

D'UNE APPROCHE COMPOSANT VERS UNE APPROCHE AGENT POUR UN PILOTAGE OPTIMISÉ DES SYSTÈMES DE PRODUCTION

Georges HABCHI, Marc-Philippe HUGET, Magali PRALUS

LISTIC / ESIA

Université de Savoie

B.P. 806, 74016 Annecy – France

georges.habchi@univ-savoie.fr, marc-philippe.huget@univ-savoie.fr, magali.pralus@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ : Cet article traite du problème du pilotage et d'optimisation, associé à la modélisation et la simulation des systèmes de production manufacturiers. Après une brève introduction, nous proposons une analyse des systèmes de production du point de vue de la simulation ainsi qu'une conceptualisation des principaux composants du système. Trois concepts principaux sont modélisés : le système de transformation du produit (STP), l'entité circulante (EC) et le centre de pilotage (CP). Ces concepts sont formalisés et implémentés dans une plate-forme dénommée Apollo. Une application d'un système de production est ensuite modélisée et simulée avec Apollo pour valider les concepts proposés et montrer l'intérêt de l'utilisation des CPs principalement au niveau de l'adaptation de la capacité des centres de charge. Ainsi, la contribution scientifique de l'article est triple : d'abord, la validation des concepts proposés, ensuite la simplification de l'étape de modélisation et enfin l'introduction au modèle d'une couche décentralisée de pilotage, basée sur un système d'indicateurs normalisés. En plus de cette contribution, l'exemple étudié va également refléter les manques à combler au niveau du comportement des différents concepts et au niveau des relations entre ces derniers. Pour pallier ces manques et améliorer notre approche de modélisation, nous réalisons une analyse fondée sur les systèmes multi-agents (SMA) connus pour leur adaptabilité à modéliser des systèmes complexes décentralisés. Ainsi, nous proposons des améliorations et des perspectives qui nous permettront d'introduire par la suite une certaine intelligence au niveau des CPs et profiter des capacités des agents en communication, collaboration et coopération.

MOTS-CLÉS : Systèmes de production, Pilotage, Modélisation, Simulation, Systèmes multi-agents

1. INTRODUCTION

Pour faire face aux changements brusques de la demande, les entreprises manufacturières doivent piloter avec beaucoup d'agilité leur outil de production. Parmi les méthodes et outils de modélisation, la simulation est un moyen adapté pour répondre à cette problématique. Or, les systèmes de production (SdPs) tels qu'ils sont simulés actuellement se concentrent au niveau du flux physique en précisant le processus de fabrication et les spécificités des machines utilisées pour la réalisation des opérations. Cela a pour conséquence de rendre difficile la simulation car il est nécessaire pour l'utilisateur de trouver après plusieurs essais les bons réglages pour obtenir un résultat acceptable (nombre des machines, caractéristiques des machines, taille des lots, capacité des stocks, etc.). Il apparaît clairement que la simulation des SdPs manque d'automatisation et qu'il serait préférable de laisser le système évoluer de lui-même pour aboutir à une solution par émergence. En outre, les niveaux décisionnels où sont pris les choix des objectifs de production ne sont pas pris en compte dans les outils de simulation actuels. L'utilisateur doit donc faire un travail en amont afin de combler ce manque. Après validation des concepts proposés à travers un exemple de SdP à l'aide d'Apollo, nous proposons des perspectives pour exploiter les systèmes multi-agents (SMA) en modélisation et rendre la simulation plus automatisée.

Nous présentons les travaux réalisés en vue de modéliser et simuler les trois principaux processus mis en œuvre par un SdP :

- Processus de fabrication,
- Processus de traitement et fusion de l'information,
- Processus de pilotage.

L'analyse et la modélisation d'un SdP manufacturier sont détaillées dans la partie suivante. Puis nous présentons en partie 3, une application de simulation d'un SdP à l'aide de la plate-forme *Apollo* (Habchi, 2001). Après avoir soulevé les limites de la plate-forme actuelle, nous détaillons en partie 4 les apports possibles des SMA. Enfin nous concluons et présentons nos perspectives de recherche.

2. ANALYSE ET MODÉLISATION D'UN SDP MANUFACTURIER

Avant d'aborder nos travaux, nous présentons dans une première partie la manière selon laquelle nous avons analysé un SdP ainsi que les concepts que nous avons développés pour le modéliser. Cette partie fait référence à des travaux réalisés depuis plusieurs années (Bakalem, 1996), (Berchet, 2000), (Habchi, 2001).

2.1. Analyