des systèmes de production et leurs nouvelles caractéristiques. Ensuite, nous passons aux systèmes flexibles de production, nous expliquons ce que signifie le terme flexibilité et exposons la classification et la structure générale de ces systèmes.

## **2. Les systèmes de production**

### **2.1. Définition**

Un système de production -telle qu'il est présenté par la figure.1.1- est un ensemble d'éléments (Ressources Humaines, Machines, Techniques, Energie) déterminé à fin d'élaborer un flux de Produits (biens ou services) de valeur supérieure à partir d'un autre flux de Matières d'œuvre (Matière Premières, Produits Semi-Finis...). [1]

L'objectif de l'entreprise utilisatrice de ce système est de présenter sur le marché le produit le plus compétitif possible. Suivant son secteur d'activité et la nature de ses produits, leurs activités de production peuvent être assurées à travers différentes formes (transformation de matière, usinage de pièces, assemblage, ...).

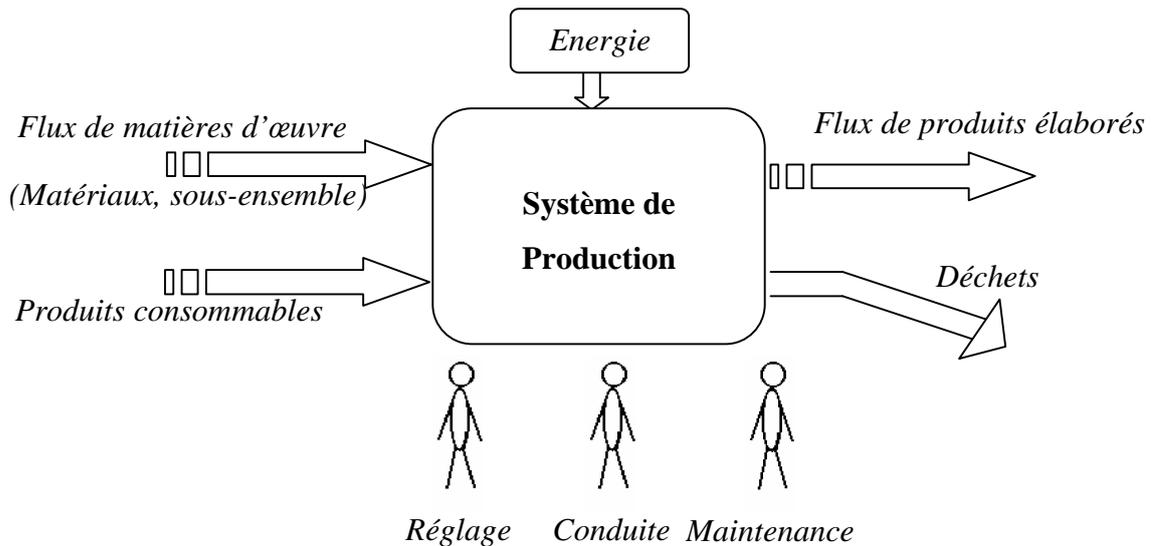


Figure .1.1. Système de Production [1]

## 2.2. Evolution des systèmes de production

Les différentes entreprises économiques rencontrées quotidiennement sont le produit de l'évolution et des changements qu'ont connus les systèmes économiques et sociaux tout au long des siècles passés. Partant de la production artisanale et arrivant aux systèmes flexibles; les systèmes de production ont connu plusieurs développements favorisés par des évolutions techniques, technologiques et économiques. Une liste non exhaustive de ces évolutions comprend :

- # La révolution industrielle qui a permis l'utilisation des différents types d'énergie (Vapeur, Charbon, Electricité, Pétrole) et l'apparition des machines industrielles.
- # La révolution scientifique concrétisée par la propagation de l'outil informatique, et son introduction dans tous les domaines (Communication, Fabrication, Formation, Gestion ...etc.)
- # La mutation du contexte économique d'une économie ordinaire vers une économie de marché. Ceci à imposer les entreprises industrielles de passer d'une production locale caractérisée par des séries de grande quantité de produits standard; à une production internationale caractérisée par des petites et moyennes séries de produits personnalisés.

La figure.1.2. cite quelques personnalités et évènements clés qui ont marqué le développement des systèmes de production au cours des deux cents dernières années.

Le moteur à vapeur de James Watt (1764) a permis l'utilisation de la puissance mécanique, et Adam Smith (1789) a encouragé l'investissement et le commerce, et la guerre civile, en

même temps que l'expansion du réseau ferroviaire, favorisa le premier développement de l'industrie américaine. La croissance des entreprises industrielles fut rapide car il n'avait aucun autre système de production en compétition, et il existait une importante main d'œuvre non qualifiée. [2]

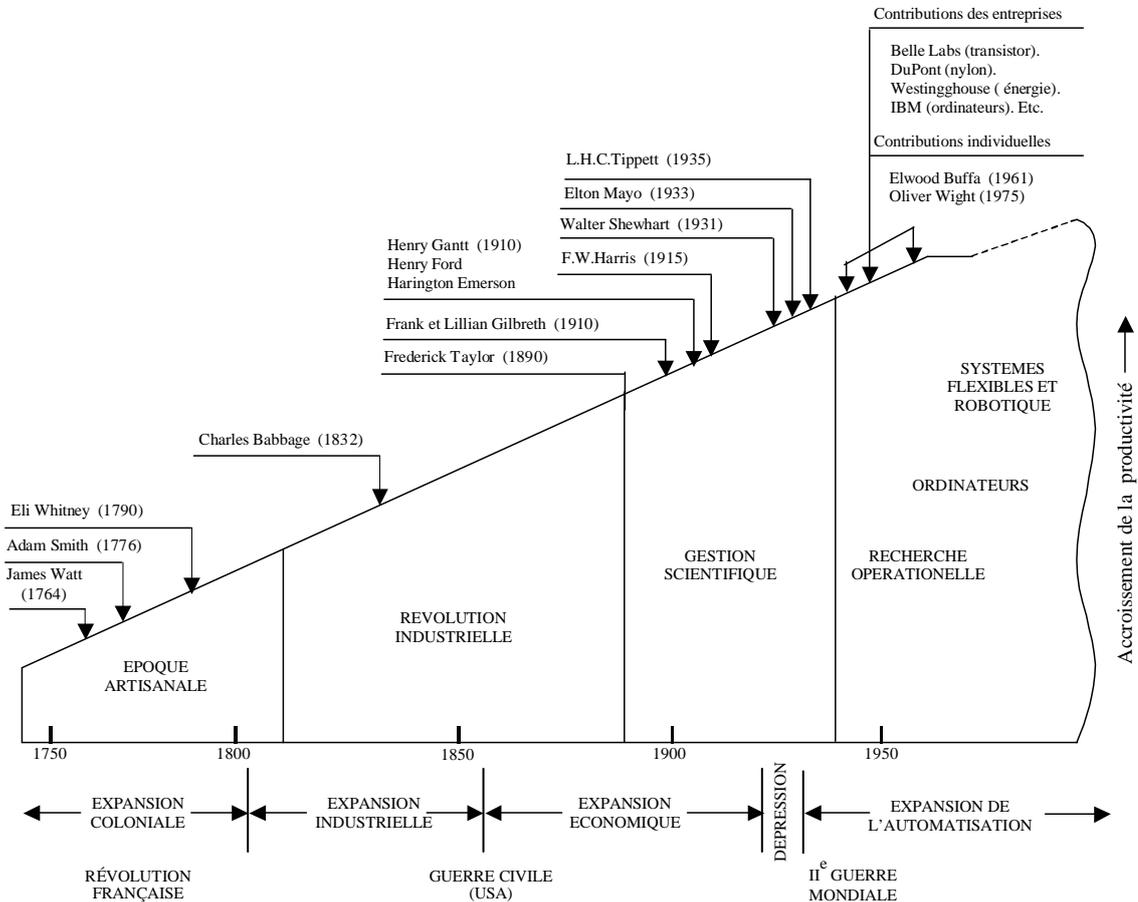


Figure .1.2. Personnalités et événements clés du développement des systèmes de production [2]

Dans les années 1900, Frederick Taylor fit un travail de 'bénédictin' dans le domaine de l'organisation scientifique du travail et fut, de ce fait, considéré comme le « père du management scientifique ». Comme il se créait de meilleures machines et des méthodes de contrôle plus performantes, l'industrie lourde s'orienta naturellement vers la production de masse. [2]

Vers le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, avec le développement des recherches techniques sur la production et celui des ordinateurs qui devenaient rentables, l'industrie est entrée dans un nouvel âge, celui de l'automatisation. Les ordinateurs permirent de donner aux responsables des informations en temps réel sur les marchés, les coûts, les niveaux de production et les stocks. Les industriels installèrent des « unités logiques » dans leurs équipements afin de fournir aux machines des instructions préprogrammées. L'utilisation

de machines à commande numérique et de robots a conféré aux unités de production une flexibilité leur permettant de répondre à des tâches élémentaires définies. Grâce aux robots, les méthodes de production souples peuvent produire des biens standards ou spécifiques dans des quantités qui n'étaient auparavant accessibles qu'à des moyens de production de masse figée et automatisée. [2]

### **2.3. Les nouvelles caractéristiques des systèmes de production**

Actuellement, les entreprises industrielles vivent une époque caractérisée par plusieurs changements: mondialisation, accroissement de la concurrence, évolution rapide de la technologie et l'incertitude du marché. En effet, depuis les années 1950, on peut distinguer trois phases dans l'environnement de l'entreprise [4]. Selon son secteur d'activités, l'enchaînement de ces trois phases dans le temps peut être différent.

La première phase représente une période de forte croissance avec un marché porteur, des marges confortables et une offre de biens inférieure à la demande. Il s'agit pour l'entreprise d'une période de sérénité où les fonctions essentielles sont techniques et industrielles, il faut alors produire puis vendre. Les principales caractéristiques de la production sont les suivantes : quantités économiques de production, stocks tampons entre les postes de travail, fabrication en série, délais fixés par le cycle de production, gestion manuelle. [4]

Lorsque l'offre et la demande s'équilibrent, nous atteignons une deuxième phase où le client a le choix du fournisseur. Il faut alors : produire ce qui sera vendu. Il est nécessaire de faire des prévisions commerciales, de maîtriser l'activité de production, d'organiser les approvisionnements, de réguler les stocks et de fixer les échéances.

Très rapidement, on passe à la phase suivante où l'offre excédentaire crée une concurrence sévère entre les entreprises face au client exigeant. Cette compétitivité implique :

- # La maîtrise des coûts ;
- # Une qualité irréprochable ;
- # Des délais de livraison courts et fiables ;
- # De petites séries de produits personnalisés ;
- # Le renouvellement des produits dont la durée de vie s'est raccourcie ;

# L'adaptabilité à l'évolution de la conception des produits et aux techniques de fabrication...etc. [4]

L'entreprise tend désormais à produire ce qui est déjà vendu. Ceci implique l'apparition des soucis de stratégie industrielle et de contrôle précis de la gestion. De plus, des contradictions se manifestent (prix-qualité, prix-petites séries, ...) qui nécessiteront des arbitrages pour obtenir une cohérence globale. [4]

Produire ce qui est déjà vendu, pour y parvenir les entreprises affrontent une profonde mutation de leur environnement technique et économique, cela a entraîné une transformation de la structure rigide des services d'approvisionnement ainsi que des services de conception de l'ère Taylorien en un réseau de domaines interconnectés et intégrés, qu'il faut gérer et optimiser globalement. Ainsi, les systèmes de production basés sur les principes du Taylorisme, qui ont fait largement leurs preuves dans le passé, doivent être fondus sur d'autres principes ayant des nouvelles caractéristiques, telles que la Flexibilité, la Réactivité, la Proactivité, l'Agilité, et la Robustesse [11]. L'acquisition des ces propriétés est liée à une réorganisation notable du système de production existant notamment au niveau de la conduite du système. Il faut noter qu'avec l'absence d'un consensus concernant ces concepts, il est délicat de définir avec précisions ces nouvelles caractéristiques ; et d'enlever l'ambiguïté qui les entoure.

#### *Flexibilité*

La flexibilité est la capacité d'une entreprise à s'adapter aux évolutions des demandes et de son environnement. Elle concerne toutes les ressources de l'entreprise et en particulier ses ressources humaines. La flexibilité d'un système de production se caractérise par sa capacité d'évoluer et de s'adapter aux circonstances (externes ou internes) pour répondre immédiatement et sans dégradation de ses performances à des ordres de fabrication différents.

#### *Réactivité*

Satisfaire les exigences commandées par le nouveau contexte impose au système de production d'être réactif, cela signifie d'être capable de s'adapter très vite et en permanence aux changements (fabrication multi-produits, introduction d'une commande urgente, modification d'une norme, etc.) ou aux aléas. Ces aléas peuvent provenir soit du système de production (défauts d'alimentation, défauts de réalisations d'une tâche, pannes des machines, rebuts) soit de son environnement (approvisionnements des matières premières).

La réactivité d'un système de production se définit ainsi comme l'aptitude à réagir dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe (aléa, situation nouvelle, perturbation, ...) par rapport à son régime de fonctionnement permanent et stable.

#### *Proactivité*

L'évolution rapide de l'environnement, la complexité croissante des processus de production conduisent à considérer comme nécessaire une adaptation permanente, dans un marché mondial et fortement concurrentiel. La réactivité est donc nécessaire, mais elle n'est pas suffisante et les systèmes de production doivent présenter une nouvelle propriété : la proactivité qui désigne la capacité de l'entreprise d'influencer les marchés et d'y introduire des produits nouveaux avant les concurrents.

#### *Agilité*

L'agilité, définit la capacité d'une entreprise à se reconfigurer en fonction des évolutions de son environnement, de son marché afin d'assurer une adaptation rapide aux évolutions. La production n'est pas seulement ou uniquement flexible, elle est globalement reconfigurable, et cela rapidement. L'agilité prend en compte la capacité à se remettre en cause sur la nature des produits, et considère la durée de vie des produits comme facteur principal de son organisation et de la définition de ses moyens de production.

#### *Robustesse*

L'exigence clientèle (quantité, qualité, délai) impose les concepteurs à pourvoir une certaine robustesse au système de production. Cette caractéristique fournit au système l'aptitude à produire conformément aux résultats attendus. Cela suppose la garantie de l'obtention des performances souhaitées en présence d'incertitudes dans le système.

## **3. Les systèmes flexibles de production**

### **3.1 Qu'est ce que la flexibilité ?**

La flexibilité fait actuellement l'objet d'un véritable débat de société et constitue en même temps un enjeu majeur pour la compétitivité des entreprises.

De manière générale, la flexibilité est définie comme une capacité d'adaptation sous la double contrainte de *l'incertitude et de l'urgence*. Il importe de préciser que c'est la conjonction de ces deux contraintes qui rend la flexibilité problématique. En effet, s'il n'y a pas d'incertitude, que ce soit dans la nature des problèmes rencontrés ou la façon de les résoudre, on connaît les difficultés à l'avance, et on peut rapidement mettre en place les

moyens de les résoudre. D'un autre côté, s'il y a incertitude mais pas d'urgence, on a alors le temps d'examiner en détail la nature des problèmes et d'y trouver des solutions optimales.

En ce qui concerne les systèmes de production, la flexibilité de l'entreprise signifie sa capacité d'adaptation à l'exaspération de la concurrence sur des aspects multiples, simultanés et potentiellement contradictoires que sont la diversité, la quantité, les coûts, les délais, la qualité et les services. Les entreprises doivent donc gérer à la fois l'incertitude ou l'imprévisibilité, ainsi que l'urgence « on ne sait pas à l'avance ce qu'il faut faire, mais il faut le faire vite ».[6]

Pour que l'entreprise puisse mettre en œuvre la flexibilité, elle doit adopter une démarche transversale [6] engageant en effet des décisions qui relèvent de plusieurs domaines:

- # *La stratégie* : diversification, innovation, investissement, décentralisation, logiques d'emploi (fidélité versus précarité) ;
- # *La production* : technologie, organisation (ligne, atelier), gestion de production ;
- # *Les ressources humaines* : logiques de compétence, définition des conditions d'acceptabilité sociale d'un système globalement plus efficace mais aussi plus exigeant ;
- # *Les systèmes d'information* : définition des supports de communication permettant un échange rapide et fiable des données ;
- # *Le contrôle de gestion* sous l'angle des indicateurs de performance et des modalités de coordination.

Nous nous intéressons, dans le cadre de ce travail, à ces solutions appliquées dans la production. Plus précisément, nous nous attachons à la tendance de *flexibilisation de l'outil de production*. En effet, une évolution particulièrement importante des techniques de production a pris place vers la fin des années 60, caractérisée par l'avènement de l'automatisation flexible de l'usinage. Cette dernière constitue le fruit de la conjonction entre une évolution des besoins (marché de plus en plus diversifié, éclatement des variantes, petits lots...) et une évolution de l'offre favorisée par les progrès technologiques réalisés dans les domaines de l'automatisation et de l'informatique (machine-outil à commande numérique, les robots industriels, automates programmables industriels...).

Avec l'automatisation flexible apparaît également la notion de système : des éléments de provenances diverses sont associés entre eux pour constituer *un système automatisé de production*. Ces systèmes offrent la possibilité de répondre rapidement aux désirs des clients à moindres coûts à l'aide d'une grande capacité à traiter des produits différents et du haut niveau d'automatisation.

### 3.2. Définition d'un système flexible de production

Actuellement, la plupart des entreprises industrielles ont pour but principal de fabriquer des pièces diverses en petites et moyennes séries d'une manière aussi efficace qu'en grandes séries. Pour assurer cet objectif un compromis doit être trouvé entre les objectifs contradictoires de flexibilité et de productivité. La solution à ce dilemme est le *système de fabrication automatisé*, plus connu sous le nom d'*atelier de fabrication flexible* ou simplement *Atelier Flexible*, ce nom est une traduction plus ou moins proche, mais communément adoptée, du vocable anglais "*FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM*", souvent abrégé en *FMS*.

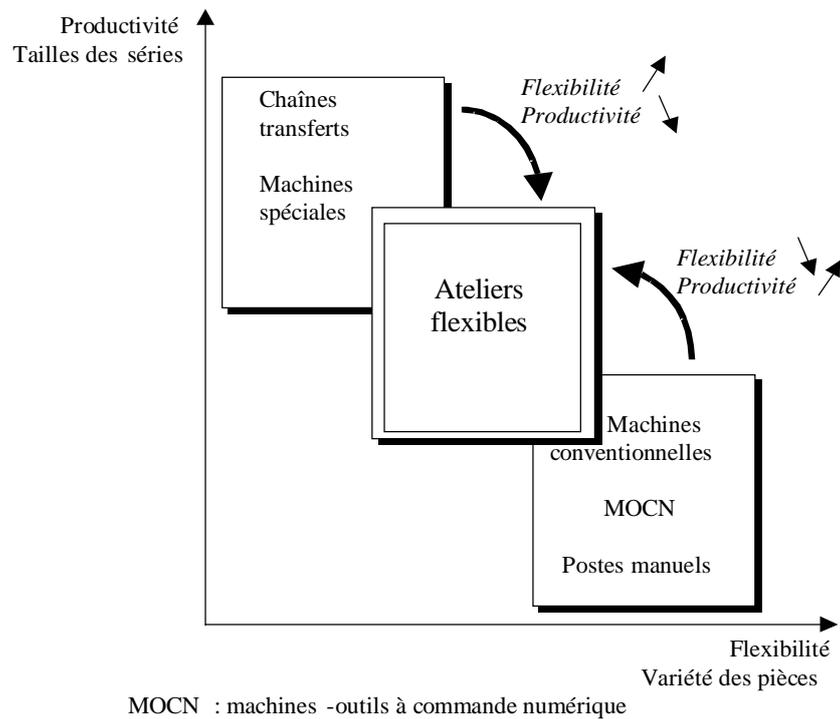


Figure .1.3. L'atelier flexible, compromis entre flexibilité et productivité [7]

Le premier atelier flexible voit le jour aux Etats-Unis en 1967; d'autres réalisations suivent puis s'étendent au Japon et en Europe. Dès son apparition, l'atelier flexible a été étroitement lié à l'usinage- procédé le plus employé en mécanique- plus précisément au

fraisage de pièces de type carter, pour l'aviation, le machinisme agricole, l'armement ou la machine-outil... Dans les années 80, favorisé par le déploiement de la commande numérique et des robots industriels, le développement a été rapide, ouvrant la voie à de nouvelles applications : tournage en usinage, constitution de cellules flexibles pour d'autres procédés (peinture, soudage, assemblage, ...), traitement de surfaces... Ainsi, le champ d'application des ateliers flexibles dépasse la mécanique pour atteindre le travail du bois, du cuir...[7].

Un atelier flexible n'est donc qu'une unité de production la plus automatisé possible piloté par un ordinateur, ayant comme propriété fondamentale d'adapter sa production à une demande externe évolutive motivée par une seule préoccupation : l'augmentation de la productivité. Une définition relativement précise d'un atelier flexible est proposée par le professeur F. PRUVOT : “ *un atelier flexible permet la production automatique de pièces de types divers et en quantités variables. Les opérateurs n'interviennent pas directement dans le processus de fabrication et limitent essentiellement leurs interventions à l'entretien; l'ordonnancement de la production est géré par un système informatique* ”.[5]

Ainsi, comprenant une collection de machines à commande numérique, un système de transport automatisé et un système informatique complexe, ces ateliers peuvent satisfaire les nouvelles exigences de la production industrielle par leur capacité d'adaptation de la production en quantité ou en variété de produits. Cette capacité permet de distinguer deux grandes approches de flexibilité qui peuvent coexister au sein d'une même installation [7] : *la flexibilité capacitaire “flexibilité-volume”*, qui consiste à pouvoir absorber des variations de volume de production sans pénaliser les délais; elle est essentiellement obtenue par des équipements en surnombre, mais aussi par la standardisation des équipements, et *la flexibilité de diversification “flexibilité-variété”*, qui consiste à s'adapter à des variantes des produits réalisés.

### **3.3. Classification des systèmes flexibles de production**

Dans la pratique, l'automatisation flexible peut prendre différentes formes, qui ont en commun de faire appel à la machine-outils à commande numérique, mais elles se distinguent les unes des autres, en fonction [7] :

- # Du nombre de machines associées,
- # Du mode d'organisation et de pilotage des machines,
- # Des équipements de stockage-manutention qui les environnent,

# Des caractéristiques des productions auxquelles les systèmes ainsi réalisés sont destinés

En se basant sur le nombre de machines à commandes numériques, les systèmes flexibles de production peuvent être scindés en cinq catégories [5] :

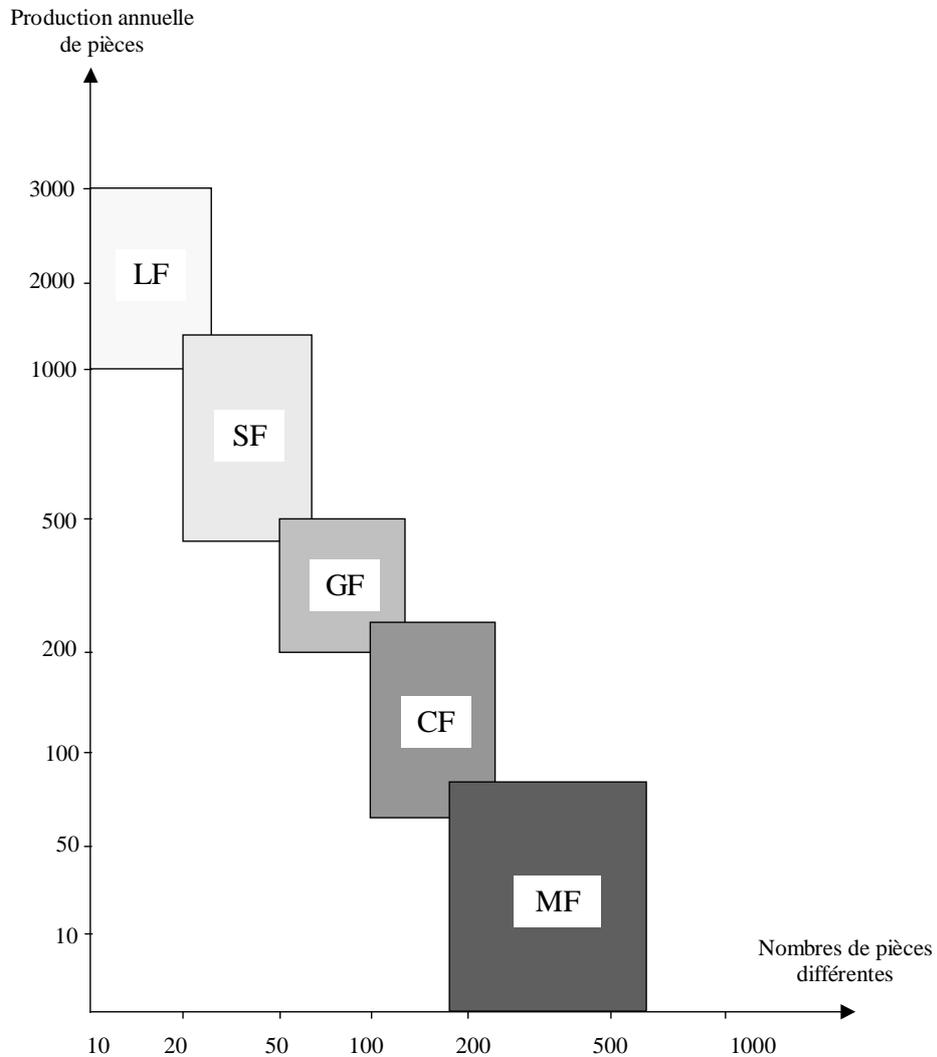


Figure .1.4. Relation entre la quantité et la diversité des pièces produites pour chaque type de système [5]

#### Le module flexible (MF)

C'est une machine à commande numérique avec une aire de stockage, un chargeur de pièces et un changeur d'outils automatique ;

#### La cellule flexible (CF)

Représente plusieurs modules reliés par véhicule filoguidé permettent l'alimentation des machines en pièces ;

*Le groupe flexible (GF)*

C'est un ensemble de cellules et de modules formant la même zone de production (fabrication, usinage ou assemblage) joints par des véhicules filoguidés ; le tout est géré par un ordinateur central ;

*Le système flexible (SF)*

Représente plusieurs cellules flexibles reliées entre elles par des véhicules filoguidés composant les diverses zones de production ;

*La ligne flexible (LF)*

C'est un ensemble d'instruments attribués aux diverses machines comme une ligne de véhicules filoguidés, de robots, de convoyeurs, de navettes,....

Une autre classification des systèmes flexibles peut être effectuée en fonction des caractéristiques de la forme du compromis entre la flexibilité et la productivité, on peut distinguer ainsi trois grandes catégories de systèmes [7] : Les ateliers flexibles spécialisés, les ateliers flexibles complexes, les cellules ou îlots flexibles. La plupart des réalisations industrielles entrent dans l'une ou l'autre de ces catégories.

*Les ateliers flexibles spécialisés ou lignes-transferts flexibles [7]*

Ces ateliers sont conçus pour la production de variantes dimensionnelles de pièces d'une même famille sur le plan fonctionnel et morphologique. Ces pièces constituent ce que l'on appelle une famille de pièces fermée; à cette famille correspond une gamme unique, c'est à dire une succession d'opérations bien déterminée. De ce fait, les pièces passent successivement sur les différentes machines de l'atelier disposées en ligne dans l'ordre où elles interviennent.

Les machines peuvent être standardisées ou spécialisées, mais programmables. Le pilotage de l'atelier est facilité puisque sa structure, calquée sur le flux des produits, est linéaire et son organisation est de type séquentiel pour l'acheminement des pièces, sans possibilité de conflits de priorité. Le nombre de machines dépend de la famille de pièces fabriquée, mais il est généralement compris entre quatre et dix unités.

*Les ateliers flexibles complexes [7]*

Regroupant plusieurs (cinq à vingt) machines à commande numérique spéciales ou standards associées à des systèmes de transfert de pièces et de chargement / déchargement totalement ou partiellement automatisés, ces ateliers sont destinés à la production de pièces

variées du point de vue des formes et des dimensions, constituant ce que l'on appelle une famille de pièces ouverte.

Aux divers types de pièces de la famille correspondent des gammes différentes. Ces gammes ont cependant certaines opérations en commun, de telle façon qu'une machine donnée du système puisse intervenir dans la fabrication de plusieurs pièces de la famille. Cette diversité des pièces et des gammes, ainsi que les possibilités de combinaisons qui en résultent pour l'affectation des pièces aux machines de l'atelier, sont mises à profit pour optimiser l'engagement des machines.

La progression des pièces dans un atelier flexible de ce type n'est pas prédéterminée. Le logiciel de commande doit assurer une véritable gestion en temps réel en fonction de règles (régissant notamment les priorités) préalablement établies par les concepteurs; il ne s'agit donc pas seulement d'assurer une commande séquentielle des cycles automatisés des machines et équipements de l'atelier.

#### *Les cellules ou îlots flexibles d'usinage [7]*

Par rapport aux ateliers flexibles, les cellules sont des systèmes moins complexes, regroupant un plus petit nombre (deux ou trois) de machines à commande numérique, qui sont presque toujours des machines standards issues des catalogues des fournisseurs. A ces machines sont associés divers équipements assurant de manière automatique les fonctions de stockage, transfert, chargement /déchargement des pièces brutes et finies.

Les machines constituant les cellules flexibles sont associées les unes aux autres en fonction d'un ensemble d'opérations à réaliser indépendamment de l'appartenance des pièces usinées à une famille de pièces bien déterminée. Ainsi, une cellule flexible est caractérisée par la nature des opérations qu'elle permet de réaliser, alors qu'un atelier flexible est dédié à une famille de pièces.

### **3.4. Structure d'un système flexible de production**

D'un point de vue structurel, un atelier flexible comporte trois grandes parties [8,9]: *un système de fabrication* qui comporte des machines diverses mais classiques dont les seules caractéristiques modernes résident dans le fait qu'elles peuvent être commandées par des systèmes informatiques, *un système de maintenance* pour apporter et évacuer les outillages et les pièces à traiter et *un système de pilotage* de l'ensemble assurant la gestion des outils et la génération des gammes d'usinage.

### 3.4.1. Système de fabrication

La machine-outil à commande numérique constitue la machine pivot des ateliers flexibles. En effet, le système de fabrication de l'atelier flexible est constitué par un ensemble de machines-outils à commande numérique (fraiseuse, tour, centres d'usinage<sup>1</sup>, ...). Ce sont des machines programmables qui peuvent réaliser divers types d'opérations.

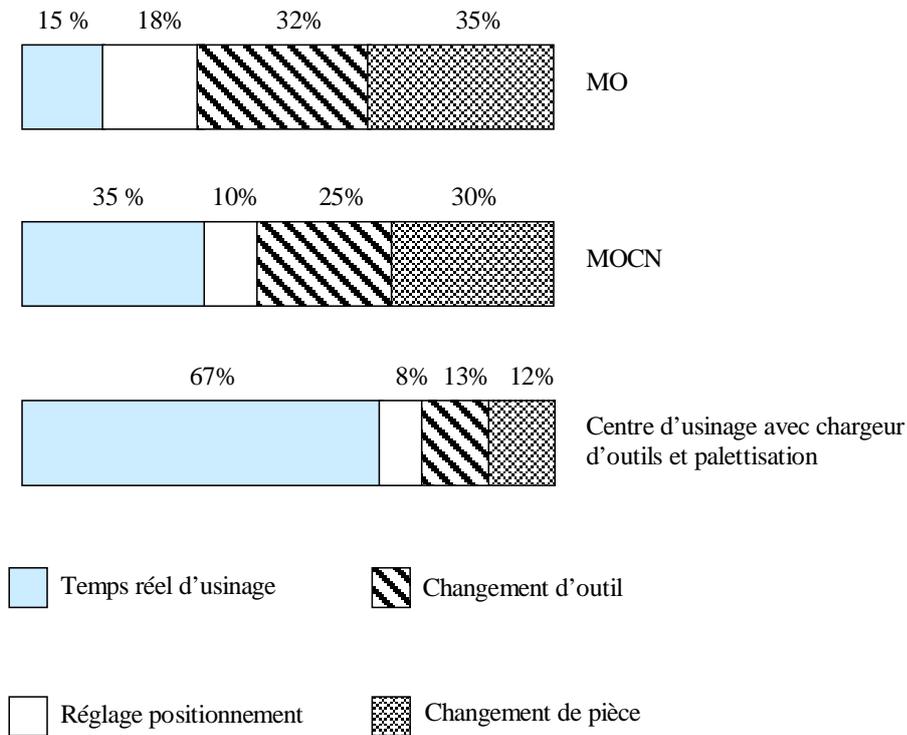


Figure 1.5. Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur degré d'automatisation [10]

L'introduction de la commande numérique au sein des systèmes de production est justifiée par les gains acquis en matière de flexibilité, sécurité, automaticité et économique [10]. En ce qui concerne l'automaticité, l'avantage d'une commande numérique est d'offrir aux machines qui en sont équipées un très haut niveau d'automaticité. Sur de telles machines, l'intervention de l'opérateur nécessaire pour assurer la production de pièces peut être considérablement réduite voire supprimé.

Pour la flexibilité, puisqu'elles sont pilotées à partir d'un programme, les machines outils à commande numérique peuvent usiner des pièces différentes aussi facilement que

<sup>1</sup> Centre d'usinage : C'est une machine polyvalente à broche tournante, permettant l'exécution d'usinages très variés (détourage, surfacage, perçage, alésage, taraudage, lamage,...) dont le fonctionnement est automatisé grâce à une commande numérique et à un chargeur automatique d'outils.

l'on charge un nouveau programme. Une fois vérifié puis exécuté pour la première série, ce programme peut être facilement rappelé lorsque la même série se présente.

En plus de la réduction des temps de réglage qui répondent parfaitement aux impératifs de la production en flux tendus, la machine-outils à commande numérique offre une grande souplesse d'utilisation entraînant plusieurs avantages [10] parmi lesquels nous citons :

- # Réduction des outillages et suppression des gabarits ;
- # Réduction des en-cours de fabrication ;
- # Possibilité de réaliser des pièces complexes en gérant des déplacements simultanés sur plusieurs axes ;
- # Contrôle automatique des outils et des dimensions de pièces avec prise en compte par la commande numérique des corrections à effectuer;
- # Prise en compte rapide des modifications d'usinage (il est plus facile de modifier une ligne de programme qu'un outillage spécial ou un gabarit) ;

### **3.4.2. Système de manutention**

On ne peut rien produire sans déplacer, stocker, transporter, mélanger, séparer, trier... Toutes ces opérations, sont des opérations de manutention qui ne peuvent pas être supprimées. La manutention est donc, l'ensemble des activités matérielles et des mouvements qui tout en ne modifiant ni la valeur, ni la nature des produits contribue à leur fabrication dans les meilleures conditions de qualité, rapidité, sécurité et efficacité.

Le système de manutention comprend des dispositifs de chargement et de déchargement automatique des pièces (bande transporteuse, chariot de convoyage, robot manipulateur, véhicule filoguidé, etc.), un système de stockage distribué au niveau de chaque station de travail et / ou centralisé au niveau global de l'atelier et un système de transport automatisé et flexible assurant le transfert entre les différentes machines de l'atelier flexible. En effet, et contrairement aux lignes de production, la disposition des machines au sein d'un atelier flexible n'est pas déterminée par la séquence des opérations à effectuer et doit laisser une liberté totale en ce qui concerne le séquençement des opérations. Une telle liberté est nécessaire si l'on veut pouvoir modifier le séquençement des opérations au cours du temps afin de s'adapter aux mieux aux diverses perturbations qui peuvent survenir durant la production.

### **3.4.3. Système de pilotage**

De manière générale on peut décomposer un système de production en deux parties complémentaires : la partie opérative, qui désigne le flux matériel et la partie conduite, qui traite le flux informationnel. La fonction de la partie opérative est de fabriquer des produits finis à partir de la matière première en exploitant les moyens de production. La partie conduite a pour fonction d'élaborer les ordres nécessaires à la partie opérative.

Du fait de la complexité de la partie opérative des systèmes flexibles de production, constituée des machines automatisées (machines-outils à commande numérique, robots, convoyeurs, ...), le pilotage du système, la principale caractéristique du système flexible, a un rôle fondamental dans la réalisation de la production prévue dans un environnement dynamique et fortement perturbé.

Le système de pilotage doit être capable de gérer *dynamiquement* les ressources du système, et les différentes tâches qui doivent réaliser. Aussi, il doit veiller à la parfaite coordination des systèmes de fabrication et de manutention tout en gérant les aléas apparaissant de manière quasi-permanente au cours de la production.

## **4. Problèmes des systèmes flexibles de production**

Il est évident que de nombreuses difficultés attachées aux systèmes classiques de production ont pu être résolues grâce au développement des ateliers flexibles. Cependant de nouveaux problèmes - qui vont être plus complexe - ont fait leur apparition. En suivant une ligne de réflexion calquée sur la vie d'un produit, ces problèmes peuvent être regroupés en quatre catégories [5] : *les problèmes de conception, de planification, d'ordonnement et les problèmes de pilotage*. Ces problèmes sont liés et ne peuvent pas être traités les uns indépendamment des autres.

### *Les problèmes de conception*

Après avoir déterminé les caractéristiques des produits, il est indispensable de connaître la manière dont la production est envisagée et de donner les moyens de les fabriquer. L'analyse du processus de fabrication fournit aux concepteurs les informations nécessaires pour déterminer :

- # Le nombre, le type, et la capacité des machines, de convoyeurs, de robots et d'outils ;
- # Le type et la taille des emplacements de stockage ;

# L'implantation physique de l'atelier, structure et agencement des différents composants de l'atelier.

Avant de construire réellement l'atelier, il est prudent de faire encore une analyse, par simulation ou par des méthodes analytiques, afin d'étudier les performances du système conçu : en effet, il faut être sûr que la réalisation physique du système est possible et, de plus, qu'il atteint bien les performances souhaitées.

#### *Les problèmes de planification*

Une fois l'appareil de production mis en place, il faut s'intéresser à la gestion de la production. Elle regroupe deux ensembles de problèmes intimement liés : la planification et l'ordonnancement.

Au niveau de la planification, on doit établir un plan de production<sup>2</sup> agrégé en fonction d'une estimation de la demande des clients et de la prévision de l'évolution du marché. En effet, le but est de trouver un groupe de pièce qui occupera le mieux possible les machines durant une période donnée, et définir les divers taux de production, c'est à dire le nombre de produits à traiter par semaine ou par mois. On fait aussi une pré-allocation des diverses ressources afin de diminuer l'explosion combinatoire qui peut se produire au niveau de l'ordonnancement du fait de la flexibilité des machines qui peuvent généralement traiter plus d'un type d'opérations.

#### *Les problèmes d'ordonnancement*

La planification a permis de répartir le travail entre les ressources de l'atelier. Chacune doit accomplir sa charge en tenant compte de certaines contraintes (respect des délais et des taux de production) et en réalisant un objectif bien déterminé, comme la minimisation de la durée de production ou la minimisation des coûts. La résolution de ces problèmes permet d'élaborer un plan de fabrication détaillé. On définit ainsi, l'ordre d'exécution de chaque opération sur chaque machine tout en tenant compte des contraintes imposées par le niveau de planification.

Lorsque la séquence d'opérations est parfaitement ordonnée, on parle d'un ordonnancement explicite [9]. Cette stratégie met en jeu des temps de calcul très importants, et elle n'est pas du tout flexible. Une autre solution est d'élaborer un ensemble de règles qui définissent, chaque fois qu'une machine devient libre, l'opération suivante. Une telle stratégie peut être considérée comme la définition d'un ordonnancement

---

<sup>2</sup> Nous désignons les quantités de produits à fabriquer durant une période de planification qui varient entre la semaine et le mois.

implicite [9]. Généralement c'est une approche mixte combinant ces deux stratégies qui donnera le meilleur résultat.

### *Les problèmes de pilotage*

Une fois que la production est lancée, il est important de gérer l'atelier en temps réel, ce qui fait apparaître les problèmes de pilotage. La conduite en temps réel de l'atelier consistera à contrôler l'exécution des opérations selon l'ordonnancement planifié en prévoyant des réactions aux événements imprévus tels que les pannes ou les bris d'outils.

Les réactions sont fondamentalement différentes, suivant qu'il s'agit d'une panne longue sur une machine ou d'une interruption momentanée dans l'atelier flexible. Dans certain cas, il sera possible de redistribuer en temps réel le travail parmi les ressources encore en état de fonctionnement, afin que la production ne soit pas interrompue à chaque événement imprévisible. Dans d'autres cas, plus graves, il sera nécessaire de faire une nouvelle planification. La redistribution du travail doit prendre en considération les stratégies de maintenance appliquées au sein de l'atelier.

## **5. Avantages et inconvénients des systèmes flexibles de production**

Du fait de leur situation de compromis, les ateliers flexibles présentent toute une palette d'avantages et d'inconvénients. De plus, en fonction d'une situation particulière d'entreprise et d'objectifs poursuivis, certains avantages peuvent basculer du côté des inconvénients et vice versa.

Au plan des avantages, citons :

- # Adaptation rapide aux variations du marché, aussi bien en quantité qu'en nature ;
- # Meilleure qualité, et constance de la qualité, dues à l'automatisation ;
- # Satisfaction du client, grâce à la livraison au bon moment du produit voulu ;
- # Meilleurs liens entre la fabrication et la suite du processus, en particulier l'assemblage/montage ; possibilité de travailler en flux tendu ;
- # Réduction des stocks et des en-cours ;
- # Meilleur contrôle de la production : mise à disposition d'informations en temps réel;
- # Meilleur engagement des équipements ;
- # Réduction des outillages (en partie grâce à l'emploi de MOCN) ;

- # Réduction de la main d'œuvre directe (apport de l'automatisation) ;
- # Possibilités de liaisons informatiques avec des systèmes de conception et de gestion de production assistée par ordinateur (CAO, GPAO)... ;
- # Augmentation du potentiel de production ;
- # Réduction des frais généraux (moins d'attentes, de pertes...).

Au chapitre des inconvénients, on citera :

- # Coût élevé de réalisation (et donc importance du risque financier) ;
- # Complexité, sophistication ;
- # Incidence lourde des aléas dans certains cas (regroupement d'opérations sur un même moyen) ;
- # Evolution limitée dans le temps, due à une vue insuffisante du futur au moment de la conception ;
- # Nécessité de personnel qualifié.

## **6. Conclusion**

Depuis la crise pétrolière, en 1973, à nos jours, les entreprises affrontent un environnement fortement concurrentiel et des produits de plus en plus rapidement obsolètes. Ce contexte les a poussés à céder les principes du Taylorisme en faveur de nouveaux principes dans lesquelles le temps est un facteur primordial (Juste A Temps). Aujourd'hui, les entreprises recherchent, à travers ces principes caractérisés de flexibilité, réactivité, proactivité..., d'augmenter la réactivité de leur système de production, ainsi conserver ou accroître leurs parts de marché.

La flexibilisation de l'outil de production est une tendance permettant à l'entreprise de surmonter les différents changements de son environnement (mondialisation et accroissement de la concurrence). Très tôt, l'atelier flexible a pris une place dans les préoccupations des entreprises, quel que soit le type de production. En effet, les systèmes flexibles de production offrent la possibilité de répondre rapidement aux désires des clients à moindres coûts à l'aide d'une grande capacité à traiter des produits différents.

Les gains apportés par ces systèmes sont indubitablement formidables. Cependant, leur coût de réalisation et leur complexité impose une gestion très adaptée afin d'assurer la rentabilité maximale de ces systèmes, posséder un magnifique outil n'est pas suffisant, il faut savoir le mettre en œuvre et bien s'en servir.

Dans l'industrie manufacturière, l'automatisation de plus en plus poussée provoque une complexité croissante des équipements qui entraîne des problèmes relatifs au téléchargement de programmes de commande numérique, à la qualification des opérateurs, à la commande des moyens de transfert. En outre, en raison du développement d'applications telles que la maintenance, les fonctions de distribution de travail, de lancement et de suivi classiques ne sont plus suffisantes pour piloter le système de production. Par conséquent, la gestion des flux (physiques et informationnels) du système devient prépondérante et sa conduite, dont le rôle principal est de réaliser la production prévue dans un environnement dynamique et fortement perturbé, constitue un enjeu de plus en plus important.

Mettre en oeuvre une telle conduite, est une opération délicate puisque la production dans les systèmes de fabrication flexibles est confrontée à un changement continu de flux de production, aussi, ces systèmes flexibles sont caractérisés par leur instabilité face aux aléas.

# *Chapitre II*

---

## *Les systèmes Multi-Agents*

# 1. Introduction

L'intelligence artificielle (IA), branche de l'informatique, apparaît dans les années cinquante, lorsque le développement des premiers ordinateurs donne à penser qu'ils seront rapidement capables de simuler la pensée. L'IA, par définition, recouvre un ensemble vaste de problèmes tant théoriques que pratiques sur la modélisation et le développement des systèmes intelligents.

Le fondement de base de l'IA revient à centraliser toute la connaissance et tout le raisonnement au sein d'un système unique. Les développements en IA ont donné naissance à des systèmes centralisés dits systèmes experts. Ces derniers comportent deux composants de base à savoir une base de connaissances servant à contenir la connaissance sur un problème donné et un moteur d'inférence représentant le mécanisme de raisonnement. Les systèmes experts ont été employés dans beaucoup de domaines d'applications tels l'aide au diagnostic, la démonstration automatique, la surveillance et le contrôle de processus industriels, la planification d'action, etc.

Cependant, les concepteurs des systèmes experts industriels ont constaté que les systèmes informatiques industriels sont de plus en plus compliqués et font intervenir un grand nombre de sous systèmes de nature fort diverse, comprenant de nombreuses fonctionnalités et interagissant avec plusieurs spécialistes humains (opérateurs, experts, techniciens, etc.) qui se trouvent souvent répartis naturellement dans l'espace physique. Pour palier ces insuffisances, les chercheurs ont reproduit la métaphore des groupes humains dans l'accomplissement des tâches complexes. Cette nouvelle façon de penser s'appuie sur une approche différente de celle du penseur unique, et constitue le fondement d'un nouveau paradigme : celui de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD).

L'émergence de l'IAD est associée donc au constat qu'une approche centralisée ne peut recouvrir la complexité de nombreux problèmes rencontrés en IA. Ce constat a alors conduit à distribuer les capacités cognitives et décisionnelles sur des processus de résolution en interaction. Cette nouvelle approche permet d'éviter de manipuler de nombreuses connaissances dans une seule entité en répartissant ces dernières dans plusieurs entités intelligentes.

Les systèmes Multi-Agents (SMAs) constitue un sous domaine de l'IAD fondé sur l'hypothèse supplémentaire que ces processus appelé 'agents' possèdent un certain nombre de propriétés particulières et étudient la façon dont laquelle ces agents autonomes vont

coordonner leurs connaissances, buts, compétences et plans pour effectuer une action ou résoudre un problème.

Ce chapitre vise à présenter un panorama simplifié des systèmes Multi-Agents. Cette représentation décrit tout d'abord la notion d'un agent, puis celle d'un SMA. En effet, le domaine des SMAs est très vaste, et dans ce chapitre nous n'introduisons que brièvement quelques concepts clés tel que l'architecture et le comportement pour un agent et la notion d'organisation et d'interaction pour un SMA. Nous présentons ensuite les applications générales des SMAs et quelques applications industrielles. Enfin, nous présentons certains problèmes soulevés lors de la conception d'un SMA.

## **2. Agents et systèmes d'agents**

### **2.1. L'agent**

#### **2.1.1. Définition d'un agent**

La description d'un système Multi-Agents passe nécessairement par celle d'un agent. De manière générale, un agent représente 'une entité qui agit'. Agir signifie être capable d'entrer en action et de produire un effet. Autrement dit c'est une entité, complexe ou très simple, capable de modifier son environnement.

Pour l'Intelligence Artificielle Distribuée, la définition d'un agent est aussi emblématique que l'a été, et l'est toujours, la question de ce qu'est l'intelligence pour l'Intelligence Artificielle. Le problème général posé peut être formulé ainsi "comment définir et modéliser un agent ? ". La question est vaste et a, en conséquence, généré de nombreuses réponses. Avec l'absence d'une définition consensuelle de ce qu'est un agent, nous ne présentons ici que celle donnée par Jacque Ferber [15] :

- “ On appelle agent une entité physique ou virtuelle qui*
- a. est capable d'agir dans un environnement,*
  - b. peut communiquer directement avec d'autres agents,*
  - c. est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),*
  - d. possède des ressources propres,*
  - e. est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,*
  - f. ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),*
  - g. possède des compétences et offre des services,*
  - h. peut éventuellement se reproduire,*

- i. *dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications quelle reçoit.*”.

Malgré qu’il n’existe pas une définition universelle du terme agent, il y a un accord que l’autonomie est le point clé de cette notion. Cette autonomie signifie que l’agent n’est pas dirigé par des commandes venant de l’utilisateur (ou d’un autre agent), mais par un ensemble de tendances qu’il cherche à optimiser. C’est lui qui est actif. A la différence des objets semblables : objets, processus ou modules logiciels, l’agent a la possibilité de répondre par l’affirmative ou le refus à des requêtes provenant des autres agents.

En plus de l’autonomie, un agent est caractérisé par un degré d’interactivité et de réactivité lui permettant d’exercer des actions sur son environnement et de s’adapter aux changements. A ces caractéristiques de base peuvent s’ajouter d’autres caractéristiques telle que la capacité sociale, la coopération, l’apprentissage, la mobilité, ... permettant à l’agent d’atteindre ces objectifs.

### 2.1.2. Architecture et comportement

Un agent se caractérise essentiellement par la manière dont il est conçu et par ses actions. En d’autres termes par son architecture et son comportement [15].

#### *Architecture*

La figure .2.1. donne l’aperçu externe d’un agent, dans lequel l’agent est vu en tant que ‘boite noire’, dont seules les entrées et sorties sont représentées. L’origine (pour une entrée) ou le résultat (pour une sortie) peut, indépendamment de l’agent lui-même, être lié à des dispositifs physiques tels que des capteurs et actionneurs.

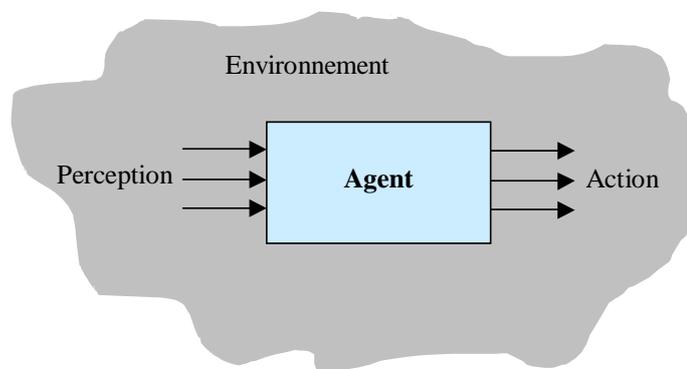


Figure .2.1. Aperçu externe et général d’un agent [17]

L'architecture correspond à un point de vue de concepteur, qui décrit l'organisation interne d'un agent. C'est à dire le principe d'organisation qui sous-tend l'agencement de ses différents composants. Il existe un grand nombre d'architecture envisageable. Certaines s'avèrent plus efficaces en temps de calcul, d'autres sont plus souples et permettent de coder un vaste éventail d'actions, d'autre encore présentent l'avantage de la simplicité [15]. Il faut noter, qu'il est très difficile voire impossible d'élaborer une architecture générale et universelle ; en effet l'architecture d'un agent reflète les besoins particuliers du domaine d'application [14].

On trouve dans *le tableau .2.1.* les principales architectures décrites à travers les paramètres généraux suivants: *le type d'approche, type de composant, les structures de subordination, le couplage et la constitution.* Il faut noter que ces paramètres sont utilisés aussi pour l'analyse structurelle d'un SMA. Nous donnons ici une brève description de ces paramètres, pour plus d'informations, nous référençons le lecteur à [15].

Le type d'approche désigne la méthode suivie pour la conception. On distingue les méthodes de conception fonctionnelle, horizontale ou verticale, dans lesquelles l'unité de décomposition est la fonction caractérisée par ses entrées, sorties et sa fonction de transfert, et les méthodes de conception objet qui mettent l'accent sur l'entité, sur les liens qu'elle entretient avec les autres entités et sur les opérations dont elle est capable.

Les structures de subordination caractérisent la structure de contrôle, c'est à dire la manière dont les agents peuvent faire effectuer certaines tâches à d'autres agents. On trouve les structures hiérarchiques qui supposent que les relations de subordinations forment une arborescence, et les structures égalitaires, dans lesquelles un agent peut demander à n'importe quel autre agent d'accomplir une tâche. Ce dernier pouvant éventuellement refuser.

En fonction du couplage des composants, on trouve trois formes d'organisations : organisation à couplage fixe, à couplage variable et à couplage évolutif. Dans le couplage fixe, chaque composant possède un (ou éventuellement plusieurs) rôle dont il ne bouge plus. Les relations entre agents sont-elles aussi figées, les réorganisations sont donc impossibles. Le couplage variable correspond à des structures organisationnelles fixes dont les concrétisations sont variables. Les relations entre agents peuvent évoluer mais dans le cadre de mécanismes bien précis. Le couplage évolutif caractérise des structures organisationnelles variables, l'organisation concrète pouvant être ou non variable. Les

relations abstraites entre agents peuvent alors évoluer en fonction des performances de l'organisation.

Type d'architecture	Approche	Type de composant	Structure de subordination	Couplage	Constitution
Modulaire horizontale	Fonctionnelle horizontale	Module	Hiérarchique	Fixe	Prédéfinie
Tableau noir	Fonctionnelle	Tâche	Hiérarchique (méta)	Variable	Prédéfinie
Subsommation	Fonctionnelle verticale	Tâche primitive	Hiérarchique	Fixes	Prédéfinie
Tâches compétitives	Fonctionnelle verticale	Tâches + actions primitives	Hiérarchique (compétition)	Variable	Prédéfinie
Règles de production	Fonctionnelle	Règle	Hiérarchique (méta)	Variable	Prédéfinie
Classifieurs	Fonctionnelle verticale	Règle	Hiérarchique	Evolutif	Prédéfinie
Connexioniste	Fonctionnelle verticale	Neurone formel	Egalitaire	Fixe (à poids)	Prédéfinie
Système dynamique	Fonctionnelle verticale	Relation stimuli-commande	Egalitaire	Fixe	Emergente
Multi-Agents et acteurs <sup>3</sup>	Objet / fonctionnelle	Agent	Egalitaire	Variable	Emergente

Tableau .2.1. Principales architectures d'agents [15]

Le dernier paramètre concerne la constitution des structures organisationnelles. On distingue l'organisation prédéfinie et émergente. Dans l'organisation prédéfinie, le concepteur définit a priori les relations abstraites, qu'elles soient statiques ou dynamiques. Pour les organisations évolutives, c'est l'ensemble des relations abstraites possibles et l'ensemble des transformations qui sont connues à l'avance. En revanche, les organisations émergentes sont caractérisées par l'absence de structure organisationnelle prédéfinie, celle-ci résultant totalement des interactions entre agents. Dans ce cas, les positions et les relations ne sont pas déterminées à l'avance mais apparaissent comme le produit des comportements de chacun des agents.

### Comportement

Le terme comportement est central dans la définition et la modélisation d'un agent. Le comportement est analysable sans connaître les détails d'implémentation. Il s'agit d'un

<sup>3</sup> Un acteur est une entité informatique qui se compose de deux parties : une structure qui comprend l'adresse de tous les acteurs qu'il connaît et à qui il peut envoyer des messages et une partie active, le script qui décrit son comportement lors de la réception d'un message [15].

phénomène qui peut être appréhendé par un observateur extérieur qui au regard des actions qu'entreprend l'agent, décrit la relation qui existe entre l'agent, son environnement et les autres agents.

Le comportement caractérise ainsi l'ensemble des propriétés que l'agent manifeste dans son environnement, on peut le comprendre en regardant sa manière d'évoluer et de répondre aux sollicitations de son environnement.

Le comportement apparaît alors comme une spécification externe de l'agent, et l'architecture définissant les relations internes permettant d'aboutir à cette spécification. Inversement, l'observateur perçoit un comportement à partir duquel il peut induire ou spécifier ce qu'une architecture est censée produire. Cette approche conduit à la réalisation de modèles comportementaux indépendant de l'architecture.

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles comportementaux. Tous ces modèles s'attachent à prouver les bien-fondés de leurs choix conceptuels sur la base desquels ces comportements sont élaborés. A titre d'illustration, nous citons deux modèles au travers les notions d'éco-agent et d'agent BDI (Belief – Desire – Intention).

J.Ferber propose un modèle d'agent dénommé 'éco-agent' [15]. Ce modèle s'appuie sur trois modes de comportement : chercher la satisfaction, satisfaire et fuir. Un éco-agent cherche constamment à atteindre l'état de satisfaction guidé par sa fonction de satisfaction. S'il est gêné dans sa recherche par un autre agent, il l'agresse. Ce dernier est alors dans l'obligation de fuir.

Le modèle d'agent BDI explique le comportement d'un agent par la propension de ce dernier à satisfaire des désires ou buts, se traduisant par des intentions (plans d'action intermédiaires) à partir de ses croyances (connaissances supposées vraies d'un agent sur lui-même et son environnement). Le comportement d'un agent résulte donc de l'influence de plusieurs attitudes vis-à-vis du monde qui l'entoure.

### **2.1.3. Agent cognitif et réactif**

A défaut de donner une définition précise de l'agent, il est possible néanmoins d'en dégager les fonctionnalités principales. En effet, il existe un noyau commun à la plupart des définitions de la littérature : l'agent agit en fonction d'un certain nombre d'informations reçues et perçues de son environnement et en fonction des buts qu'il poursuit. Son comportement donne l'impression qu'il raisonne et que ses actions sont dirigées par ce raisonnement. Il est ainsi plus aisé de décrire un agent par ce qu'il fait (son comportement) que par ce qu'il est (son architecture).

Les capacités d'un agent sont de trois ordres qui répondent aux trois phases générales de réalisation d'une tâche présentées dans la figure .2.2. :

La première phase est une phase de perception : l'agent perçoit son environnement et met à jour ses représentations internes de l'environnement et des autres agents. La capacité perceptive permet à l'agent d'acquérir de nouvelles connaissances. Deux types de perception peuvent être distingués : *la perception passive et la perception active*. Dans le premier type l'agent reçoit des données sans avoir réalisé d'action pour les obtenir, il peut, par exemple, recevoir un message d'un autre agent l'informant de l'identité de celui-ci. La perception active est le résultat d'une action volontaire : l'agent va à la recherche d'informations. Dans la deuxième phase, l'agent détermine ce qui est à faire (sa tâche) et décide quand et comment le faire. Dans la dernière phase l'agent réalise effectivement les actions qui ont été décidées.

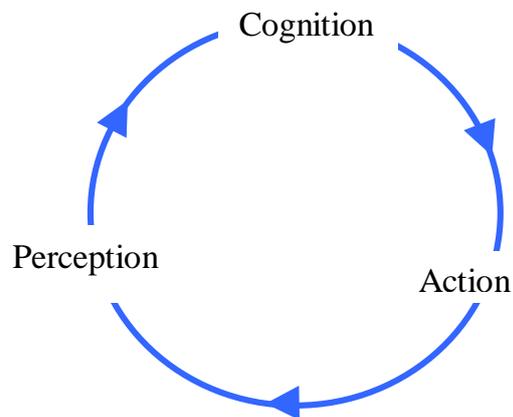


Figure .2.2. Les trois phases générales de réalisation d'une tâche par un agent [17]

C'est trois phases forment un cycle par le bouclage de la phase action sur la phase perception. En effet, l'environnement évolue continûment et offre donc, à tout moment, au système de nouvelles données à percevoir et de nouvelles tâches à réaliser.

La capacité cognitive que possède un agent détermine une large palette de types de raisonnement, les extrêmes étant les raisonnements réactifs (réflexe) et cognitifs (de haut niveau). Le choix du type de raisonnement proposé par le concepteur est basé sur un large éventail de possibilités. Certes, il est évident que plus le raisonnement des agents est simple, plus les interactions entre agents devront être performantes afin de maîtriser la cohérence globale du système.

### *Agent réactif*

Les raisonnements réflexes ou réactifs caractérisent une activité de l'agent dans laquelle les actions sont exécutées rapidement. Les agents à comportement réactifs ou réflexes sont souvent calqués sur le règne animal, parmi les animaux qui vivent en société tels que les fourmis et les abeilles. Un agent de ce type évolue parmi un nombre important de ses semblables et c'est le résultat des interactions entre leurs activités qui donne une impression de comportement global 'intelligent'.

Les agents réactifs sont très simples et ne possèdent pas de représentations de leur environnement. De ce fait toutes les informations relatives à leur comportement se trouvent dans l'environnement et leurs réactions dépendent uniquement de la perception qu'ils peuvent en avoir. Ils opèrent dans l'ici et le maintenant, c'est à dire qu'ils ne mémorisent pas les événements passés et ne peuvent pas non plus anticiper sur le futur.

Bien que cette simplicité les rende souvent sans défense lorsqu'ils sont utilisés de manière isolée, les agents réactifs prennent leur force du travail en groupe, ce qui leur donne la possibilité de réaliser des actions dont ils auraient été bien incapables individuellement. Les agents réactifs sont très sensibles aux relations spatiales qui déterminent tout à la fois des contraintes, des capacités d'actions et définissent des relations de coopération privilégiées.

### *Agent cognitif*

Cette approche de raisonnement de haut niveau est l'approche traditionnelle proposée en IA. Un agent cognitif se distingue par une représentation explicite de l'environnement, possède des croyances sur les autres, des intentions (c'est à dire des buts et des plans explicites lui permettant d'accomplir leurs buts) et des compétences. Les tâches demandées à des agents cognitifs relèvent, a priori, d'un raisonnement plus compliqué qu celui des agents réactifs.

Les agents à comportement cognitif base leur raisonnement sur un ensemble de connaissances sur leur environnement, sur les autres agents et sur eux-mêmes. Ceci signifie que leur comportement est la conséquence des observations et des croyances qu'ils ont sur les autres agents. Ce comportement s'avère en un sens plus 'intelligent', mais également plus lent.

Ce raisonnement complexe limite le nombre d'agents capables d'interagir efficacement au sein d'un groupe donné et met en œuvre des moyens sophistiqués pour la résolution des problèmes de coopération entre les agents.

Le tableau suivant résume les différences entre les modèles cognitifs et les modèles réactifs.

<i>Agent cognitif</i>	<i>Agent réactif</i>
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire de son historique
Agents complexes	Fonctionnement stimulus/réponse
Système composé de petit nombre d'agents	Système composé de grand nombre d'agents

Tableau .2.2. Différences entre agents cognitifs et agents réactifs [17]

## 2.2. Les systèmes Multi-Agents

### 2.2.1. Définition d'un système Multi-Agent

L'agent décrit ci-dessus est destiné à interagir avec ses semblables au sein d'un groupe, dénommé *système Multi-Agent (SMA)*.

« On appelle *système Multi-Agent*, un système composé des éléments suivants :

- # Un environnement  $E$ , c'est à dire un espace disposant généralement d'une métrique,
- # Un ensemble d'objets  $O$ , ces objets sont situés, c'est à dire que, pour tout objet, il est possible à un moment donné, d'associer une position dans  $E$ . Ces objets sont passifs, c'est à dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- # Un ensemble  $A$  d'agents, qui sont des objets particuliers ( $A \subseteq O$ ), lesquels représentent les entités actives du système.
- # Un ensemble de relation  $R$  qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- # Un ensemble d'opérations  $OP$  permettant aux agents de  $A$  de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de  $O$ .
- # Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification. » [15]

D'une manière plus simple, un SMA est un ensemble d'agents évoluant dans un environnement commun et interagissant entre-eux selon une certaine organisation. Ou encore, c'est un ensemble d'entités qui coordonnent leurs connaissances, buts, expériences et plans pour agir ou résoudre des problèmes, incluant le problème de la coordination interagent lui-même.

Les agents composent un système, car ils constituent un ensemble cohérent autour d'un objet commun. L'objet qui les relie peut prendre diverses formes : ce peut être un objectif commun (par exemple, résoudre un problème), un langage commun le minimum

étant un environnement commun. L'ensemble des agents forme un groupe à cause de leur interaction. Selon les objectifs qu'ils poursuivent et leurs capacités à les atteindre, l'interaction entre les membres du groupe peut être coopérative, conflictuelle, ou tout autre type de relation intermédiaire entre ces deux extrêmes.

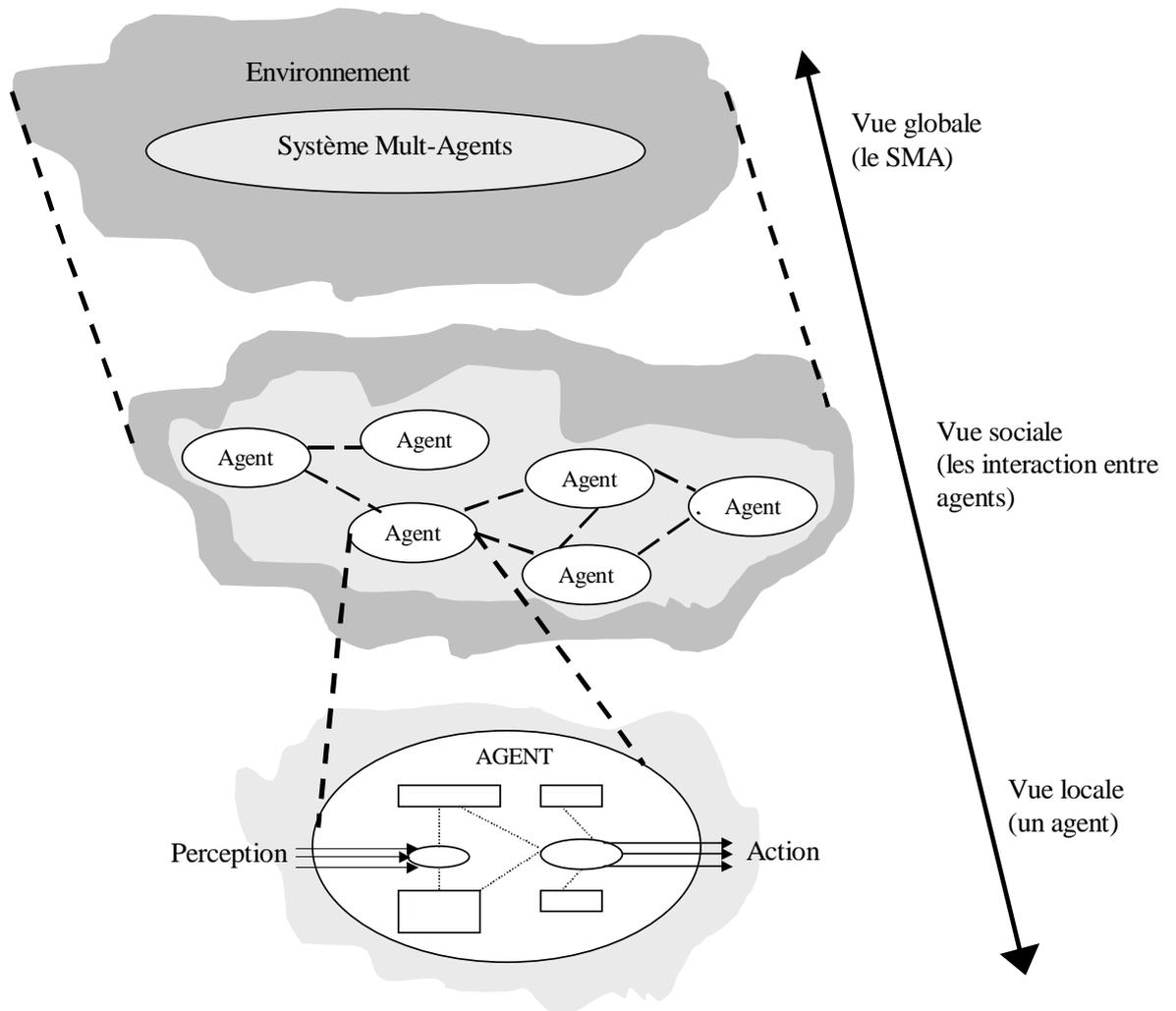


Figure .2.3. Système Multi-Agents vu selon différents niveaux de détail [17]

Alors que la description d'un agent donne une vision locale du système, la description du SMA offre la vue globale et externe sur le système. Pour obtenir une vision complète, il faut ajouter la description intermédiaire qui concerne l'aspect social, interne au système, constitué par l'ensemble des interactions entre agents (figure 2.3). C'est par l'intermédiaire de cette couche d'interactions que les comportements individuels interfèrent et composent le comportement global du système. Inversement, le comportement global influe sur les comportements individuels via cette couche sociale.

### **2.2.2. Organisation Multi-Agent**

Comme toute société, un SMA est basé sur un ensemble de règles régissant les interactions entre ses membres, en particulier par son organisation. Cette dernière constitue une autre facette du système. Il s'agit du cadre organisationnel qui fixe les rôles des agents dans le groupe et donc les règles d'interaction entre eux.

Deux modèles d'organisation fondamentalement différents sont souvent distingués dans la littérature [17] : l'organisation émergente, et l'organisation support d'activités.

#### *Organisation émergente*

Ce premier modèle concerne l'émergence d'organisation. En effet, graduellement, une forme d'organisation se met en place ou, plus précisément, un observateur a l'impression de voir apparaître (émerger) un comportement structuré parmi les agents. Dans ce modèle, chaque entité, par son action locale, participe au développement de l'ensemble sans qu'aucune d'entre elles ne dirige les autres.

Ces systèmes mettent généralement en jeu un nombre assez important d'individus. Leur nombre, ajouté au fait qu'ils n'ont pas conscience de leur appartenance à un groupe, conduit à une grande souplesse du système. C'est l'adaptabilité de chaque agent qui se répercute au niveau supérieur. Il suffit que les conditions environnementales varient pour que chaque individu réagisse différemment et par conséquent, des changements soient observables au niveau du groupe.

La conception émergente de l'intelligence conduit vers la conception des systèmes d'agents réactifs. A l'instar des sociétés d'insectes, un grand nombre d'agents de faible granularité<sup>4</sup> peut présenter un comportement global cohérent et efficace. La plupart des SMAs réactifs considèrent que la notion d'environnement est fondamentale pour la coordination des actions entre plusieurs agents.

Cette tendance prétend qu'il n'est pas nécessaire que les agents soient intelligents pour que le système dispose d'un comportement global intelligent. Des mécanismes de réaction aux événements, ne prenant en compte ni une explication des buts, ni des mécanismes de planification peuvent alors résoudre des problèmes qualifiés de complexes.

#### *Organisation support d'activités*

Par contre à une organisation émergente, les agents dans le modèle d'organisation support d'activités sont intégrés dans une structure organisationnelle. Dans laquelle les

---

<sup>4</sup> La granularité est définie comme le degré de détail des connaissances de l'agent ou comme le nombre de traitements que l'agent effectue au cours d'interactions avec les autres agents [14]

comportements des agents vis-à-vis de leurs semblables sont délimités par leurs rôles respectifs. Dans ce cas, l'organisation fournit un schéma pour l'activité et l'interaction par la définition des rôles, des comportements et des relations d'autorité.

Ce modèle se rapproche plus des organisations humaines car chaque agent est autonome tout en ayant connaissance de ce qu'il doit faire et comment se comporter avec tel ou tel agent en fonction de leurs rôles respectifs. Ces modes de comportement induisent des organisations *moins flexibles* que celles proposées par le modèle d'émergence. En revanche, ils ont l'avantage de représenter de manière explicite les liens entre les agents ou les rôles joués par ceux-ci.

Contrairement à l'organisation émergente, cette organisation conduit vers la construction des systèmes d'agents cognitifs constitués d'un petit nombre d'agents de forte granularité : chaque agent est apparenté à un système expert plus ou moins évolué. Les actions de ces agents seront ainsi réfléchies en ce sens qu'elles sont basées sur les connaissances de l'agent (sur lui-même, sur les autres et sur son environnement) et les objectifs qui le guident.

### **2.2.3. L'interaction dans les SMAs**

La notion d'interaction est au centre de la problématique des SMAs. De ce fait, les systèmes d'interactions constituent l'objet d'étude essentiel des SMAs et servent à formuler le rapport qui existe entre l'agent d'une part et l'organisation dans sa globalité d'autre part.

Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Les interactions s'expriment ainsi à partir d'une série d'actions dont les conséquences exercent en retour une influence sur le comportement futur des agents. Les agents interagissent le long d'une suite d'événements pendant lesquels ils sont d'une certaine manière en contact les uns avec les autres, que ce contact soit direct ou qu'il s'effectue par l'intermédiaire d'un autre agent ou de l'environnement.

Un agent peut agir sur le monde qui l'environne, c'est à dire sur les autres agents présents dans son univers et sur l'environnement lui-même (les objets passifs composant le monde dans lequel évolue l'agent). Cette intervention peut prendre la forme d'une modification de l'état des autres agents qu'il côtoie, que ce soit au niveau de leurs connaissances (ex : envoi d'information) ou au niveau de leur activité (ex : demande d'engagement).

L'interaction est à la base de la constitution d'organisations et simultanément elle suppose la définition d'un espace et généralement d'une organisation préétablie dans lesquels les interactions peuvent se produire. Cette notion est à la fois source et produit de la permanence de toute organisation. Enfin, l'interaction est la conséquence de l'aspect pluriel des sociétés multi-agents, en particulier une dimension supplémentaire à l'individu. Ce dernier, n'est plus le centre de l'univers, mais il constitue un nœud d'un ensemble d'échanges et d'interdépendances qui le façonnent et lui donnent tout son sens : un agent sans interaction avec d'autres agents n'est plus qu'un corps isolé, qu'un système de traitement d'informations, dépourvu de caractéristiques adaptatives [15].

#### *Situation et type d'interaction*

Les interactions entre agents s'expriment sous diverses formes. Mais au-delà de la diversité superficielle, il est possible de dégager des différences et des points communs à un niveau plus profond. La notion de situation d'interaction permet de décrire les types d'interaction en les reliant aux éléments qui la composent. Elle sert à définir des catégories abstraites indépendantes de leurs réalisations concrètes.

*« On appelle situation d'interaction un ensemble de comportements résultant du regroupement qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs en tenant compte des contraintes provenant des ressources plus ou moins limitées dont ils disposent et leurs compétences individuelles. »[15]*

La notion de situation d'interaction permet la classification des différents types d'interaction à travers trois paramètres caractérisant n'importe quelle situation. Ces trois composantes principales de l'interaction à savoir la nature des buts, l'accès aux ressources et les compétences des agents vont permettre de faire une typologie des situations comme le montre le tableau 2.3.

Le premier critère de classification s'intéresse à la compatibilité des buts entre les agents. Le second traite l'accès aux ressources, la question posée est : les ressources sont-elles suffisantes pour tous les agents, est ce qu'il y a des conflits pour obtenir des ressources ? Le dernier critère concerne l'autosuffisance des agents : un agent a-t-il tous les compétences lui permettant de satisfaire ses objectifs ?.

Le tableau présente trois catégories d'interaction : *l'indépendance, la coopération et la compétition*. La situation d'indépendance ne pose aucun problème, elle se résume à la simple juxtaposition des actions des agents pris indépendamment sans qu'il y ait effectivement d'interaction. Les deux autres catégories de coopération et de compétition

présentent des situations d'interaction plus complexes dans lesquelles le concepteur du SMA doit fait appel à des techniques spécifiques pour la résolution des situations conflictuelles qui constituent à la fois l'effet et la cause d'interaction [15].

<i>Buts</i>	<i>Ressources</i>	<i>Compétences</i>	<b>Types de situation</b>	<i>Catégorie</i>
<i>Compatibles</i>	Suffisantes	Suffisantes	<i>Indépendance</i>	Indifférence
<i>Compatibles</i>	Suffisantes	Insuffisantes	<i>Collaboration simple</i>	Coopération
<i>Compatibles</i>	Insuffisantes	Suffisantes	<i>Encombrement</i>	
<i>Compatibles</i>	Insuffisantes	Insuffisantes	<i>Collaboration coordonnée</i>	
<i>Incompatibles</i>	Suffisantes	Suffisantes	<i>Compétition individuelle pure</i>	Antagonisme
<i>Incompatibles</i>	Suffisantes	Insuffisantes	<i>Compétition collective pure</i>	
<i>Incompatibles</i>	Insuffisantes	Suffisantes	<i>Conflits individuels pour des ressources</i>	
<i>Incompatibles</i>	Insuffisantes	Insuffisantes	<i>Conflits collectifs pour des ressources</i>	

*Tableau .2.3. Classification des situations d'interaction [15]*

Les situations conflictuelles naissent essentiellement d'un manque de ressources et/ou de l'existence d'une relation de dépendance entre les actions des agents. Ces situations nécessitent des interactions supplémentaires pour sortir de ces conflits, qu'il s'agisse de techniques de négociation d'arbitrage ou d'utilisation d'un règlement, voire de recours à la compétition et à la force. Ces moyens de résolution des conflits sont fournis par l'organisation, les mécanismes de coordination et les capacités sociales individuelles des agents.

*Solution apportée par l'organisation*

Les règles d'interaction issues de l'organisation permettent de résoudre les conflits dans lesquels les rôles respectifs des intervenants dictent les comportements à adopter. La relation hiérarchique, par exemple, indique clairement quel est le décideur entre deux agents.

*Solution apportée par la coordination*

Les mécanismes de coordination que les agents sont capables de mettre en œuvre fournissent également des solutions aux situations de conflit. L'appel d'offre et les

enchères sont également des mécanismes classiquement utilisés pour l'allocation des tâches dans des contextes distribués. Le vote, qui donne raison à la majorité, est un moyen de prendre une décision dans un groupe.

#### *Solution apportée par le raisonnement*

La négociation, la persuasion, etc., sont également des moyens de sortir d'un conflit. Cependant, ce sont des capacités complexes et nécessitent des méthodes plus élaborées pour les mettre en œuvre.

### **3. Domaines d'application des Systèmes Multi-Agents**

Les systèmes multi-agents et les agents autonomes fournissent une nouvelle méthode pour analyser, concevoir, et implémenter des applications sophistiquées. En effet, ils font partie du domaine de l'Intelligence Artificielle distribuée, qui est issue de la rencontre de disciplines aussi différentes que l'intelligence artificielle, la sociologie, la psychologie sociale, les sciences cognitives, la biologie, etc.

Vu de la diversité de ces domaines, les domaines d'application des systèmes multi-agents sont particulièrement riches. Ces domaines peuvent être scindés en cinq grandes catégories [15] : la résolution de problèmes, la robotique distribuée, la simulation multi-agents, la construction de mondes hypothétiques et la conception génétique de programmes.

#### *La résolution de problèmes*

Au sens large la résolution de problèmes, 'Distributed Problem Solving' en terminologie anglo-saxonne, concerne en fait toutes les situations dans lesquelles des agents logiciels, c'est à dire des agents purement informatiques, accomplissent des tâches utiles aux êtres humains. Cette catégorie est subdivisée en trois classes [15]: la résolution distribuée de problèmes, la résolution de problèmes distribués et les techniques distribuées de résolution de problèmes.

Dans la première, c'est l'expertise globale ou le mode de résolution qui sont distribués, sans que le domaine le soit. C'est un ensemble d'agents, chacun n'ayant qu'une compétence restreinte par rapport à l'ensemble du problème à résoudre, qui doivent travailler ensemble à la poursuite d'un objectif commun (effectuer une tâche complexe en faisant appel à un ensemble de spécialistes disposant de compétences complémentaires). Dans la seconde au contraire, c'est le problème qui est lui-même distribué, les agents

pouvant avoir des compétences semblables ; on parle alors de résolution distribuée de problèmes distribués. La troisième classe, connu aussi sous le nom résolution par coordination, permet l'utilisation des agents en interaction pour résoudre des problèmes classiques. Dans ce cas, le domaine n'est pas distribué et l'expertise ne l'est pas non plus.

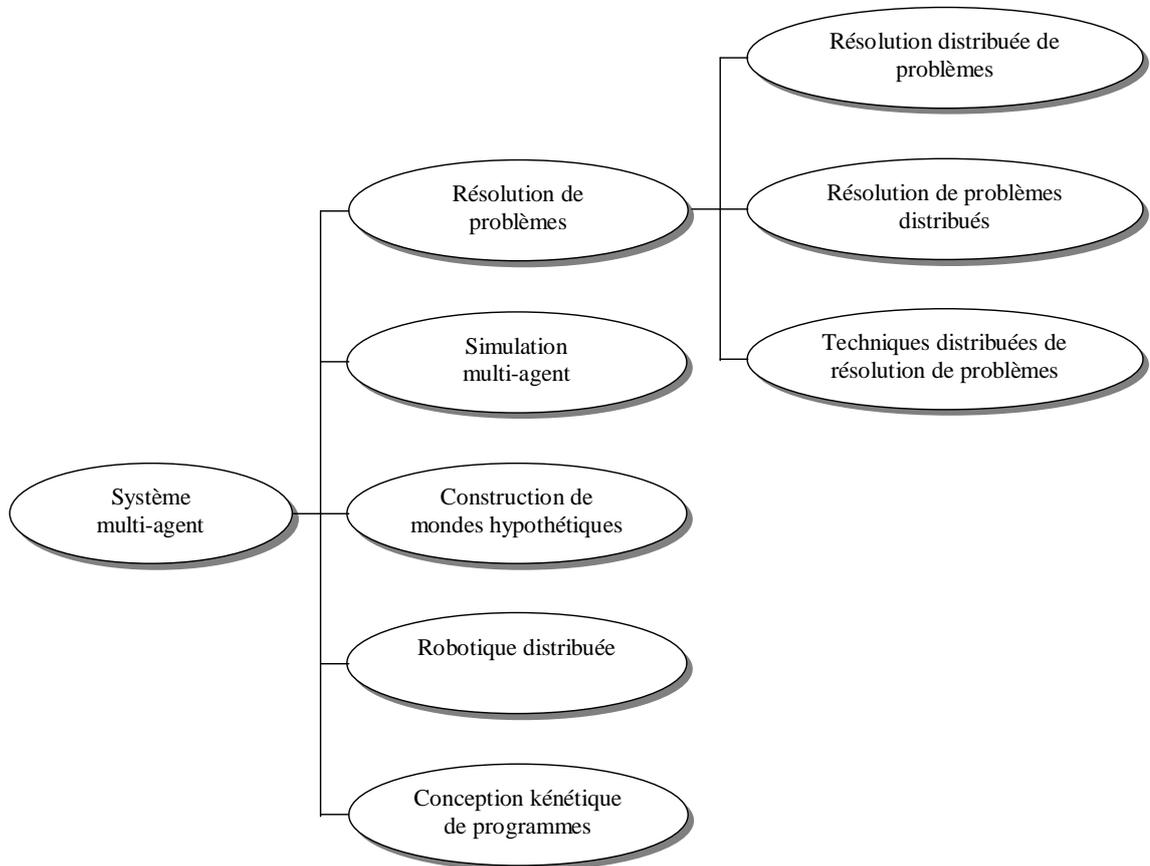


Figure .2.4. Une classification des différents types d'application des systèmes multi-agents [15]

### La simulation multi-agent

La simulation est une branche très active de l'informatique qui constitue l'un des plus puissants outils d'analyse des systèmes complexes. Elle consiste à analyser les propriétés de modèles théoriques, dans l'objectif d'expliquer et de prévoir les phénomènes naturels. Pour cela, les chercheurs construisent des modèles de la réalité, puis testent leur validité en les faisant 'tourner' sur ordinateurs.

Généralement, ses modèles sont donnés sous la forme de relations mathématiques entre des variables représentant des grandeurs physiques mesurables dans la réalité. Ces modèles et les techniques de simulation numérique associées présentent néanmoins certains problèmes (complexité, difficulté à modéliser l'action, ... etc.). Les systèmes

multi-agents apportent une solution radicalement nouvelle au concept même de modèle et de simulation dont laquelle la modélisation et la simulation peuvent également s'appuyer sur le même formalisme à la fois pour la conception du modèle et aussi pour sa réalisation.

La simulation multi-agent est fondée sur l'idée qu'il est possible de représenter sous forme informatique le comportement des entités qui agissent dans le monde et qu'il est ainsi possible de représenter un phénomène comme le fruit des interactions d'un ensemble d'agents disposant de leur autonomie opératoire [15]. A la différence des approches classiques, la simulation multi-agents ne se réduit pas à l'implémentation d'un modèle puis à l'analyse de la réponse de ce modèle en fonction des paramètres d'entrées, mais participe aussi au processus de recherche de modèles.

Cette technique a trouvé largement son application dans les sciences d'étude de l'environnement<sup>5</sup>, en offrant la possibilité de représenter directement les individus, leurs comportements et leurs interactions [15] ( par exemple simulation de la vie forestière), et dans la simulation de phénomènes distribués ( simulation des systèmes de production), la simulation est donc dynamisée par des agents (réactifs et/ou cognitifs) représentant le système étudié.

#### *La robotique distribuée*

L'objectif de la robotique distribuée est de réaliser un ensemble de robots qui coopèrent pour accomplir une mission. La contribution des SMAs réside dans la définition de mécanismes de coordination et de coopération entre des agents concrets qui se déplacent dans un environnement réel. De cette catégorie d'applications d'autres domaines spécifiques ont été développés : la robotique mobile, la robotique fixe (ou cellulaire), la coordination de véhicules, qu'il s'agisse d'avions, de voitures ou de bateaux [15].

#### *La construction de mondes hypothétiques*

Bien qu'il ne s'agisse pas d'applications à proprement dit, puisqu'elles ne permettent pas de résoudre un problème concret, n'utilisent pas des agents physiques et ne simule aucun monde réel. La construction de mondes synthétiques tient une large part dans les recherches portant sur les systèmes multi-agents parce qu'elle permet d'analyser certains mécanismes d'interaction de manière plus fine que ne pourrait le faire une véritable application. Par exemple, l'analyse de protocole de coopération ou la compréhension de

---

<sup>5</sup> Les sciences de l'environnement : la géographie, la biologie, l'écologie, les sciences sociales, la physique et la chimie...etc.

l'influence du comportement sur la régulation d'une société sont souvent plus parlant sur des mondes 'virtuels' que sur des applications immédiatement rentables [15].

#### *La conception kénétique<sup>6</sup> de programmes*

La kénétique propose une nouvelle technologie de construction de logiciels à partir des concepts d'agents et d'interaction. Cherchant à dépasser les techniques informatiques pour réaliser des logiciels distribués fonctionnant avec une grande souplesse et une grande adaptabilité à leur environnement, l'objectif de la conception kénétique de logiciels est de donner naissance à des systèmes informatiques capables d'évoluer par interaction, adaptation et reproduction d'agents relativement autonomes et fonctionnant dans des univers physiquement distribués [15].

## **4. Application des SMAs dans l'industrie**

Pendant la dernière décennie, une grande quantité des travaux de recherche ont réussi d'adapter les SMAs dans plusieurs environnements industriels. De ces travaux, les chercheurs ont découlé un nombre très important d'applications à tel point qu'un nombre important de publications s'est consacré à leur étude.

Bien que la majorité des applications sont encore au stade de simulation ou de prototypage et non pas encore devenues des produits commercialisés, les recherches menées autour des SMAs montrent leurs potentiels, leurs capacités à modéliser des systèmes complexes ainsi que l'étendue de leurs applications.

Les applications industriels se repartissent en plusieurs thématiques de recherche [14, 16, 18, 19] :

- # L'aide à la conception ;
- # L'ordonnancement ;
- # Les systèmes d'informations coopératifs ;
- # La planification et le contrôle de la production ;
- # Simulation des systèmes industriels.

Dans le domaine de la conception, les SMAs fournissent un outil idéal pour permettre l'intégration de multiples contraintes dans un processus de conception et/ou l'intervention

---

<sup>6</sup> Projet scientifique consiste à pouvoir étudier concevoir et réaliser des univers ou des organisations d'agents artificiels (électroniques ou informatiques) capables d'agir, de collaborer à des tâches communes, de communiquer, de s'adapter, de se représenter l'environnement dans lequel ils évoluent, et de planifier leurs actions, pour répondre à des objectifs définis extrinsèquement (par un programmeur humain par exemple), soit intrinsèquement à partir d'un objectif général de survie [15].

coordonnée de plusieurs concepteurs. Les agents permettent de représenter et de gérer différentes options de conception. Chacun interagit avec les autres afin de détecter et de résoudre les différentes incohérences, redondances qui apparaissent en cours de conception.

Dans le domaine de la planification, de l'ordonnancement ou du suivi d'exécution, les techniques multi-agents ont fortement été utilisées. Dans ce type d'application, l'identification des agents est moins directe dans la mesure où ils représentent des ressources (ouvriers, ateliers, outils, machines, ...), des produits ou des opérations pour faciliter la planification, l'ordonnancement ou la supervision.

Le développement des systèmes d'information coopératifs répond aux besoins soulignés par les nouvelles organisations des entreprises telles que la chaîne logistique. Grâce aux technologies agents, il est possible d'envisager la coopération de logiciels existants dans différentes entreprises en support à des activités telles que la conception, la planification, la simulation, la distribution de produits, ... tout en assurant la reconfigurabilité, la répartition du système ainsi que le respect de l'autonomie et de l'indépendance des partenaires (chacun conserve son propre système de gestion, son propre système d'information, sa propre organisation informatique).

Un domaine supplémentaire, dans lequel les Systèmes Multi-Agents sont une ouverture possible, est celui de la modélisation et de la simulation de systèmes industriels. En effet, les SMAs offrent un formalisme de modélisation et de simulation qui est en relation directe avec le domaine du problème : à la fois structurellement (les éléments du modèle sont également des entités du domaine) et sémantiquement (le langage du modèle est celui du domaine).

Citons maintenant, à titre indicatif, quelques exemples d'application des SMAs dans le contexte industriel :

Le premier est un système multi-agent pour la conception d'une ligne d'assemblage [14]. Il s'appuie sur deux SMAs. Le premier sélectionne parmi un ensemble de séquences d'assemblage, la séquence présentant un coût minimum. Le second organise la chaîne d'assemblage en fonction des contraintes de production associées.

Le second concerne le système développé par l'usine d'assemblage de General Motors [16]. C'est un système de contrôle d'approvisionnement en air dans un atelier de peinture. Chaque humidificateur, brûleur, générateur de vapeur est contrôlé par un agent autonome et réagit aux différentes configurations de l'environnement. Les gains issus de

cette application sont : minimisation de la quantité de peinture, réduction du logiciel de control, réduction du temps d'installation et simplification de la gestion du système.

Le troisième est un prototype informatique mettant en œuvre une méthode de réordonnancement coopératif d'ateliers de production confrontés à des événements perturbateurs [14]. La méthode repose sur une modélisation organisationnelle accordant une autonomie aux machines de production leur permettant de coopérer entre elles afin de traiter au plus tôt une perturbation.

Le dernier concerne la modélisation et la simulation d'une cellule de production par un système multi-agent [19]. Dans ce système chaque entité de la cellule est représentée par un agent autonome qui possède un comportement individuel et la capacité de prise de décision locale.

## **5. Avantages et inconvénients des SMAs**

Au cours des années 1990, l'approche multi-agents a été considérée comme un sujet à la mode, où plusieurs recherches ont contribué dans l'effort global pour tirer des applications industrielles.

Cependant, malgré la densité des efforts et des projets exécutés, il reste incompréhensible où et comment les systèmes multi-agents peuvent fournir des résultats mieux que celles fournies par l'application des approches traditionnelles. Les auteurs souvent s'étendent sur la description théorique des hypothèses de conception et les caractéristiques structurelles, mais ne fournissent pas des indicateurs satisfaisant sur leur niveau d'application (l'application des SMAs). En conséquence, il est évident que l'absence d'une réponse claire à cette question fondamentale, élargirait dramatiquement l'écart technologique entre la recherche et l'application industrielle.

Guider par leur expérience, et la littérature étudiée les auteurs dans [16] ont énoncé des remarques et des considérations concernant le potentiel réel des bénéfiques (the real potential benefits) et les problèmes majeurs et actuels inhibant la propagation du niveau paradigme.

Le paradigme des systèmes multi-agents est caractérisé par quelques propriétés générales qui donnent un contexte spécifique où il peut être appliqué, peut être inhiber ou accroître leur applicabilité.

En ce qui concerne les points forts, cinq caractéristiques de base peuvent être identifiées : les systèmes multi-agents sont convenables pour les applications modulaires, décentralisé, complexe, dynamique et malle structurée.

- # La modularité permet au système d'être modifiable, module par module, donc le coût de la reconfiguration est réduit de façon spectaculaire et la réutilisation du système s'accroît.
- # La décentralisation minimise l'effet des modifications local sur les autres modules du système. En fait, dans un système décentralisé, le comportement d'un module influence seulement les modules qui ont des interactions avec lui ; alors que la partie restante du système est inaffectée. Cette caractéristique est importante lors du traitement des systèmes de production caractérisés par la distribution de la production et des unités logistiques souvent affectées par des perturbations locales (ex : panne des machines, manque du matériel) qui nécessite un re-ordonnement local.
- # La capacité d'enfoncer des fonctions multi-objectives avec des contraintes et des variables multiples qui doivent être contrôlé fournit un compromis raisonnable pour la résolution des problèmes complexes.
- # Le concept multi-agents permet de modéliser effectivement des systèmes physiquement dynamiques. Pour un système de production qui modifie fréquemment sa configuration, à cause des événements internes ou externes (capacité des ressources, besoins du marché) ceci constitue une caractéristique primordiale.
- # Finalement, lorsqu'on conçoit un nouveau système de production, il y a des spécifications non disponibles au moment de la conception : a titre d'exemple, quelles sont les entités qui doivent se communiquer, comment concevoir les interfaces entre les entités communicantes. Par conséquent le système ainsi conçu risque d'être mal structuré lorsque toutes les exigences sont clairement déclarées, ceci implique un dépassement des délais et des coûts à la réalisation du projet. Les systèmes multi-agents peuvent contribuer à l'évitement de ces pièges. Les agents peuvent interagir avec d'autres agents dotés du rôle de modifier l'environnement qui peut être dirigées par les premiers agents.

Au contraire, quant aux problèmes critiques empêchant une application très répandue des SMAs dans le domaine de la production et du control, les points suivants peuvent être présentés.

- # Premièrement, la résolution des problèmes basée sur la notion d'agent n'assure pas toujours une solution optimale du problème, et peut mener à des temps de calcul instable, ce qui constitue une solution non faisable.
- # L'approche SMA échoue dans la modélisation des systèmes qui ne peuvent pas être décomposer en sous systèmes et sous objectives. Dans l'objectif de quantifier l'exposition du model basé sur les agents à cette limitation, il est nécessaire de concevoir raisonnablement des tests adéquats pour mesurer la qualité des performances du système.
- # Les SMAs nécessite un investissement large dans les équipements du contrôle et les équipements du support. En fait, tester et régler ces équipements reste lourd et coûteux. Traditionnellement, la simulation est utilisée dans l'objectif de tester les SMAs sous des conditions opératoires. Malheureusement, la simulation ne peut pas couvrir une large portée de ces conditions (telle qu'elle est dans l'utilisation des systèmes), sans creuser l'efficacité des testes.

## **6. Problèmes soulevés dans la conception de SMA**

Concevoir un système multi-agents, c'est avant tout analyser et résoudre un très grand nombre de problèmes. La spécification d'une architecture orientée agent et les interactions entre ces derniers soulève un grand nombre de questions qui recouvrent des domaines très divers. Comment les agents se représentent-ils leur environnement et les autres agents ? Comment coopère t-ils ? Peuvent-ils assurer leur viabilité ? Sont-ils capable d'adapter leur comportement à des modifications du milieu dans lequel ils évoluent ? Sont-ils pris dans des rapports hiérarchiques ou d'autorités entre eux ?.

Ces différentes questions constituent les grands thèmes de la kénétique, elles peuvent être classées en cinq catégories principales [15] : la problématique de l'action, l'individu et sa relation au monde, l'interaction, l'adaptation, la réalisation et l'implémentation des SMAs. La dernière catégorie sort du cadre de la conception et englobe les problèmes d'implémentation et de mise en œuvre des SMAs.

*La problématique de l'action [15]*

L'action est un concept fondamental pour les SMAs. Elle repose sur le fait que les agents accomplissent des actions qui vont modifier l'environnement des agents et donc leur prise de décision future.

La problématique de l'action est souvent peut considérée, car il s'agit d'une question subtile qui donne l'impression d'être aisée à résoudre alors qu'elle pose de nombreuses difficultés. La question peut se poser ainsi : comment plusieurs agents peuvent-ils agir simultanément et quelles sont les conséquences de leurs actions dans l'environnement ?.

*L'individu et sa relation au monde [15]*

Les différents thèmes relatifs à l'individu portent, d'une part, sur son architecture et son organisation interne et, d'autre part, sur l'ensemble des moyens qu'il met en œuvre pour assurer sa viabilité et satisfaire ses objectifs. Il s'agit évidemment de thèmes essentiels car la réalisation d'un SMA passe nécessairement par la description de l'architecture des agents et des fonctionnalités dont ils disposent pour accomplir leurs tâches.

*L'interaction [15]*

Pour un agent, interagir avec un autre constitue à la fois la source de sa puissance et l'origine de ses problèmes. C'est en effet parce qu'ils coopèrent que des agents peuvent accomplir plus que la somme de leurs actions, mais c'est aussi à cause de leur multitude qu'ils doivent coordonner leurs actions et résoudre des conflits. Pour un agent, l'autre est à la fois le pire et la meilleure des choses.

Traiter le problème de l'interaction, c'est se donner les moyens non seulement de décrire les mécanismes élémentaires permettant aux agents d'interagir, mais aussi d'analyser et de concevoir les différentes formes d'interaction que des agents peuvent pratiquer pour accomplir leurs tâches et satisfaire leurs buts.

*L'adaptation [15]*

On peut voir le problème de l'adaptation structurelle et comportementale d'un ensemble d'agents de deux manières différentes ; soit comme une caractéristique individuelle des agents, et on parle alors d'apprentissage, soit comme un processus collectif mettant enjeu des mécanismes reproductifs (évolution).

Bien que les deux approches soient généralement traitées de manière distincte, il est possible de les considérer globalement comme un processus à la fois individuel et collectif d'adaptation. Ces problématiques font l'objet de recherches importantes dans le domaine

de l'intelligence artificielle distribuée. Le premier se consacrant plus naturellement à l'apprentissage par des techniques symboliques ou neuronales, et le second à l'évolution en utilisant des algorithmes génétiques.

## **7. Conclusion**

Depuis leur apparition, les systèmes Multi-Agents ont pris une place de plus en plus importante en informatique. Ce domaine fournit un ensemble de concepts adaptés à la description et à la compréhension de phénomènes ou comportements distribués. Il permet également de valider et de mettre en œuvre ces concepts au travers de plates-formes informatiques.

En introduisant la problématique de l'intelligence collective et de l'émergence de structure par interaction, les SMAs, ont constitué un outil idéal pour représenter des problèmes possédants de multiples méthodes de résolution. Tirant profit de leurs propriétés de coordination et de leur prise de décision, ils peuvent apporter beaucoup dans l'étude et l'analyse des systèmes physiquement dynamiques à évolution rapides.

Par oppositions aux systèmes centralisés, les SMAs sont facilement manipulables dans la mesure où il est plus facile d'ajouter un nouvel agent à un SMA que d'ajouter de nouvelles capacités à un système centralisé. Aussi, grâce à la redondance de certains agents, le contrôle et la responsabilité dans les SMAs sont partagés entre plusieurs agents et le système peut alors tolérer les pannes de certaines parties. Ce qui n'est pas le cas pour un système centralisé où une seule défaillance cause l'arrêt total du système.

Bien entendu, on ne peut pas affirmer que les SMAs doivent être utilisés lors de l'étude de tout système complexe, dans la mesure où l'approche Multi-Agent, d'ailleurs comme toute autre approche, ne serait efficace que si certaines conditions sont satisfaites. Généralement, un SMA conviendrait à toute application qui soit distribuée soit géographiquement, soit fonctionnellement. Toutefois, et dans bien des cas, un SMA reste toujours efficace, même en absence de distribution au niveau des informations et des connaissances. En effet, le fait d'avoir plusieurs agents peut accélérer le traitement au sein d'un système grâce à une exécution en parallèle de plusieurs processus.

Les recherches menées autour des SMAs ont conduit à de nombreuses réalisations qui, bien qu'encore du domaine de la recherche, montrent leurs potentiels et l'étendue de leurs applications. Le domaine des SMAs est en pleine progression. Les modèles et les outils qu'il offre permettent d'envisager de multiples applications.

# *Chapitre III*

---

## *Pilotage des systèmes flexibles de production*

## **1. Introduction**

L'évolution continue et rapide de l'environnement économique a entraîné des changements importants dans les moyens de production et dans l'organisation des entreprises. De plus en plus, les mécanismes habituels, centralisés et séquentiels, de conception, de planification, d'ordonnancement et de supervision se révèlent trop rigides et ne permettent pas aux entreprises de faire face, et encore moins d'anticiper les fluctuations du marché et l'évolution de la demande.

La flexibilisation des moyens de production dans les années 80 a rapidement été suivie par une remise en cause des moyens de gestion et de commercialisation, pour finalement aboutir à des organisations dynamiques où la décentralisation des processus de décision, l'autonomie accrue des opérateurs et la coordination, voire la coopération, des activités sont la clé de réussite.

Pour accroître la flexibilité et la réactivité de l'appareil de production, le système de pilotage joue un rôle primordial dans la maîtrise des activités de production et l'amélioration des performances du système de production. Au-delà des problèmes matériels de l'atelier, c'est tout le système d'information -qui gouverne les flux physiques- qui doit être analysé et rationalisé.

Le pilotage des activités de production est l'activité destinée à optimiser l'utilisation des ressources de l'atelier et à piloter l'exécution qui a été planifié, tout en assurant une réaction aux différentes perturbations. Le mot pilotage est utilisé pour souligner l'interactivité par opposition au mot traditionnel de suivi de production qui semble ne représenter qu'une course après la réalité sans souhait d'intervention.

L'objectif du chapitre est de présenter la problématique du pilotage en temps réel. Pour faire, nous introduisons son cadre global, celui de la gestion des systèmes flexibles de production. Nous exposons, ensuite, les notions de pilotage et de système de pilotage pour présenter enfin quelques approches traitant la conduite en temps réel des systèmes de production.

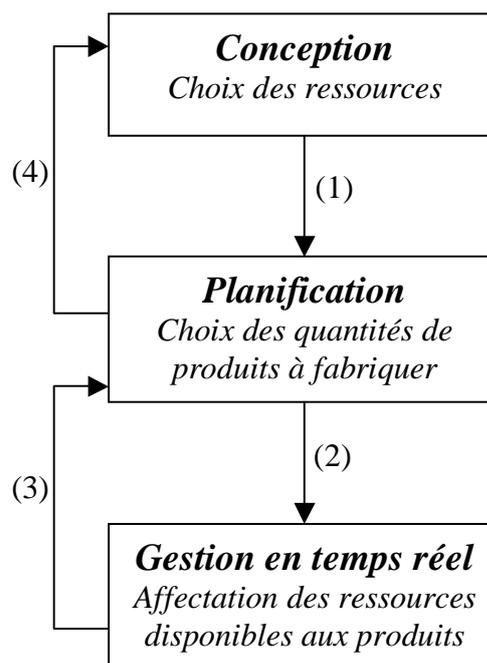
## **2. La gestion des systèmes flexibles de production**

Les nouveaux systèmes de production, dotés de caractéristiques de flexibilité et de réactivité, présentent de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes de production, en particulier, leur possibilité de s'adapter rapidement en cas de variation de la

demande. Toutefois, plusieurs arguments leur sont défavorables, notamment : les coûts d'investissement très élevés et le temps nécessaire à les mettre au point. Ainsi, il est nécessaire de résoudre raisonnablement les différents problèmes liés à l'installation ou au fonctionnement du système flexible, afin d'éviter que l'investissement correspondant s'avère non rentable.

Afin d'assurer la rentabilité maximale de l'outil de production, de surmonter les coûts de réalisation et la complexité des systèmes flexibles de production il est indispensable de mettre en œuvre une gestion très adaptée, assurant l'amélioration de la productivité et l'accroissement de la qualité. Ainsi, la gestion envisagée doit chercher un compromis entre les différents problèmes liés aux systèmes flexibles de production.

La figure 3.1 présente la structure globale hiérarchico-cyclique de la gestion d'un système flexible de production et les interactions existant entre ces composants. La structure se constitue de trois blocs : la conception, la planification et la gestion en temps réel.



**Figure .3.1. Structure globale de la gestion d'un système flexible [5]**

Les fonctions définies pour chaque bloc sont les suivantes [5]:

- # *La conception* : permet de définir les ressources nécessaires à l'accomplissement de divers plans de production prévus pour le système ;

- # *La planification* : tenant compte des commandes, des stocks, des en-cours, des délais et des prévisions de commandes, détermine les quantités de produits à fabriquer durant chaque période de planification ;
- # *La gestion en temps réel* : détermine l'affectation des divers produits aux ressources disponibles. Elle regroupe les problèmes d'ordonnancement et de pilotage de l'atelier.

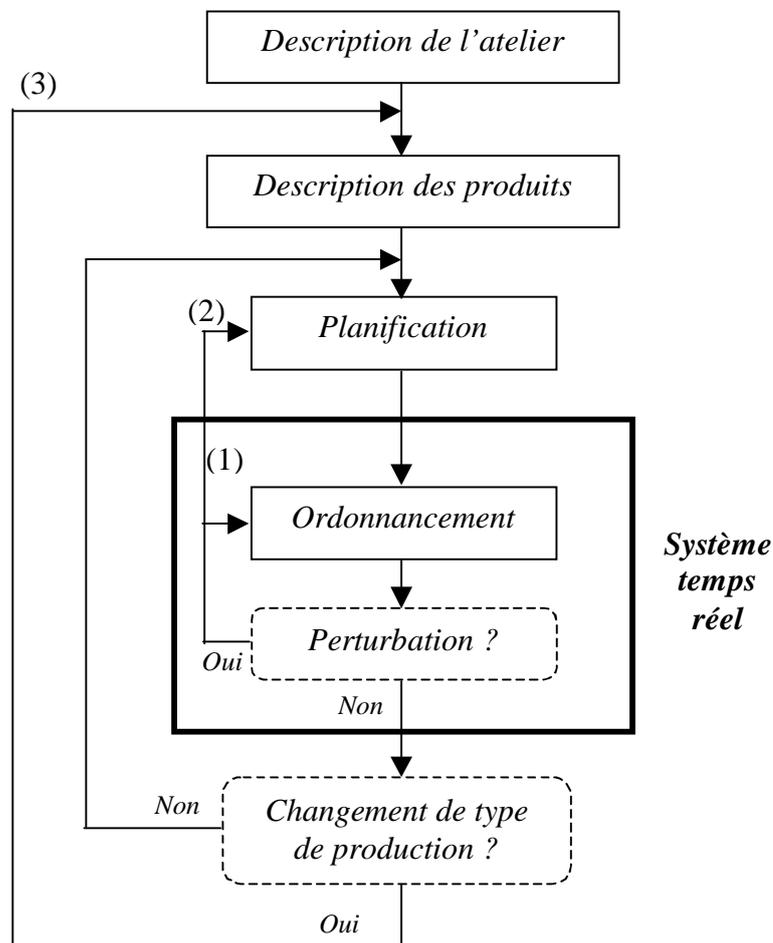
La figure 3.1 présente aussi les interactions directes entre les trois blocs. Ces interactions sont présentées à travers des flèches numérotées. L'interaction indiquée par la flèche (1) expose le fait que la répartition du travail pour une période de planification doit être réalisée en fonction des ressources du système (nombre et type de machine). La deuxième flèche annonce que la réalisation de la production prévue par la planification est prise en charge par la conduite en temps réel du système. Toute demande de modification des quantités à produire dans des cas de surcharge ou, dans des cas plus rares, de sous charge est signalée à la planification par le système de gestion en temps réel, c'est l'interaction indiquée par la flèche (3). La dernière interaction (4) consiste à chercher l'extension du système de production, par d'autres ressources, si les commandes sont nombreuses et que les délais de livraison deviennent trop longs. En cas de modification au niveau du processus de fabrication, les machines devenues inutiles peuvent être supprimées de l'atelier.

La dynamique de ce processus hiérarchico-cyclique est plus détaillée sur l'organigramme, de la figure.3.2., consacré à la gestion d'un atelier flexible. La description de l'atelier définit sa structure physique, c'est à dire le nombre de machine et leur type. Les ressources décrites représentent les éléments permanents de l'atelier.

La description des produits fournit les informations sur les gammes opératoires des divers produits (séquences des opérations, durée de traitement, ensemble de machines sur lesquelles chaque opération peut avoir lieu).

Le processus de planification détermine, suivant la gestion d'ateliers appliquée, un plan de production en tenant compte les exigences des clients (délai et qualité). Une fois le plan est établi, il convient de déterminer l'ordonnancement des pièces à produire en respectant certains critères (éviter les configurations trop fréquentes des machines, minimiser les durées de transfert, éviter d'avoir trop d'en-cours...), afin d'éviter une utilisation sous-optimale des ressources. Puis, lorsque la production est lancée, il faut essayer de respecter au mieux ce qui a été établi par l'ordonnancement. C'est la tâche

dévoie à la conduite de système. Les deux niveaux (ordonnancement et conduite) représentent la gestion en temps réel du système. Ils sont regroupés en un seul élément appelé *système temps réel*.



**Figure .3.2. Organigramme de la gestion d'un atelier flexible [5]**

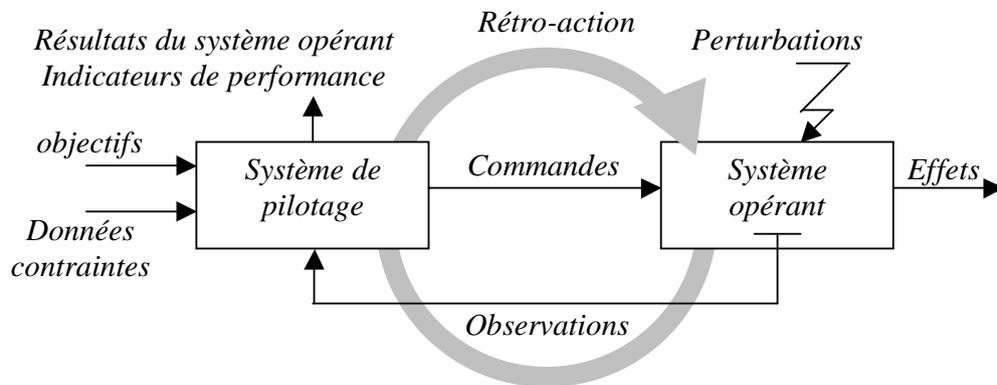
### **3. Le système de pilotage en temps réel d'un SFP**

L'atelier flexible est la conséquence naturelle de l'évolution de l'informatisation et l'utilisation de processus de décision complexe pour le pilotage des systèmes de production. En effet, l'amélioration des performances du système est tributaire de l'efficacité de son pilotage, terme auquel, il n'existe pas de définition unique ni stabilisée.

#### **3.1. Pilotage et système de pilotage**

De manière générale, 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 [27]. 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 l'imprécision des données et des perturbations subies par les systèmes opérants.



**Figure .3.3. Système de pilotage et son environnement [27]**

Pour un système de production le système de pilotage (ou de conduite) a pour rôle d'élaborer les ordres nécessaires à la partie opérative, de guider et piloter afin de satisfaire les objectifs de la production. Les fonctions essentielles de la gestion de production et l'élaboration de la décision sont classiquement identifiées et regroupées sur deux niveaux :

- # *La gestion prévisionnelle* qui assure la prise en compte prévisionnelle des besoins par l'anticipation et la programmation d'ensemble d'action ou décision.
- # *La gestion temps réel ou pilotage*, qui élabore les décisions et les actions réalisées en temps réel et déclenchées par un ensemble d'événements liés à l'état courant du système de production.

## **3.2. Le système de pilotage en temps réel**

La principale caractéristique d'un atelier flexible tient à son système de pilotage. Celui-ci doit veiller à la parfaite coordination de tous les composants de l'atelier et gérer les aléas pouvant perturber le système de fabrication. Le pilotage en temps réel a pour objectif la commande et le contrôle en temps réel de l'activité de l'atelier.

Grâce à la capacité autonome des centres d'usinage à s'adapter à des paramètres prédéfinis de fonctionnement, grâce au système souple de transfert permettant un accès aléatoire de la matière aux différents postes de transformation, et grâce à un système de commande contrôle automatique centralisé très complexe, la fabrication simultanée de

différents produits est assuré par un ordonnancement en temps réel. En effet, un tel ordonnancement suppose une gestion en temps réel de toutes les fonctions et de tous les aléas de production afin d'optimiser à chaque instant la charge de tous les composants du système.

Le système de pilotage d'un atelier flexible comprend généralement deux unités distinctes [24] :

- # L'ordonnancement chargé de la planification prédictive ;
- # Le suivi chargé de l'application du plan.

### *L'ordonnancement*

L'ordonnancement est le niveau de planification inférieur (court terme) dont l'objectif consiste à établir un plan de fabrication détaillé. Son objectif est de définir la meilleure utilisation des ressources de l'atelier dans des délais optimaux afin de remplir l'objectif de production. Pour cela, il s'agit de déterminer la succession, dans le temps, des différentes tâches en affectant ces tâches aux différents moyens de fabrication et en optimisant plusieurs critères : en-cours minimal, temps de passage dans l'atelier minimal, coût minimal,...etc. C'est une fonction très délicate de par le volume d'informations à traiter et les différentes règles à suivre. De plus, elle est largement dépendante du fonctionnement du système physique de production souvent remis en cause par des perturbations.

Le problème d'ordonnancement d'atelier est un cas particulier du problème général d'ordonnancement auquel une série d'hypothèses restrictives a été rajoutée ainsi qu'une précision de la terminologie<sup>7</sup>. Ce problème est caractéristique des préoccupations de gestion optimale des ressources issue du domaine de la gestion de production. Les problèmes d'ordonnancement sont très différents d'un atelier à l'autre, et il n'existe pas de méthode universelle permettant de résoudre efficacement tous les cas. La diversité des problèmes d'ordonnancement tient aux hypothèses et données prises en compte.

Les méthodes d'ordonnancement sont caractérisées par deux types d'approche : *méthodes à approche optimale* et *à approche heuristique* [25]. Dans le premier cas la solution espérée est obtenue directement, en revanche, dans le second cas, le résultat

---

<sup>7</sup> L'ordonnancement se base sur des variables que sont les tâches, les ressources, les contraintes et les objectifs. Face à un nouveau problème d'ordonnancement, il s'agit d'abord de préciser à quoi correspondent ces notions pour pouvoir décider en suite des méthodes de résolution à appliquer.

obtenu est comparé avec l'objectif fixé et, si l'écart est important, un nouveau traitement peut avoir lieu en modifiant les données d'entrée.

Dans les systèmes informatiques, l'ordonnancement est la fonction qui est la plus rarement implantée de façon satisfaisante. C'est une fonction complexe, soumise à de nombreuses perturbations et les outils informatiques proposés sont souvent mal adaptés.

#### *Le suivi*

La deuxième unité fonctionnelle dans le système de pilotage de l'atelier flexible est chargée de réaliser le planning prévisionnel fourni par l'ordonnancement. Cette fonction permet de fournir une photographie de la production à un instant donné et de détecter en temps réel tous les comportements anormaux ou non nominaux afin d'orienter au mieux le système de production.

### **3.3. Les architectures de pilotage**

Il existe plusieurs approches concernant les différentes structurations possibles pour un système de conduite. La figure 3.4 présente ces structures positionnées par rapport à la décentralisation de la capacité de décision et d'information [21].

#### *Les architectures centralisées*

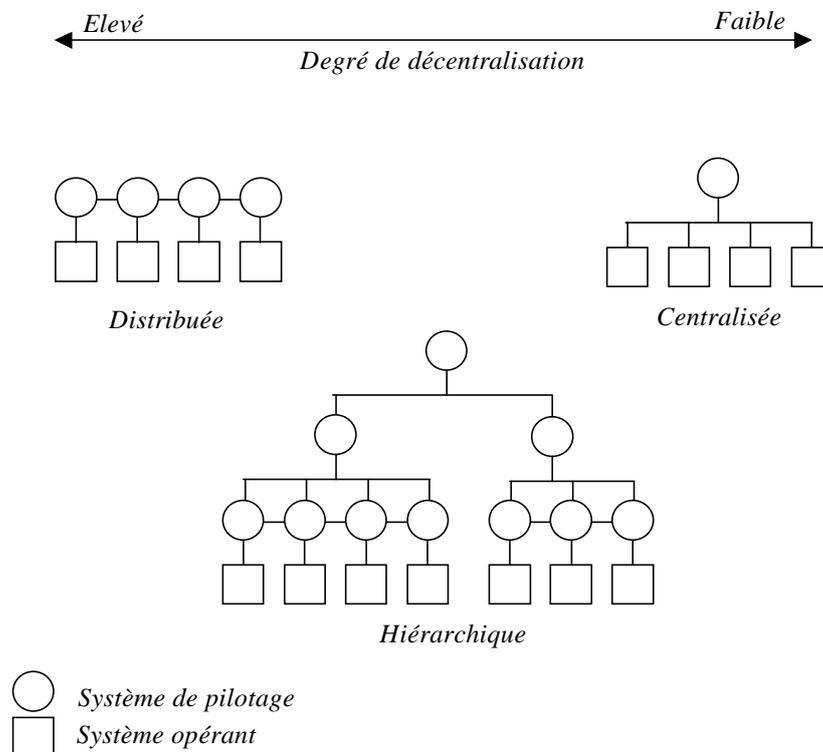
L'approche centralisée est très classique, elle se caractérise par une conduite localisée au sien d'une ressource unique qui gère seule, en temps réel, les événements qui surviennent tout au long de la production. Cette architecture se caractérise par un ordinateur central qui commande le processus de production et qui met à jour les bases de données globales en enregistrant toutes les activités du procédé.

Les avantages de cette approche sont ceux qui proviennent de la centralisation des informations et des capacités de décision : absence de conflit entre acteurs, gestion des données aisée,...etc. Les inconvénients se situent au niveau de l'accroissement de la complexité des informations et de décisions qui peuvent de plus en plus difficilement être prise en compte dans ce type d'approche, malgré les augmentations continues des capacités de traitement informatisées.

#### *Les architectures hiérarchisées*

Cette architecture se caractérise par une philosophie de niveau de commande disposée dans une structure pyramidale. Au sein de cette structure très répandue en gestion de production, chaque niveau coordonne les unités de pilotage du niveau inférieur, et ce

jusqu'au niveau le plus bas. La relation, à niveau donné, est donc de dépendance vis-à-vis du niveau supérieur et de dominance vis-à-vis du niveau inférieur.



*Figure .3.4. Structure de pilotage et degré de décentralisation [21]*

Chaque décision est élaborée au niveau où un problème est détecté (si leur autonomie leur permet de prendre ce type de décision). Les niveaux inférieurs traitent cette décision comme une contrainte et transmettent en retour une information de suivi au niveau supérieur. Cette première décentralisation permet de décomposer les processus décisionnels de manière récursive pour simplifier les résolutions. Cela permet de mieux appréhender la complexité décisionnelle et informationnelle et de limiter l'impact des perturbations.

#### *Les architectures décentralisées*

L'approche distribuée est fondée sur une distribution totale des capacités de décision et d'information. La structuration d'une telle approche rend le système extrêmement réactif, mais l'organisation est beaucoup plus complexe que dans le cas d'une structure moins décentralisée et donc plus facilement maîtrisable.

## 4. Problématique de la conduite en temps réel

### 4.1. La fonction conduite

Un système de gestion de production comprend cinq fonctions essentielles, organisées en étapes successives d'élaboration de la décision (figure .3.5.). Dans l'objectif d'augmenter la réactivité du système de production, il est nécessaire de ne plus considérer l'ensemble des fonctions seulement comme une succession de niveaux hiérarchiques, chaque niveau étant fortement subordonné au niveau supérieur, mais comme une coopération entre fonctions sous la forme de relations 'client/fournisseur' internes, orientées vers l'atteinte d'un objectif de rang supérieur. Les moyens disponibles sont engagés à chaque niveau de décision 'fournisseur' pour lui permettre de résoudre localement les problèmes posés, sans remettre en cause le contrat avec son client.

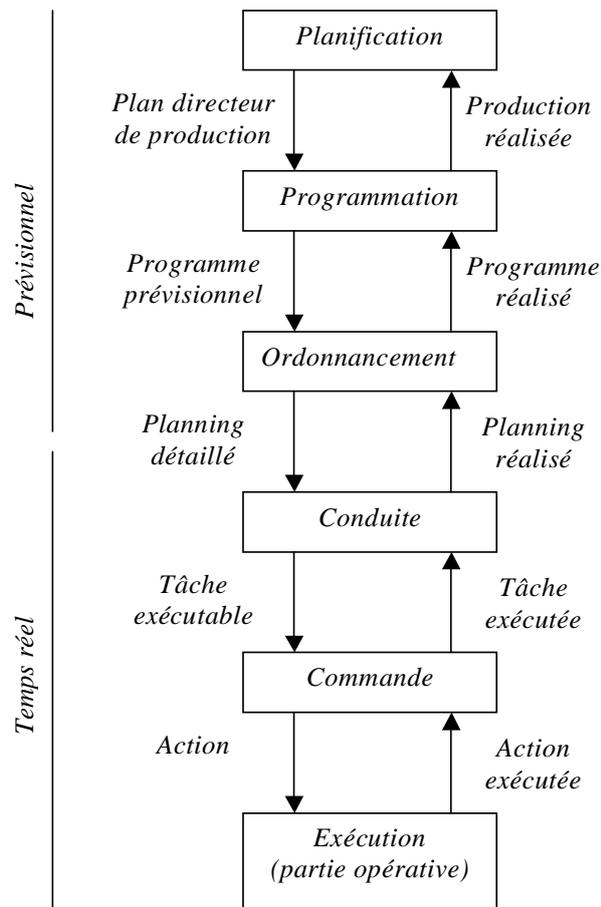


Figure .3.5. Fonctions de gestion de production [21]

Chaque fonction de gestion de production a ainsi pour objectif le respect de son contrat avec la fonction précédente. Si une perturbation importante ne permet pas à un

niveau donné de réaliser ses objectifs, il doit en avertir son 'client'. Celui-ci réagit et prend alors les décisions nécessaires, cohérentes avec l'ensemble de ses contraintes.

La fonction conduite se situe à l'intersection des problèmes de gestion prévisionnelle et de fonctionnement du système physique. Elle doit assurer un compromis entre les décisions prévisionnelles et l'état réel de l'outil de production. C'est une tâche du niveau opérationnel permettant la résolution des problèmes d'affectation des ressources en temps réel (réponses aux questions quand et avec quoi produire).

La conduite du système de production est chargée de réaliser la production prévue. Elle doit régler tous les problèmes non résolus par le niveau prévisionnel (charges ou contraintes locales). Elle doit aussi prendre en compte l'ensemble des contraintes de fabrication (contrôles de qualité, arrêts liés à la maintenance, niveau de qualification du personnel...), toutes présentes à ce niveau, et réagir aux aléas pour que la production prévue soit possible.

## **4.2. Intérêt d'un niveau décisionnel de conduite**

Les systèmes de gestion de production sont actuellement organisés autour d'une fonction ordonnancement et/ou planification. Le planning prévisionnel fourni est quasi systématiquement révisé à l'atelier lors du lancement effectif, en raison de problèmes de temps opératoires prévisionnels à ajuster, de contraintes ignorées (qualité, performances des opérateurs, outillage...).

Essentiellement basé sur des calculs de charge et de respect du délai, un planning prévisionnel, aussi bon soit-il, ne peut atteindre tous les objectifs, généralement contradictoires. Il optimise en fonction d'un critère essentiel, le délai, et fournit une solution 'admissible' à son niveau, qui n'est pas toujours une solution 'réalisable' au niveau conduite. Celle-ci ne peut, bien souvent, être définie qu'à l'instant du lancement réel sur la ressource.

Dans le cas d'un atelier peu ou moyennement chargé, une certaine souplesse dans le séquençement des tâches est possible, malgré des contraintes de succession fortes. La conduite locale est alors plus apte à décider du séquençement des tâches, en fonctions des contraintes réelles. Dans le cas inverse, un atelier fortement chargé, à charge fortement variable ou à profil d'opérations fortement dépendant des produits, l'ordonnancement n'a que peu (ou pas) de marge de manœuvre. Les tâches deviennent rapidement toutes 'critiques'. Seul un pilotage fin, ressource par ressource, permet de réagir, et

éventuellement de fournir la ‘moins mauvaise’ des solutions remettant en cause les prévisions. Un planning trop fréquemment modifié (réordonnancement) ne fait en outre qu’alourdir le travail, il est alors plus judicieux de gérer localement les imprévus.

Pour la prise en compte des perturbations, la conduite à un rôle de filtre certain et doit avoir un temps de réponse adapté (temps réel ‘atelier’, c’est à dire capable de prendre en compte et de traiter les informations en provenance du système sans occasionner de perturbations supplémentaires pour celui-ci). Elle doit intégrer des contraintes, des données très diverses et en grand nombre, de manière à permettre une décision cohérente et rapide, elle doit pour cela être dotée d’une capacité de réaction et d’adaptation propre.

Etant donné que la conduite constitue la fonction charnière entre la gestion prévisionnelle et la gestion temps réel du système de production, elle est chargée d’élaborer un compromis entre ce qui est planifié, ce qui ne l’est pas et ce qui se produit effectivement. La proximité du système physique de production impose des décisions rapides et sûres, ainsi qu’une capacité de réactivité et d’adaptativité propre. Les décisions prises au niveau de la conduite doivent :

- # Etre cohérentes avec les décisions prévisionnelles ;
- # Prendre en compte l’organisation de la commande du système de production.

La nécessité d’une réaction rapide et motivée implique une conduite ou pilotage temps réel non basée sur un réordonnancement, avec une intégration et une coordination des actions de l’ensemble des fonctions de l’entreprise (Maintenance, Qualité, Commerciale, Approvisionnement,...). En effet, pour une prise de décision justifiée et une action correcte, chaque point de pilotage<sup>8</sup> doit coopérer avec les autres fonctions pour le déclenchement d’une action ou la prise en compte d’informations susceptibles d’influer sur le plan de travail en cours.

### **4.3. Les approches existantes**

Plusieurs études ont été réalisées au niveau gestion d’atelier. La majorité pourtant n’abordent pas réellement la conduite du système de production. Elles permettent néanmoins de positionner, de limiter et d’évaluer les contraintes d’un système de conduite réellement opérationnel.

---

<sup>8</sup> Point de pilotage : point d’action du flux de décision sur le flux physique[23].

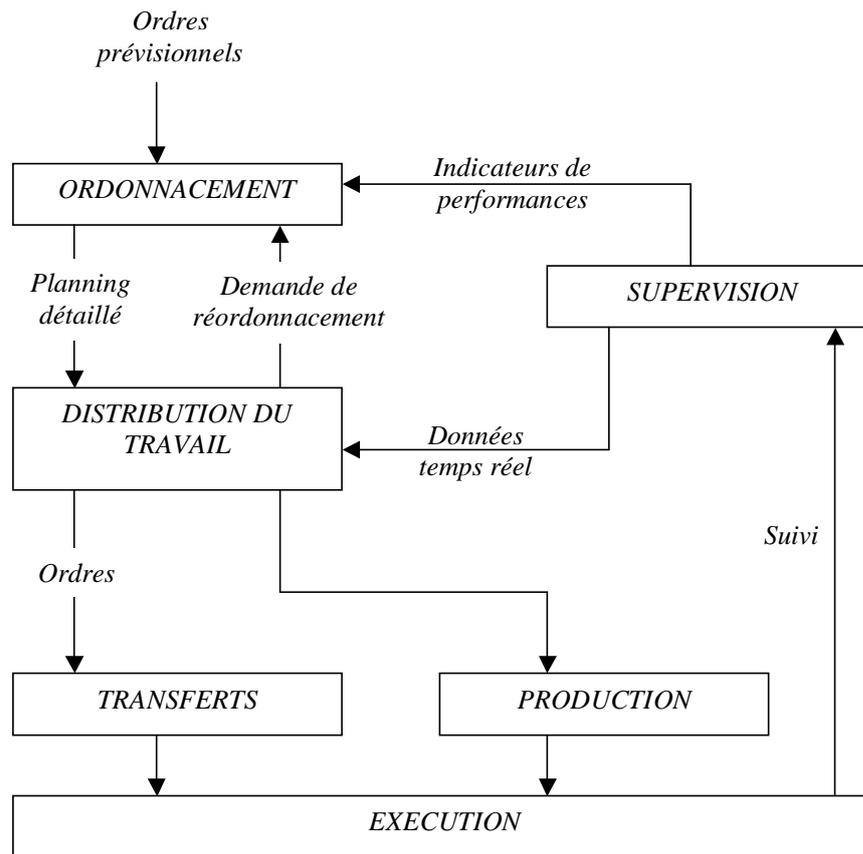
Les quelques approches positionnées sur le niveau conduite restent partielles, en particulier au niveau de l'intégration des autres fonctions industrielles et de la prise en compte des caractéristiques du système physique de production. L'analyse de ces approches permet de définir plus précisément les caractéristiques générales de ce que doit être un système de conduite.

### **4.3.1. PAC**

L'architecture PAC (Production Activity Control) a été développée par le consortium COSIMA (COntrol System for Integrated MAanufacturing : système de contrôle pour la production intégrée). Elle a pour objectif la définition d'un générateur d'application pour le pilotage d'atelier.

COSIMA dégage cinq niveaux fonctionnels pour le système de gestion d'atelier.

- # *L'ordonnancement (scheduler)*: effectue l'ordonnancement d'un ensemble de tâches données sur l'ensemble des ressources de l'atelier ;
- # *La distribution du travail (dispatcher)*: responsable du séquençage final des opérations sur une ressource, optimise en temps réel l'allocation des tâches ; le dispatcher peut se contenter de respecter au mieux le plan d'ordonnancement ou introduire d'autres considérations dans son choix ;
- # *La commande des transferts (mover, transport, control)* réserve les moyens de transfert et les stocks nécessaires à une tâche sur demande du dispatcher et met à jour le suivi des pièces ;
- # *La production (producer)* : reçoit l'ordre d'opération sur un lot donné et charge alors toutes les données techniques nécessaires à l'exécution ; assure le suivi de réalisation et le communique à la fonction superviseur ; informe le dispatcher de la fin du lot et de son déplacement possible vers le poste suivant ;
- # *Le superviseur (monitor)* : collecte des données sur
  - F Les flux matière, l'état des stocks ;
  - F L'utilisation des équipements ;
  - F L'état de la qualité de la commande ;
  - F Le contrôle qualité ;
  - F La durée de vie des équipements, la maintenance, les performances, la fiabilité.Il fournit des rapports pour l'interface utilisateur et la prise de décision.



*Figure .3.6. Architecture PAC [23]*

Trois notions importantes sont mises en évidence :

- # L'existence d'un niveau décisionnel local de remise en cause en temps réel de la pile de tâches sur chaque ressource (dispatcher) ;
- # La cohérence ordonnancement /distribution du travail (envoi d'un planning détaillé par l'ordonnancement et demande de réordonnement par le niveau distribution s'il ne peut réagir seul sans remettre en cause le plan) ;
- # Les indicateurs de performances, permettant une adaptation des règles de gestion en fonction de l'évolution du système de production.

Nettement positionnée à un niveau opérationnel, cette approche intègre les fonctions essentielles du pilotage d'atelier. Elle tente par contre de traiter l'ensemble des problèmes, réordonnement, conduite-supervision, commande des équipements (transferts), ce qui provoque une situation où des actions prévisionnelles se mélangent à des actions temps réel sur les équipements (problèmes d'exploitation des équipements et de gestion des moyens de transfert).

Cette approche reste en outre partielle. Il y a bien prise en compte des problèmes de transfert et de gestion des moyens de production, mais aucune place n'est laissée au contrôle qualité, à l'affectation du personnel, à l'ensemble des autres fonctions industrielles intervenant à ce niveau et entrant parfois pour une part importante dans la décision finale.

### **4.3.2. ORABAID**

ORABAID (ORdonnancement d'Atelier Basé sur l'Aide à la Décision) a été développé par le LAAS (Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes) de Toulouse. Cette approche est basée sur un ordonnancement temps réel de l'atelier, fournissant un ensemble de groupes d'opération permutables pour chaque ressource. Un réordonnancement est effectué si les possibilités de permutation locales sont insuffisantes, les critères pris en compte étant la marge libre pour chaque opération.

Un ensemble d'ordonnements admissibles d'un point de vue respect des délais laisse le niveau local choisir une action, en fonction de ses préférences ou de contraintes non modélisées.

Cette approche se situe en fait, fonctionnellement, plus au niveau ordonnancement que conduite. Elle fournit par contre un cadre de travail intéressant à la fonction conduite temps réel. Dans le cadre de l'ensemble de tâches communiqué, celle-ci va pouvoir piloter la production en tenant compte de contraintes locales, telles qu'un regroupement de certains produits ou l'intégration de tâches non planifiées.

L'automatisation des ateliers fait qu'il est de moins en moins possible de se contenter de fournir un cadre de ce type au responsable d'atelier. La fonction de décision locale a besoin d'une aide autre que l'indication d'évolution de marge libre. A ce niveau, c'est avant tout la réalisabilité des ordres qui est en jeu, d'où des problèmes de coordination des contrôles, d'affectation de personnel et de mise en conformité des machines. Il s'agit en fait d'un problème de faisabilité de l'ordre, où l'indication de marge libre n'est qu'un des éléments de la décision finale.

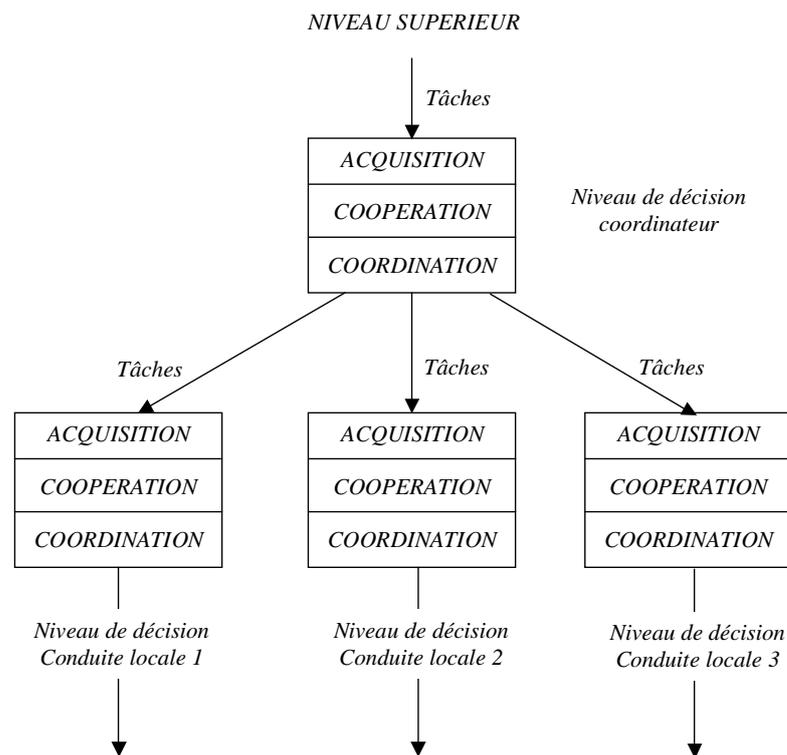
### **4.3.3. CODECO**

L'approche CODECO est issue du Laboratoire d'Automatique de Grenoble. Elle est basée sur une coopération des centres de décision au plus bas niveau et une coordination d'ensemble au niveau atelier fixant les cadres de décision des différents centres. Chaque

centre recherche une solution optimisant ses propres critères, cette solution étant ensuite modifiée de manière à tenir compte des autres centre de même niveau.

L'approche CODECO a introduit la notion de réaction locale, complétée d'une coopération des différentes conduites si celle-ci n'est plus possible. La conduite locale ne peut remettre en cause le cadre de décision reçu. Le coordinateur intervient s'il n'est pas possible d'absorber l'aléa au niveau des conduites locales voisines. Ce principe de coopération directe à un même niveau va réduire la quantité d'aléas remontés au niveau supérieur, mais soulève le problème de maintien du respect de l'objectif global de l'atelier.

Cette approche est intéressante dans le sens où elle respecte une autonomie locale pour chaque centre de décision. Le problème principal reste cependant la marge de liberté à laisser aux décisions locales ; un champ trop restreint rend le système inutile, un champ trop large pose des problèmes de cohérence des décisions prises par rapport au reste de l'atelier.



*Figure .3.7. Architecture CODECO [23]*

#### **4.3.4. L'APPROCHE JUSTE A TEMPS**

Les méthodes japonaises de gestion sont bien souvent mises à l'écart des réflexions sur le sujet gestion de production, considérées comme 'spéciales', en dehors des pratiques conventionnelles. Ce sont pourtant des méthodes typiques de pilotage temps réel d'atelier.

Elles concernent la distribution du travail, le suivi avec une prise en compte poussée de plusieurs autres contraintes : le contrôle qualité, la mise en conformité et la maintenance des équipements, la gestion du personnel.

Les ‘n’ zéros formant les règles de base du juste à temps mettent bien cet aspect en évidence. Il faut intégrer la qualité à la fabrication (l’opérateur inspecte lui-même le travail), l’équipement doit être en parfait état de marche (entretien permanent), la manutention des matériaux doit être soignée, le personnel enfin doit être en formation continue de manière à être plus flexible, à pouvoir détecter les pannes et entretenir sa machine et contrôler la qualité de son travail. Ce climat d’amélioration continue va permettre une détection et un traitement rapides des problèmes, un accroissement de la flexibilité et de la réactivité de l’ensemble de l’atelier.

L’objectif du KANBAN, méthode japonaise de gestion par ‘cartes’ utilisant la philosophie Juste à temps, est de fabriquer les quantités nécessaires, au moment voulu, afin de supprimer les stocks superflus et les coûts associés. C’est ainsi une technique de pilotage temps réel des flux atelier. Dans la pratique, des stocks inter-ressources sont maintenus mais minimisés.

Il est certain que piloter ‘juste à temps’ n’est pas une méthode applicable à tout type d’atelier, les échecs dus à une trop grande précipitation en ce domaine en témoignent, mais cette approche permet de retenir un certain nombre de règles et de les généraliser. La tendance actuelle, constatée notamment au Japon, est à l’intégration de ces méthodes avec une gestion plus classique (type MRP : Material Requirement Planning ), ce qui devrait aller dans le sens d’une réelle fonction ‘conduite’ complétant la gestion prévisionnelle.

## **5. Conclusion**

L’objectif principal du système de conduite est l’extraction d’une tâche à réaliser parmi un ensemble prévisionnel de tâches, en fonction de contraintes atelier et de règles de gestion. La fonction conduite répond à un ensemble de questions :

- # Quelle tâche parmi celles prévues est exécutable, est-il préférable de lancer dès que la ressource sera disponible ?
- # Quelle est l’action à commander en réaction à un aléa donné ?
- # Doit-on remonter la perturbation vers la gestion prévisionnelle ?
- # Tous les éléments nécessaires à la réalisation d’une tâche donnée sont-ils réunis ?

La fonction de conduite partage fréquemment ses décisions avec la fonction de réordonnement temps réel, de manière à maintenir une cohérence globale des délais et des charges de l'atelier. Le réordonnement ne peut, par contre, résoudre seul les problèmes posés par la conduite. Ordonner et conduire se révèlent être deux aspects complémentaires, *Il y a d'une part le problème de construction d'un planning* (et éventuellement sa correction suivant une période adaptée), qui donnera le cadre de travail à l'atelier et permettra le respect global des délais, et *d'autre part le problème de sa réalisation effective*. Il n'est plus alors question de prévision et d'organisation, mais de faisabilité, et donc de prise en compte de contraintes et d'aléas divers, où les décisions sont suivies d'actions effectives immédiates.

La majorité des solutions proposées au problème de la conduite de l'atelier a visé *l'amélioration des résultats de la fonction d'ordonnement* : solutions satisfaisant à un plus grand nombre de contraintes, réordonnement 'temps réel'. Quelques études se sont pourtant attachées au problème en considérant un *réel niveau de décision dans l'atelier, ou pilotage temps réel*.

Du fait de la complexité des systèmes flexibles de production, constituée de machines complètement automatisées, le pilotage du système, aura un rôle fondamental dans la réalisation de la production prévue dans un environnement dynamique et fortement perturbé. Le système de pilotage doit être capable de gérer *dynamiquement* les ressources du système, et les différentes tâches qui doivent être réalisées. Aussi, il doit veiller à la parfaite coordination des systèmes de fabrication et de manutention tout en gérant les aléas apparaissant de manière quasi-permanente au cours de la production. Il doit assurer la synchronisation entre les flux de matière (matière première, produits finis ou semi-finis) et les flux d'information (gammes de fabrication, gammes d'assemblage, ...).

# *Chapitre IV*

---

*Approche Multi-Agent pour  
le pilotage en temps réel*

# 1. Introduction

Les mutations technologiques et organisationnelles des entreprises se répercutent inévitablement au niveau de leurs systèmes d'informations, et donc des applications informatiques qui les sous-tendent. La distribution inhérente des informations et la décentralisation des décisions ne font qu'accroître la complexité des nouvelles applications informatiques pour l'entreprise.

L'évolution du monde industriel apporte aux informaticiens de nouveaux défis technologiques, liés notamment aux besoins de prendre en compte : l'hétérogénéité des moyens de production, l'évolutivité de l'environnement dans lequel évoluent les systèmes industriels et la réactivité permettant au système de production de s'adapter en fonction de l'évolution des produits à fournir et des compétences disponibles.

Dans ce contexte, les approches objet ont montré leur puissance dans le domaine du développement et de la programmation informatique. Grâce à leurs propriétés de réutilisabilité, de localité des données, elles sont adaptées à la problématique de l'étude et la conduite des systèmes de production. En effet, les mécanismes objets tels que l'abstraction, la modularité, l'agrégation et l'héritage permettent de définir des modèles génériques qui, par des spécifications ultérieures, peuvent être adaptés au besoin du système.

Le succès des techniques orientées objet ont amené le développement des systèmes Multi-Agents. L'autonomie a été introduite dans les objets pour donner naissance au concept d'agent, il n'est pas seulement un objet dans lequel un ensemble de variables (qui décrivent son état) et le programme (qui permet de les modifier) sont liés : il est également maître de l'activation de son programme.

Grâce aux technologies agents, il est possible de donner naissance aux concepts d'équipements autonomes et d'îlots de production à responsabilités élargies conduisant vers la réalisation d'ateliers de production de plus en plus flexibles. Les caractéristiques de modularité et de décentralisation des SMAs s'adaptent bien avec la nature des systèmes de production généralement composés de plusieurs équipements, où il faut intégrer plusieurs fonctions (conduite, gestion de production) et où les décisions doivent se prendre à plusieurs niveaux.

L'objectif du chapitre est de présenter l'approche Multi-Agent proposée pour aborder le problème de pilotage en temps réel des systèmes flexibles de production. Il présente

dans un premier temps les fondements de l'approche. Ensuite il présente le principe de l'approche, le modèle retenu pour la description du système physique de production et décrit enfin l'architecture Multi-Agent proposée pour la conception du système de pilotage.

## **2. Les fondements de l'approche**

### **2.1. Principes de base de la production**

L'activité productrice, d'une manière générale, met en jeu de façon interactive des individus appartenant à trois populations distinctes [22] :

- # La population des produits;
- # La population des moyens;
- # La population des opérateurs de production.

Ces trois populations sont les éléments de base de tout système de production. Elles forment en quelque sorte, un espace dans lequel se déroulent les opérations de production. Ainsi, tout système de production est vu comme un espace (P,M,O) constitué de *produits* (P), de *moyens* (M) et d'*opérateurs* (O). Chaque individu impliqué dans le système de production possède des capacités d'évolution indépendantes du reste du système. Cependant, et en dépit de leur tendance à évoluer indépendamment, les différents acteurs du système sont liés par l'objectif à atteindre : *produire*.

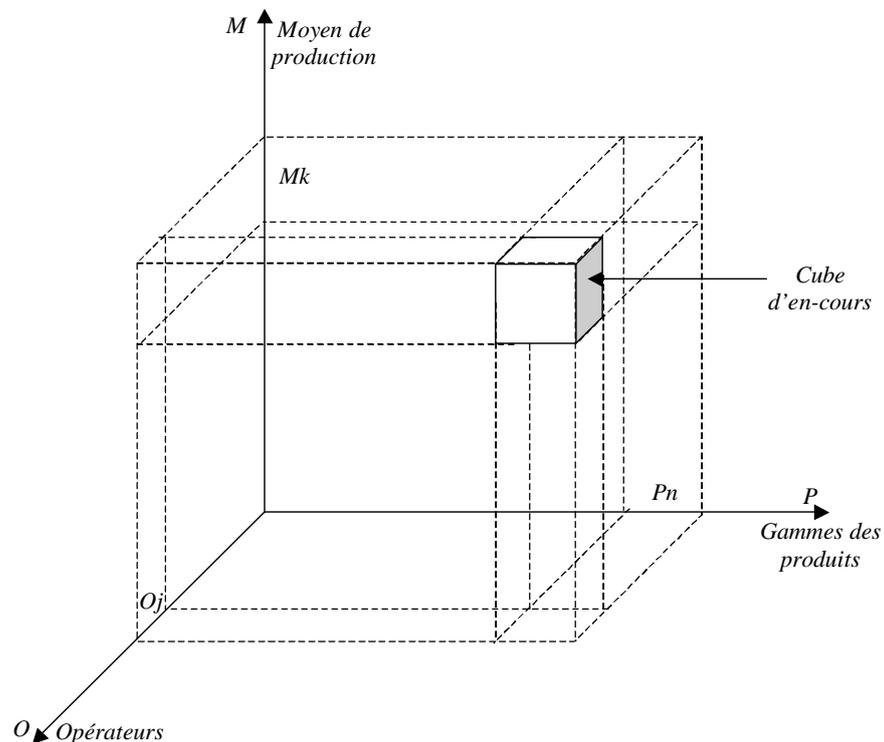
L'espace (P,M,O) d'un atelier peut être schématisé à travers une représentation graphique qui ne se limite pas à un plan d'implantation d'atelier. Dans cette représentation on distingue trois axes :

- # L'axe P des produits gradué selon les différentes tâches figurant dans les gammes. Chaque tâche occupe un segment de l'axe P.
- # L'axe M des moyens gradué selon les différents équipements ou types d'équipements de production présents dans l'atelier. Chaque moyen (productif ou transitique (manutention ou stockage)) ou type de moyen occupe un segment de l'axe M, dont le choix de représentation dépend du niveau de détail envisagé.
- # L'axe O des opérateurs gradué selon les identifiants des collaborateurs figurant à l'effectif. Chaque opérateur occupe un segment de l'axe O. Il est aussi possible de se contenter de ne représenter que les qualifications, et non les individus.

Dans ces conditions, un produit ou élément de produit physique en cours de fabrication est représenté à tout instant par *un cube de l'espace (P,M,O)*, auquel sont rattachées des informations complémentaires telles que :

- # Les informations d'identification de l'élément ;
- # Les informations de mesure des temps ;
- # Toutes les données issues du suivi de ce produit, enrichies au cours de sa progression (cumuls de temps, cotation en qualité, valeur comptable, etc.)
- # La position géographique, dont on remarque qu'elle ne vient qu'en complément de la position dans (P,M,O) ;

L'avancement du produit dans la gamme de fabrication, le passage d'un moyen à un autre, le changement d'opérateur, s'expriment par des déplacements du cube d'en-cours parallèlement aux axes P, M et O respectivement. Chacun de ces mouvements s'opère avec un coût évidemment non nul. L'espace (P,M,O) de l'atelier est donc parcouru par une nuée de cubes d'en-cours qui évoluent sous la conduite d'un système de pilotage, en suivant toutefois les contraintes que leur imposent les interactions entre individus.



*Figure .4.1. Représentation graphique de l'espace (P,M,O) d'un atelier théorique [22]*

L'avantage de cette représentation, c'est qu'elle est détachée des nombreux cas d'application des problèmes de la production : *elle possède donc un certain caractère de*

*généralité*. Aussi, la compréhension des mécanismes du système de production s'en trouvera facilitée.

La figure .4.1 décrit une représentation graphique d'un atelier théorique formé strictement par les produits, les moyens de production et les opérateurs. L'atelier réel est la conséquence de l'imperfection des systèmes de production par rapport à l'atelier théorique du fait que le produit figure dans les en-cours de production, sans pour autant voir son valeur accrue.

### **2.1.1. Les populations impliquées dans la production**

Les systèmes flexibles de production sont des systèmes dont lesquels la production se déroule sans opérateur. Suivant les principes décrits précédemment, l'activité productrice dans ce type de système met en jeu seulement les individus appartenant à la population des produits et celle des moyens. Ainsi, un système flexible sera représenté graphiquement sur le plan (P,M) de l'espace (P,M,O). Ceci ne change pas la nature fondamentale du problème, qui se trouve seulement simplifié au plan pratique.

De ce qui précède, il résulte qu'un produit en cours d'élaboration ne se trouve, à un instant donné, que dans l'une des situations suivantes :

- # Sur un moyen de production;
- # Sur un moyen de manutention (stock mobile);
- # Sur un moyen de stockage (stock immobile);

### **2.1.2. Le principe d'indépendance individuelle**

Le déroulement de la production dans l'atelier flexible résulte des interactions que les deux populations (P, M) vont se faire subir les unes aux autres, par le biais des événements que génèrent les individus qui leur appartiennent. Chaque individu (produit ou moyen) possède des possibilités d'évolution qui lui sont propres, et qui constituent autant de contraintes pour les individus auxquels il est successivement confronté.

Les interactions ont lieu entre des individus, mais leur résultante concerne les populations car, en générale :

- # Un produit, au cours de son élaboration, passe par plusieurs moyens ;
- # Un moyen, pendant son activité, voit passer plusieurs produits.

La prolifération des événements au cours du temps, et dans l'espace géographique de l'atelier, *engendre le comportement global du système de production.*

### **2.1.3. L'interdépendance globale par rapport au but**

Généralement, si les produits, les moyens de production et les opérateurs se trouvent au cœur du système de production, c'est tout de même pour concourir à un but clairement défini : la pérennité du système de production, assurée par l'avancement des produits. En ce sens, ils sont contraints à une interdépendance constructive les uns envers les autres. Toutefois, il convient de ne pas se tromper quant au niveau auquel s'applique cette interdépendance. Il faut garder à l'esprit que les liens entre les populations de (P,M,O) s'établissent au niveau des individus et de façon très fugitive dans le temps.

## **2.2. Pilotage du système de production**

La tendance naturelle des composantes élémentaires d'un système de production à évoluer indépendamment les unes des autres impose au système de production une évolution à entropie croissante (c'est-à-dire vers une situation de désordre grandissant). Conduire l'ensemble de manière cohérente et efficace vers un but précis suppose donc tout à la fois une grande rigueur dans les prises de décisions, et une grande souplesse dans la perception des événements au niveau élémentaire.

Le système de pilotage de l'ensemble productif ne doit pas *introduire de contraintes trop fortes pour l'avancement des produits*, et doit laisser la possibilité aux individus participant dans le processus de production de prendre toutes décisions ponctuelles. Un système de pilotage complet possède donc une vision complète de l'état courant du système de production qu'il mémorise et synthétise à mesure que l'instant courant glisse vers le passé, et utilise cette connaissance du passé pour anticiper l'avenir.

Pour maîtriser les systèmes de production et en obtenir un comportement optimal dans le cadre de sa fonction première : produire, l'action intelligente est donc indispensable. Ceci implique la mise en œuvre des fonctions de base de l'intelligence :

- # La perception des états du système ;
- # La modélisation des informations ;
- # La formalisation du but à atteindre ;
- # La prise des décisions et leur mise en œuvre ;
- # L'apprentissage, c'est à dire l'amélioration continue en fonction des résultats obtenus.

## **3. Approche Multi-Agent pour le pilotage en temps réel**

### **3.1. Principe**

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la problématique de conduite en temps réel, où on a constaté deux problèmes : *le premier concerne la construction d'un planning et le deuxième s'intéresse à sa réalisation effective.*

En effet, la multiplicité des routes possibles entre les centres de production que peuvent emprunter les différentes productions pose de redoutables problèmes d'ordonnancement dans l'atelier flexibles. Ils conduisent à des files d'attentes plus ou moins grandes et à une mauvaise utilisation des ressources disponibles. L'ordinateur est bien capable de tester des cheminements possibles, mais les aléas sont nombreux et l'ordinateur n'est pas en mesure de sélectionner de façon 'flexible' l'importance des paramètres. A chaque aléa, il reprend automatiquement les algorithmes pour vérifier que l'ordonnancement convient, ce qui prend beaucoup de temps.

Afin d'éviter la modification fréquente d'un planning et donc l'amélioration de la gestion d'événements perturbateurs imprévus dans l'atelier, nous cherchons à assurer un *ordonnancement dynamique de la fabrication*. Etablir un ordonnancement dynamique c'est assurer un ordonnancement progressif en donnant une plus grande autonomie de décision aux différents acteurs de l'atelier.

L'avènement des systèmes multi-agents qui permettent de distribuer les problèmes sur des ensembles auto-organisés, favorisant *réactivité et comportement émergents* peut faciliter la mise en œuvre du pilotage en temps réel. En effet, le but principal d'un système multi-agent est de faire collaborer un certain nombre d'agents afin de résoudre un problème. Un problème est défini par la donnée d'un état initial connu et d'un état final souhaité ; la résolution de problème consiste à définir les étapes intermédiaires pour passer de l'état initial à l'état final.

Le système de pilotage du système flexible construit à base d'agent est constitué d'un ensemble d'agents qui coopèrent pour assurer l'exécution de la production. Ainsi, *le déroulement de la production dans le système résulte des interactions que les agents vont se faire subir les uns aux autres*. Le système ainsi conçu permet d'assurer une gestion adaptée du système flexible de production tenant en compte l'état réel de celui-ci, en lui

permettant de réagir et s'adapter en fonction des objectifs de production, aux fluctuations des besoins et aux aléas du système.

*L'ordonnancement et le suivi de la fabrication, suivant cette approche, ne sont pas dédiés à un superviseur central. En effet, le système de pilotage ne cherche pas à exécuter un ordonnancement prévisionnel, le planning de production au sein de l'atelier est établi au fur et au mesure que les pièces à fabriquer évoluent dans le système de production. Ainsi, l'ordonnancement émerge de l'ensemble des interactions entre les agents.*

### **3.2. Modélisation du système physique de production**

La modélisation des systèmes de production, et plus particulièrement celle des systèmes flexibles, est un problème complexe. Elle est indispensable pour la compréhension et l'analyse des phénomènes mis en jeu dans les systèmes. La modélisation signifie la représentation du comportement d'un système (existant ou non), elle constitue une étape très importante dans la vie d'un système donné. En effet, disposer d'un bon modèle apporte une aide indispensable aussi bien aux concepteurs qu'aux utilisateurs.

Le pilotage en temps réel nécessite *un modèle précis du fonctionnement du système*. Le niveau conduite implique, en plus d'un niveau décisionnel, *une représentation faisant apparaître les flux de produits (les flux physiques), d'informations, de décision et une maille de description suffisamment précise de ressource*. Le modèle recherché doit assurer *une modélisation plus fidèle et plus réactive du comportement du système réel de production*. La modélisation comportementale consiste à modéliser le système de production en représentant le processus de fabrication de chaque produit, le comportement dynamique de chaque ressource et les différentes contraintes techniques à un niveau analytique [30].

Pour la modélisation du système physique de production, l'approche s'appuie sur le *modèle d'état individuel* établi par Gilles Rodde [22]. Le modèle présente une approche par la base des phénomènes de production, qui se veut aussi simple et générale que possible. Son principe consiste à établir un modèle individuel pour chaque élément d'un système de production. Le modèle assure que, l'observation, la compréhension, et le pilotage du système de production sont réalisés à l'aide d'un modèle représentatif enfermant une image toujours plus fidèle du système réel. Ceci signifie que les populations

composant le système de production sont *décrites sans ambiguïté et suivies dans leur évolution* au sein de l'atelier de production.

### ***Le modèle d'état individuel***

Chaque acteur de l'activité productrice passe successivement, de façon normale ou aléatoire, par un certain nombre de phases différentes, ou états élémentaires. Ainsi, le déroulement de la production dépend des interactions et de la coordination entre les individus. L'évolution de l'activité de chaque acteur dépend directement des autres et le processus de production résulte de la succession interactive d'un certain nombre d'états élémentaires par lesquels passent chaque individu de l'espace (P,M,O) qui peuplent l'unité de production.

La modélisation individuelle a pour but de rendre compte des états de l'espace (P,M,O) au plan individuel comme au plan général. Elle s'appuie sur deux concepts *l'état élémentaire* et *l'événement*.

### **Les états élémentaires**

Les individus de l'espace (P,M,O) évoluent dans le système de production en passant successivement par des états élémentaires. Chaque individu des populations qui composent le système de production se trouve à un instant  $t$  dans l'un ou l'autre des états suivants :

*Non actif* : Un individu de l'espace (P,M,O) est dit non actif lorsqu'il n'est pas en mesure de participer à l'activité du système de production;

*Actif -productif* : Un élément de l'espace (P,M,O) est dit productif lorsqu'il participe effectivement à l'avancement du produit dans le processus de production;

*Actif -arrêt propre* : Un élément de l'espace (P,M,O) est en état d'arrêt propre lorsque sa défaillance aléatoire arrête la progression du produit ;

*Actif -arrêt induit* : Un élément de l'espace (P,M,O) est en état d'arrêt induit lorsque son activité est interrompue par l'arrêt propre d'un autre élément de l'espace (P,M,O);

*Actif -arrêt structurel* : Un élément de l'espace (P,M,O) est en état d'arrêt structurel lorsqu'il se trouve en attente de conditions lui permettant de poursuivre son évolution.

A partir de ces états élémentaires, il est possible de construire un modèle d'état (figure .4.2.) commun aux différents éléments de l'espace (P,M,O).

### **L'événement**

Un événement survient dans le courant de l'activité de production par suite d'une évolution, prévue ou accidentelle, d'un individu d'une des populations. L'apparition de cet

événement est a priori indépendante de l'état dans lequel se trouvent les autres individus du système qui se trouvent impliqués à cet instant avec l'individu générateur de l'événement.

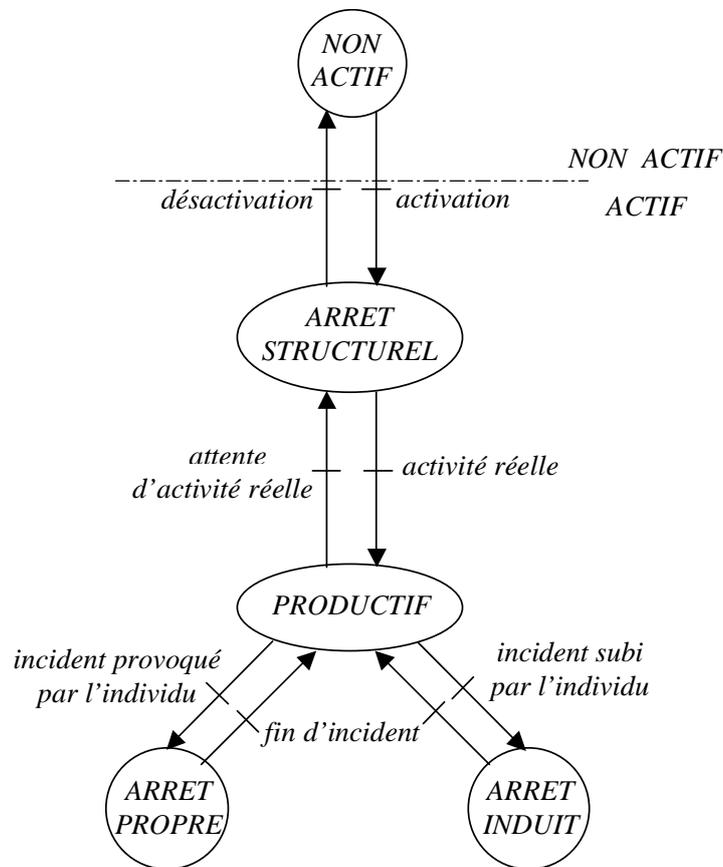


Figure .4.2. Modèle d'état individuel [22]

La notion d'événement constitue le moteur du modèle d'état individuel. En effet, lorsqu'un élément de (P,M,O) change d'état, il entraîne généralement d'autres changements d'état pour les autres éléments avec lesquels il est confronté. Aussi, chaque individu de chaque population peut générer des perturbations à partir de son évolution propre, et en toute indépendance vis-à-vis des autres.

### 3.3. Modélisation Multi-Agent du système de pilotage

Les systèmes Multi-Agents forment un type intéressant de modélisation permettant une représentation efficace des systèmes physiquement dynamiques. Cette modélisation appliquée pour la conception d'un système de pilotage en temps réel, fournit un moyen très puissant pour représenter et gérer l'instabilité des systèmes de fabrication flexible (configuration fréquente à cause des événements internes ou externes, capacité des ressources, besoins du marché, ...etc.).

La modélisation Multi-Agent du système nécessite de définir les propriétés du SMA, son organisation : l'ensemble des agents qui le composent et leurs interactions.

### **3.3.1. Organisation du SMA**

Pour fournir à un SMA une fonctionnalité particulière, on peut avoir recours à une autre méthode que celle utilisée traditionnellement et qui consiste à procéder à une décomposition fonctionnelle du problème en un ensemble de primitives qui seront implantées dans les agents. L'autre approche a pour objectif de faire émerger cette fonctionnalité à partir des interactions entre les agents.

L'avantage de l'approche fonctionnalité émergente est de renforcer la robustesse du système : il est moins sensible aux changements de l'environnement. La raison est que contrairement au cas d'une fonctionnalité programmée, il n'est pas nécessaire que le concepteur envisage toutes les possibilités afin qu'à chaque situation, le système ait une réaction que lui-même a jugé appropriée. D'autre part, le fait que justement, dans une approche fonctionnalité émergente, on n'ait pas à envisager tous les cas de figure, peut simplifier l'analyse.

L'organisation Multi-Agent proposée étend la modélisation du système physique de production décrit précédemment. L'approche consiste à associer, au niveau du système de pilotage, à chaque individu du système physique un agent réactif. L'organisation SMA ainsi construite, est une organisation émergente construite à base d'agent réactif permettant la modélisation de l'évolution dynamique de l'atelier de production à travers les différents comportements exécutés par les agents.

La modélisation agent retenue se base sur une modélisation organisationnelle permettant de respecter l'organisation du système physique et d'établir un lien direct entre le modèle et la réalité. En effet, ceci permet la prise en compte des critères matériels et des contraintes physiques des moyens de production.

Dans l'organisation retenue on distingue deux grandes catégories d'agents : les agents *Produits* et les agents *Moyens (ressources)*. Dans cette modélisation, les termes agent moyen (respectivement agent produit) et moyen de production (respectivement produit) peuvent être utilisés indifféremment. En effet, les deux termes décrivant tous deux le système <Agent Moyen – Moyen de production> (respectivement <Agent Produit – Modèle d'un produit>). L'agent produit cherche à exécuter l'ensemble des tâches constituant sa gamme de fabrication. C'est un demandeur de services fournis par les moyens de production (les agents moyens (ressources)). L'agent moyen est un exécutant

de tâche, possédant des capacités définies et limitées. C'est un prestataire de services pour les agents produits.

### **3.3.2. Mécanisme d'interaction**

Le déroulement et l'évolution des activités de la production résultent de la succession interactive d'un certain nombre d'agents produits et moyens qui peuplent l'unité de production. L'ensemble de ces agents *coopèrent afin d'assurer l'exécution de la production demandée en quantité voulue et en durée estimée.*

Au cours de leur évolution, les agents produits ont besoin de mettre en œuvre les moyens de production (productifs ou transitiques) existants au sein de l'unité de production. Ceci génère une situation d'interaction de type encombrement entre ces agents. Dans telle situation, les agents se gênent mutuellement dans l'accomplissement de leurs tâches alors qu'ils n'ont pas besoin les uns des autres.

En réalité, les moyens existent mais en quantité limitée, tous les produits veulent terminer l'exécution de leur gamme de fabrication dans le plus tôt possible et ils utilisent souvent les mêmes moyens de production. Cette quantité de ressources nécessairement limitée, est à l'origine des conflits et des problèmes d'allocation de ressources résumés à travers la question *qui doit utiliser quoi et quand ?*.

Pour la résolution de ces situations conflictuelles nous utilisons des mécanismes de coordination d'action et de résolution de conflit : *l'appel d'offre et les règles de priorité.* Le protocole d'appel d'offre fournie, dans un mode d'allocation distribué, une solution pour le problème d'affectation de ressource: trouver l'agent le plus convenable pour l'exécution d'une tâche donnée. Les règles de priorité permettent de gérer la gestion des conflits (choix d'une tâche parmi plusieurs).

#### **3.3.2.1. L'appel d'offre**

Dans un mode d'allocation distribué, chaque agent s'occupe individuellement d'obtenir les services des fournisseurs qui peuvent lui être utiles pour la réalisation de ses projets. Ces modes ne s'appliquent qu'aux organisations variables. C'est à dire qui supposent que les liens entre les clients et les fournisseurs peuvent évoluer dans le temps, sans remettre en cause la structure générale de l'organisation.

Dans les SMAs avec des buts d'agents compatibles l'objectif d'un protocole d'interaction est d'assurer la cohérence entre les agents tout en respectant leur autonomie, c'est à dire sans faire un contrôle global explicite. Pour cela un protocole d'interaction doit

fournir les mécanismes nécessaires pour la résolution des problèmes d'interaction, tel que la détermination des buts partagés et les tâches en commun, l'évitement des conflits et le partage des connaissances.

Le protocole d'appel d'offre (CONTRACT NET) est le protocole d'interaction le plus connu et le plus utilisé en IAD. Ce mode d'allocation connu aussi sous le nom de réseau contractuel présente une structure de contrôle très simple à comprendre et à utiliser. Cette simplicité cache quelques difficultés qu'il faut résoudre pour l'employer dans un contexte réellement distribué.

Le réseau contractuel est un mécanisme d'allocation de tâche fondé sur la notion d'appel d'offre introduit par R.G.Smith. Le protocole modélise le mécanisme de contraction utilisé dans les marchés publics pour gérer l'échange des biens et des services. La relation entre le client (administrateur) et les fournisseurs (offrants) passe par l'intermédiaire d'un appel d'offre et d'une évaluation des propositions envoyées par les fournisseurs.

Sous le modèle d'appel d'offre la distribution des tâches est vue comme un processus interactif établi entre un agent qui cherche à exécuter une tâche et un groupe d'agents capable d'exécuter cette tâche. Le protocole d'appel d'offre fournit un contrat direct établi sans négociation entre le client et un des fournisseurs. La procédure se base sur une acceptation ou un refus, ceci simplifie le protocole et améliore son efficacité dans certaines situations.

L'appel d'offre s'effectue en quatre étapes [15]:

1. La première est dévolue à l'appel d'offre proprement dit. L'administrateur envoie une description de la tâche qu'il voudrait voir effectuée à tous ceux qu'il estime pouvoir répondre ou à tous les agents du système.
2. A partir de cette description, dans une deuxième étape, les offrants élaborent une proposition qu'ils envoient à l'administrateur.
3. L'administrateur reçoit et évalue les propositions, attribue le marché au meilleur offrant au cours de la troisième étape.
4. Enfin, dans la dernière étape, l'offrant qui a reçu le marché et qui devient le contractant, envoie un message à l'administrateur lui indiquant qu'il est toujours d'accord pour accomplir la tâche requise et qu'il engage de ce fait à la réaliser ou bien qu'il ne puisse s'acquitter du contrat, ce qui relance l'évaluation des offres et l'attribution du marché à un autre agent ( et en revient à l'étape 3)

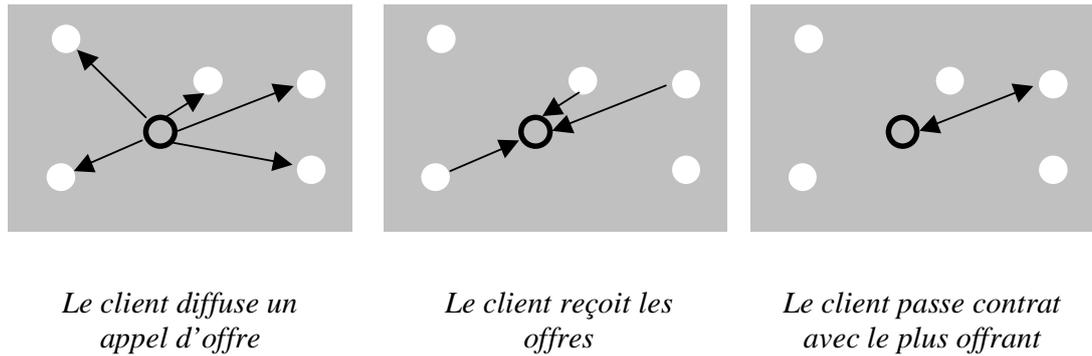


Figure .4.3. Mécanisme de coordination : L'appel d'offre [17]

La simplicité du protocole offre un certain nombre d'avantages :

- # Il s'agit d'un mécanisme d'allocation simple à mettre en œuvre ;
- # Il offre une grande dynamicité puisqu'il ne fait absolument pas appel à une quelconque gestion d'accointances<sup>9</sup> ;
- # La correspondance entre tâches et agent est élaborée à partir d'un accord bilatéral entre client et fournisseur, ce qui permet de tenir compte d'un grand nombre de paramètres tels que les charges de travail, le type de la tâche à effectuer, la durée d'attente maximale autorisée, le coût, l'urgence, ... ;
- # Il assure l'avantage de minimiser les effets de la dégradation des performances. Si un fournisseur est incapable d'assurer l'exécution de la tâche, le client peut rechercher un autre fournisseur pour accomplir sa tâche.

Malheureusement, le protocole n'est pas dépourvu d'inconvénients :

- # Si la mise en œuvre est simple, l'exécution est lourde et produit un grand nombre de message.
- # La simplicité de mise en œuvre n'est qu'apparente et que si l'on veut bénéficier d'une allocation performance il faut : soit que le nombre d'appels d'offre soit faible, soit que l'on implémente une structure complexe de gestion des problèmes liés au parallélisme du processus.

---

<sup>9</sup> La notion d'accointances correspond à l'ensemble d'agents contactés par un agent. En plus de leur nom, l'agent peut représenter la liste de leurs compétences.

### **3.3.2.2. Comportements sociaux**

Un agent est un être social, conçu pour interagir avec d'autres agents. Puisqu'il évolue dans un contexte de distribution des acteurs et des décisions, il est nécessaire de spécifier ces caractères sociaux qui font de lui un membre actif d'un SMA.

Les comportements sociaux des agents se traduisent par leurs interactions réalisées au travers d'échanges de *message* formant une conversation pour l'accomplissement d'une production demandé.

Le mécanisme d'interaction mis en œuvre nous permet de distinguer deux modes de comportement. Le premier modélise le comportement d'un agent produit (client) dans la recherche d'un fournisseur exécutant une tâche. Le deuxième modélise le comportement d'un agent Moyen (fournisseur) devant les demandes des clients.

#### *Agent produit*

Au cours de sa vie dans l'atelier de production un agent produit cherche à exécuter l'ensemble des tâches constituant sa gamme de fabrication. Son comportement est assuré à travers l'accomplissement de l'ensemble des actions suivantes :

- # Envoyer un message d'appel d'offre aux machines capables d'exécuter la tâche;
- # Recevoir et évaluer les offres provenant des fournisseurs ;
- # Accorder un contrat avec le plus offrant ;
- # Passer à l'exécution de la tâche.

A un appel d'offre quelconque, l'agent produit peut ne pas recevoir des offres. Ceci est dû au fait que tous les exécutants sont occupés par d'autres tâches ou qu'aucun exécutant n'est capable d'exécuter la tâche (moyen de production hors service). Dans ce cas, le client (produit) attend jusqu'à que le fournisseur (moyen de production) soit libéré ou mis en service.

Un offrant intéressé par une tâche envoie une proposition contenant une évaluation de sa capacité à réaliser cette tâche. Cette évaluation peut s'exprimer sous la forme d'une simple mesure numérique ou d'une description comprenant plusieurs critères évalués séparément. Le manager reçoit et évalue les offres et établit un contrat avec le plus offrant. N'importe quelle offre considérée intéressante il peut être acceptée avant le temps d'expiration de l'annonce. En effet, chaque appel d'offre comprend une date limite pour la réception des propositions. Passé cette date, le client évalue les propositions qu'il a reçues et toutes celles qui arrivent après cette date sont directement rejetées.

### *Agent moyen*

Le comportement d'un agent moyen est décrit à travers le processus suivant :

- # Recevoir les appels d'offre ;
- # Evaluer la capacité de la ressource d'exécution de la tâche ;
- # Envoyer une proposition si sa capacité lui permet l'exécution de la tâche ;
- # Exécuter la tâche après l'acceptation de la proposition.

Le parallélisme dans l'atelier de production (existence de plusieurs produits en-cours de fabrication) pose plusieurs problèmes et rend nécessaire de gérer le fait que plusieurs agents produits puissent envoyer au même agent moyen en même temps plusieurs appels d'offre susceptible d'interférer et d'avoir une influence pernicieuse sur le comportement globale du système.

Chaque exécutant évalue les offres de tâches non expirer (qui non pas dépasser les dates limites) pour déterminer s'il est capable de fournir une proposition. L'exécutant choisit la tâche la plus intéressante suivant quelques critères définis pour la ressource (date de fin plus proche, tâche prioritaire, ...) en suite il propose une offre à l'agent correspondant.

Aussi, les offrants peuvent recevoir de nouveaux appels d'offre entre le moment où ils envoient une proposition et celui où ils reçoivent l'attribution ou le rejet de l'administrateur. L'offrant se trouve alors devant un choix difficile. Il peut soit réserver de la place pour toutes les tâches pour lesquelles il émet une proposition et risquer alors de se trouver sans rein à faire, soit au contraire envoyer de nouvelles propositions sans tenir compte des précédentes, quitte à se retrouver trop chargé et dans l'incapacité de tenir ses engagements.

### *Mise en œuvre des comportements*

La mise en œuvre des comportements décrits précédemment s'effectue à travers un échange de messages entre les fournisseurs (agents moyens) et les clients (agents produits) et permettant la distribution des tâches entre les différents moyens de production [15]. Les types de messages nécessaires sont :

*AppelOffre(T,X)* est un message de l'administrateur X à un offrant pour lui demander d'envoyer une proposition pour la réalisation de la tâche T.

*Proposition(T,O)* est la réponse d'un offrant Y à un appel d'offre concernant la tâche T. Il retourne alors une offre O, qui comprend entre autres informations le nom de l'offrant.

*Attribuer(T,C,X)* est le message de l'administrateur X à un offrant pour lui signifier qu'il lui attribue le contrat C portant sur la tâche T.

*Accepter(T,Y)* est une réponse positive de l'offrant Y à l'attribution du contrat par l'administrateur.

*Refuser(T,Y)* est une réponse négative de l'offrant Y à l'attribution du contrat par l'administrateur, ce qui relance l'évaluation et le processus d'attribution.

Les primitives de communication présentées sont assez élémentaires, mais suffisantes pour implémenter l'essentiel du réseau contractuel. Cependant R.Smith propose un langage plus complet qui se situe à un niveau d'abstraction plus élevé dans lequel l'annonce de l'appel d'offre comporte, outre la description de la tâche et le numéro du contrat, une définition des qualités requises pour la tâche, la forme de la proposition ainsi qu'une date d'expiration. La définition des qualités requises permet d'éliminer rapidement les agents qui n'ont pas ces qualités sans avoir besoin d'effectuer une analyse minutieuse de la description de la tâche.

Les appels d'offre seront reconnus dans le réseau de manière unique par une clé formée de la description de la tâche, de l'administrateur responsable de diffusion de l'appel et d'un numéro d'ordre local à ce dernier.

La forme de la proposition sert à indiquer à l'offrant quels sont les critères qui seront pris en compte lors de l'évaluation et donc de facilité ensuite le travail d'évaluation de l'administrateur. Enfin la date d'expiration donne la date limite après laquelle les propositions ne seront plus retenues.

La manière dont un appel d'offre peut être diffusé, et la réponse d'un fournisseur en donnant dans sa proposition les caractéristiques demandées par l'administrateur sont illustrées à travers les messages suivants : un message d'appel d'offre diffusé par un agent produit pour l'exécution d'une opération de tournage. La proposition est un message envoyé par un des agents moyens capables d'effectuer ce type d'opération.

Message : AppelOffre

A : \* // Indique un message diffusé

De : Produit-P1-Lot1428

Contrat : Tournage/Produit-P1-Lot1428/1

Description De Tâche :

Type De Tâche : Tournage

Forme De Proposition :

Position : < , > // Indiquer la position géographique du moyen de production

Qualités : { Type, Performance }

Date Expiration :

01 Juillet 2007 13 :00 :00

Fin AppelOffre

Message : Proposition

A : Produit-P1-Lot1428

De : MoyenTour1

Contrat : Tournage/Produit-P1-Lot1428/1

Description Proposition :

Position : < 1,1 >

Qualités : {Type T, Performance P}

Fin Proposition

## **4. Conclusion**

Le système de pilotage d'un atelier automatisé doit coordonner et diriger les activités de la partie opérative qui assure la transformation de la matière première en produits finis. Généralement, un tel système assure deux principales fonctionnalités : l'ordonnancement et le suivi de la production.

Par approche Multi-Agent ce système sera construit par un ensemble d'agent contrôlant les individus et déterminant leurs comportements tout au long du processus de production. *L'ordonnancement des activités de production et leur suivi sont des fonctionnalités émergentes de l'interaction entre les agents du système (les individus qui peuplent l'atelier de production).* Le système ainsi conçu permet d'assurer une gestion adaptée du système flexible de production tenant en compte l'état réel de celui-ci, en lui permettant de réagir et s'adapter en fonction des objectifs de production, aux fluctuations des besoins et aux aléas du système.

Les principales caractéristiques qui doivent être prises en compte lors de la conception d'un système de conduite des systèmes flexibles de production comprennent : la modularité, la décentralisation du système de conduite, et la réactivité face aux aléas pour garantir l'objectif d'une disponibilité maximale de la production. Ces caractéristiques peuvent être assurées à travers, l'implémentation du modèle d'état individuel par une approche Multi-Agent.

L'approche proposée fournit une caractéristique de flexibilité au système de pilotage devant les différents changements et les nouvelles restructurations physiques de l'atelier de production (développement de nouveaux produits, ajout ou suppression de modèle de produits, ajout ou suppression des moyens de production), et aussi devant les changements des méthodes de gestion appliquées.

# *Conclusion Générale*

# *Conclusion Générale*

Les ateliers flexibles représentent la nouvelle génération des moyens de production, ils sont constitués d'un patchwork de diverses techniques qui sont apparues il y a relativement peu de temps. Pour établir un système de production automatisée, la mise en œuvre entre les ressources d'un moyen de communication efficace, rapide et sécurisé s'avère nécessaire. Cette interaction dans l'industrie n'est plus résumée à la connexion entre machines, elle s'accroît de plus en plus pour englober les bases de données, les logiciels de supervision, les ressources physiques (robots, centres d'usinage, convoyeurs, etc.) qui deviennent de plus en plus intelligentes et autonomes.

Dans ces systèmes, le système de pilotage constitue la colonne vertébrale sur laquelle s'appuie tout l'atelier pour la réalisation de la production demandée. Mettre en œuvre un tel système est une opération délicate car la production est confrontée à un changement continu de flux de production, une demande urgente peut être arrivée à n'importe quel moment, en plus, les systèmes de fabrication flexibles sont caractérisés par leur instabilité face aux aléas.

Le travail présenté traite par une approche Multi-Agent la problématique du pilotage en temps réel d'un système flexible de production. Pour affronter leur complexité croissante, nous proposons de tirer profits de l'approche des fonctionnalités émergentes fournie par la notion d'intelligence collective. Au lieu de calculer un ordonnancement prévisionnel puis chercher sa réalisation effective, le système de pilotage construit à partir de cette approche considère l'ordonnancement et le suivi de la production comme des fonctionnalités émergentes de l'interaction des produits et des moyens de production.

Pour mettre en œuvre cette idée, l'approche s'appuie pour la modélisation du système physique de production sur le modèle d'état individuel. Ce modèle permet de présenter le comportement dynamique de la structure de production et assure une image fidèle de l'évaluation du système au cours du temps.

Le modèle d'état individuel permet à l'approche d'être générale et applicable à tout système flexible de production. Le modèle fourni aussi une caractéristique de flexibilité au système de pilotage. Cette caractéristique procura le système de pilotage par la capacité de faire face aux différents changements physiques (développement de nouveau produit, ajout

ou suppression de modèle de produits, ajouts ou suppression des moyens de production) ou de gestion (flux poussé, tiré).

En effet, le travail présenté dans ce mémoire ne constitue qu'un pas vers une approche plus complète. Comme perspectives nous citons les grands titres des travaux pouvant parfaire l'approche pour la conception d'un système de pilotage à base d'agents. Le premier travail permet de compléter l'architecture Multi-Agent proposée. En effet, dans ce travail nous n'avons présenté que l'aspect social du SMA, une spécification des agents produit et moyen donne une description plus fine et décrit leur mode de comportement individuel.

Un autre axe est celui de l'évaluation de performance du système flexible. Le comportement global du système de production sera perçu au travers des chiffres plus au moins macroscopiques : quantités produites, rendements des machines, taux et ratios de toutes natures.

L'approche de l'évaluation des performances à partir des modèles d'état individuel, proposée par Gilles Rodde, présente l'intérêt d'analyser le comportement des matériels en distinguant de façon formelle ce qui relève de l'équipement lui-même (état productif et arrêt propre) de ce qui est imputable au contexte (états arrêt induit et arrêt structurel). Le modèle d'état est suffisamment simple pour être intégré au directeur de commande de l'équipement, qui devient alors son propre mesure de performances. Ceci fournit aux organes de pilotage une grammaire commune pour la classification des temps mesurés et facilite les traitements des informations synthétisées pour la prise des décisions.

# *Références Bibliographiques*

---

# Références Bibliographiques

---

- [1] Jean Verger, Wacquet Michel. « Systeme de production structure et communication interne ». Edition EDUCALIVRE
- [2] Joseph.G.Monks. «Gestion de la production et des opérations cours et problèmes ». Traduit par Jean-Claud Engrand. Edition MCGRAW-HILL. 1993
- [3] Luc Boyer, Michel Poirée, Elie Salim. « Precis d'organisation et de gestion de la production ». Les Editions d'ORGANISATIONS. Paris. 1986
- [4] Alain Courtois, Chantal Martin-Bonnefous, Maurice Pillet. « Gestion de production». Les Editions d'ORGANISATIONS. 2000
- [5] Marino Widmer. « Modèles mathématiques pour une gestion efficace des ateliers flexibles». Presses Polytechniques et universitaires Romandes. 1991
- [6] Christophe Everaere, Patrick Perrier. « La flexibilité dans les organisations industrielles». Techniques de l'ingénieur, traité l'Entreprise Industrielle AG3100. 1999
- [7] Michel Jubin. « Ateliers flexibles d'usinage». Techniques de l'ingénieur, traité Mécanique et Chaleur B7030. 1994
- [8] Philippe Coiffet. « La robotique principes et applications»  
3ème édition Revue et complétée. HERMES. 1996
- [9] Stéphane Julia. « Coneption et pilotage de cellules flexibles à fonctionnement répétitif modélisées par Réseaux de Petri». Thèse doctoral de l'univerité PAULSABATIER DE TOULOUSE. 1997
- [10] Gilles Prod'Homme. « Commande numérique des machines-outils». Techniques de l'ingénieur, traité Génie Mécanique B7130. 1996
- [11] George Draghici, Nicolae Brinzei, Ioana Filipas. « La modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production». Les Cahiers des Enseignements Francophones en Roumanie, 1998
- [12] Claude Gailledreau. « Spécification et choix de l'équipement d'un système automatisé». Techniques de l'ingénieur, traité Informatique Industrielle R7545. 1995
- [13] Fouzia Ounnar. « Prise en compte des aspects decision dans la modélisation par Réseaux de Petri des systèmes flexibles de production». Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'IPNG. Institut national polytechnique de GRENOBLE.1999

- [14] Erwan Tranvouez. « IAD et ordonnancement : une approche coopérative du réordonnancement par systèmes multi-agents ». Thèse pour obtenir le grade de docteur en sciences de l'université d'AIX-MARSEILLE III. 2001
- [15] Jacques Ferber. « Les systèmes Multi-Agents : vers une intelligence collective ». InterEdition. 1995
- [16] Maria Caridi, Sergio Gavalieri. « Multi-agent systems in production planning and control : an overview ». Production Planning and Control Vol.15. No2. March 2004. 106. 118
- [17] René Mandiau, Emmanuelle Grisling Lesturgeon. « Systèmes Multi-agents ». Techniques de l'ingénieur, traité Informatique Industrielle S7216. 2002
- [18] Yipeng, Duncan Mcfarlane. « Adaptive agent-based manufacturing control and its application to flow shop routing control ». Production Planning and Control Vol.15. No2. March 2004. 145. 155
- [19] R.Querrec, S. Tarot, P Chevaillier, J. Tisseau. « Simulation d'une cellule de production. Utilisation d'un modèle à base d'agents contrôlés par Réseaux de Petri ». Ecole nationale d'Ingénieurs de BREST.
- [20] Christophe Sohier, Bruno Denis, Carole Vigny. « Validation du comportement dynamique d'un système multi-agents : application de l'éco-résolution à une cellule de production manufacturière ». MOSIM, 1997
- [21] Damien Trenteseaux, Olivier Sénéchal. « Conduite des systèmes de productions manufacturière ». Techniques de l'ingénieur, traité Informatique Industrielle S7598. 2002
- [22] Gilles Rodde. « Les systèmes de production modélisation et performances ». Editions HERMES. 1989
- [23] Claude Aleonard, Errc Dindeleux, René Soenen. « Conduite des systèmes de production ». Techniques de l'ingénieur, traité Généralités et Mesures et Contrôle R7598. 1994
- [24] Guillaume Beslon. « Contrôle sensori-moteur par réseaux neuromimétiques modulaires- Approche pour le pilotage réactif en atelier flexible ». Thèse pour obtenir le grade de docteur. institut national des sciences appliquées de LYON. 1995
- [25] Guy Doumeingts, Bruno Vallespir. « Gestion de production : principes ». Techniques de l'ingénieur, traité Généralités A8265.
- [26] Fritas Rafik. « Modélisation et analyse par réseaux de Petri d'un système de production géré en KANBAN application à l'entreprise « BAG » ». Mémoire de Magister. Université HADJ LAKHDAR BATNA. 2005
- [27] Damien Trenteseaux. « Pilotage hétéroarchique des systèmes de production ». Habilitation à diriger des recherches. Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS (UVHC). 2002

- [28] Myriam Noureddine. « Système d'aide au pilotage des flux de production par les systèmes Multi-agents ». CPI '2005- Casablanca, Marocco.
- [29] « Projet masci Modélisation, analyse et conduite des systèmes industriels ». Rapport d'activité. INRIA. 2002
- [30] Gerhard Weiss. « Multiagent Systems : a modern approach to distributed artificial intelligence ». The MIT Press. 1999
- [31] Younès Hafri, Najib M. Najid. « Uilistaion de l'approche Multi-Agent pour le pilotage en temps réel des systèmes de production ». 3<sup>ème</sup> conférence Francophone de modélisation et simulation « Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industrielles ». MOSIM, 2001
- [32] Bruno Denis, Jean-Jacques Lesage & Guy Timon. « Formalisation de la conception d'architecture de conduite des systèmes de production ». 2<sup>ème</sup> conférence international sur l'Automatisation Industrielle Nancy, France. 1995
- [33] Nader Troudi. « Système Multi-Agent pour les environnements riches en informations ». Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître des Sciences. Université LAVAL. 1998

ANNEXE

Pour mieux comprendre et expliquer les phénomènes dits émergents, nous présentons dans cette annexe une technique, proposée par J.Ferber [15], connue sous le nom de l'éco-résolution. Dans cette technique la solution d'un problème est obtenue lorsque tous les agents du système sont satisfaits. Si un agent n'est pas satisfait, il agresse les agents qui l'empêchent d'être satisfait. La propagation sous forme de contraintes constitue un processus de recherche dans l'espace des solutions du problème. Cette technique est généralement employée lorsque la solution du problème est inconnue ou trop complexe pour être mise en œuvre dans un système centralisé.

## 1. La coordination d'action

Lorsque plusieurs agents travaillent ensemble, il faut gérer un certain nombre de tâches supplémentaires qui ne sont pas directement productives mais servent à améliorer l'accomplissement des activités. Ces tâches supplémentaires font partie du système organisationnel, et sont appelées *tâches de coordination*.

La coordination des actions, dans le cadre de la coopération, peut être définie comme l'articulation des actions individuelles accomplies par chacun des agents de manière à ce que l'ensemble aboutisse à un tout cohérent et performant. Il s'agit ainsi de disposer dans l'espace et le temps les comportements des agents de telle manière que l'action du groupe soit améliorée soit par une augmentation des performances, soit par diminution des conflits.

La coordination d'action analyse la manière dont les actions des différents agents doivent être organisées dans le temps et l'espace de manière à réaliser les objectifs. Elle est nécessaire pour quatre raisons possibles :

1. Les agents ont besoin d'informations et de résultats que seuls d'autres agents peuvent fournir ;
2. Les ressources sont limitées ;
3. On cherche à optimiser les coûts par élimination des actions inutiles et évitement des actions redondantes ;
4. Permettre à des agents ayant des objectifs distincts mais dépendants les uns des autres de satisfaire ces objectifs et d'accomplir leur travail en tirant éventuellement profit de cette dépendance.

Il existe plusieurs formes de coordination [15]

# Coordination par synchronisation ;

# Coordination par planification ;

- # Coordination réactive ;
- # Coordination par réglementation.

## 2. La résolution par coordination : l'éco-résolution

### 2.1. Principe

L'éco-résolution est une approche particulière de résolution distribuée de problèmes. Elle sollicite que la résolution de problème revient à définir une population d'agents autonomes très simples dont le comportement et les interactions entre ces différentes entités permettent d'atteindre un état stable qui correspond à la solution du problème.

Contrairement à l'approche classique de résolution de problèmes basée sur l'exploration d'un espace d'états, l'éco-résolution n'utilise pas la notion d'état. Elle repose principalement sur l'interaction entre les agents. L'interaction due aux comportements des agents permet au système d'évoluer jusqu'à atteindre un état stable ou stationnaire qui représente la solution du problème. Enfin, l'arrivée, en permanence de nouvelles informations ne nuisent pas au fonctionnement du système. Ces nouvelles informations sont prises en considérations par les agents.

Au cours de leur comportement, ces agents effectuent parfois des actions particulières qui, si elles sont mémorisées, correspondent directement aux actions qui devraient être effectuées par un système centralisé (programme de planification) pour aboutir au résultat. Le plan est alors obtenu comme *un effet secondaire* du comportement des agents et la solution du problème *émerge* par effet de bord des interactions des agents.

### 2.2. Le modèle

Eco est un modèle général de système de résolution de problèmes fondé sur l'éco-résolution qui se compose de deux parties [15] :

1. Un noyau qui définit le protocole suivi par l'ensemble des agents. Ce noyau est absolument indépendant du domaine du problème à résoudre. Il consiste en une définition abstraite des agents du système, appelés *éco-agents* et surtout des interactions entre les différents comportements élémentaires des agents.
2. Une partie dépendante du domaine d'application, où les comportements des agents spécifiques au domaine son codé.

#### Les éco-agents

Chaque agent dispose d'un ensemble de comportements élémentaires prédéfinies qui l'entraînent dans une quête perpétuelle d'un état de satisfaction. Dans cette recherche de satisfaction, ces agents peuvent être gênés par d'autres agents.

Dans ce cas, ils agressent ces gêneurs, lesquels sont dans l'obligation de fuir. Au cours de cette fuite, ils peuvent être amenés à agresser d'autres gêneurs qui les empêchent de fuir, cette opération se poursuivant jusqu'à ce que les gêneurs se déplacent effectivement.

#### *Structure des éco-agents*

Chaque éco-agent peut être caractérisé par

1. Un but : c'est à dire un autre agent avec lequel il doit être dans une relation particulière, appelée relation de satisfaction, pour qu'il soit satisfait.
2. Un état interne : un éco-agent peut être dans l'un des trois états internes : satisfait, en recherche de satisfaction ou en recherche de fuite.
3. Des actions élémentaires : ces actions sont dépendantes du domaine qui correspondent aux comportements de satisfaction et de fuite des agents.
4. Une fonction de perception des gêneurs permettant de déterminer l'ensemble des agents qui empêchent l'agent courant d'être satisfait ou de fuir.
5. Les dépendances se sont les agents dont l'agent courant est le but, et ces dépendances ne pourront être dans l'état satisfait que si l'agent courant se trouve lui-même satisfait.

#### *Comportement des éco-agents*

Les comportements élémentaires d'un éco-agent sont indépendants du domaine d'application et leur interaction est définie dans le noyau d'ECO. Ces comportements peuvent être décrits comme des procédures. Voici une définition simplifiée de ces fonctions :

- # La volonté d'être satisfait : les éco-agents cherchent à se trouver dans un état de satisfaction. S'ils ne peuvent y parvenir, parce qu'empêchés par quelques gêneurs, ils agressent ces derniers.

Procédure EssayerSatisfaire (X)  
Si le but de X est satisfait alors  
pour tous les agents Y qui gênent X  
Fuir (Y, X, but (X))  
dès qu'il n'y a plus de gêneurs,  
alors FaireSatisfaction (X)

# L'obligation de fuir : lorsqu'un éco-agent est attaqué, celui-ci doit fuir. Il doit alors chercher une situation qui satisfasse la contrainte C qui est passé en argument de la fonction Fuir.

Procédure Fuir (X, Y, C)

Si X était satisfait, X devient insatisfait

soit  $p := \text{TrouverPlacePourFuir}(X, Y, C)$

si p est NIL, alors « pas de solution »

sinon pour tous les agents Z qui gênent X dans sa fuite vers p,

Fuir (Z, X, p)

dès qu'il n'y a plus de gêneurs pour fuir,

alors FaireFuite (X, p)

Les fonctions FaireSatisfaction, TrouverPlacePourFuir et FaireFuite sont dépendantes du domaine de l'application et doivent être adaptées pour chaque type d'éco-agent.

### 3. Mise en œuvre

Dans le cadre de l'éco-résolution, appréhender un problème, c'est définir une population d'agents dont l'ensemble des comportements tend à aboutir à un état stable, que l'on appelle la solution du problème. Chaque agent répond aux principes d'autonomie et localité, c'est à dire que les actions qu'il entreprend sont la conséquence à la fois de perceptions locales et des relations qu'il a établies avec d'autres agents.

Un éco-problème se définit par :

1. Un ensemble d'agents, chaque agent étant caractérisé par un but et un comportement composé des actions de base et des actions élémentaires dépendantes de l'application.
2. Une configuration initiale, décrite par un ensemble d'agents placés dans leur état de départ (Recherche de Satisfaction).
3. Un critère de terminaison défini comme une fonction des états de satisfaction des éco-agents.

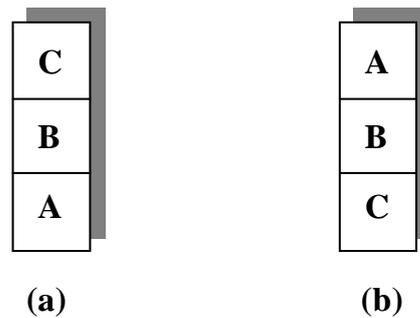
De ce fait l'étape la plus complexe pour résoudre un problème en ECO est de déterminer l'ensemble des agents et la manière de les utiliser. Elle nécessite une méthode d'analyse radicalement différente de la résolution de problème classique. Alors que cette dernière utilise généralement des opérateurs de transition d'état, l'éco-résolution suppose que se sont les entités du monde et non les opérateurs qui interagissent.

### 4. Exemples d'application

## 4.1. Les cubes

L'exemple le plus simple et en même temps, le plus parlant est donné par le problème, bien connu en planification, du monde des cubes. Il s'agit d'invertir trois cubes dans une pile, ce qui revient à échanger la valeur de deux registres. Un cube ne peut supporter qu'un seul cube et on ne peut prendre qu'un seul cube à la fois

Supposant que l'on désire obtenir un état (b) à partir d'une configuration (a) :



La solution classique consiste à explorer un ensemble d'états engendré par l'application de l'ensemble des opérations disponibles sur la configuration initiale. Si une branche conduit à un échec un retour en arrière est établie pour chercher une autre issue. Pour éviter cet inconvénient, les planificateurs utilisent des heuristiques afin d'effectuer un meilleur choix en limitant les retours en arrière.

Dans le cadre de l'éco-résolution, la solution consiste à donner aux agents des conditions de satisfactions relatives à l'état final : le cube A sera satisfait s'il est sur B, le cube B s'il est sur C, le cube C s'il est sur la table. Fuir consiste pour chaque cube à se poser sur la table, en sachant que l'agent table est toujours satisfait.

## 4.2. La cellule de production [20]

L'éco-résolution est utilisé pour modéliser le comportement du contrôleur d'une cellule de production. Chaque entité de la cellule est modélisée par un éco-agent. On distingue dans cette modélisation deux types d'éco-agents. Les éco-agents dits statiques modélisent les équipements de la cellule. Une instance est créée une fois pour toute lors de la création du système multi-agent. Les éco-agents dits dynamiques modélisent les pièces et les ressources (outil, programme d'usinage, ...) de la cellule. Des instances des éco-agents dynamiques sont créés lors de la résolution d'un éco-problème qui se définit comme un ensemble de d'instance d'éco-agents dynamiques avec leurs buts, leurs relations de dépendances et leur position dans l'environnement.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الحمد لله رب العالمين  
والصلاة والسلام على  
سيدنا محمد وآله الطيبين  
الطاهرين

وآلهم أجمعين  
اللهم صل على محمد  
وعلى آل محمد  
اللهم صل على محمد  
وعلى آل محمد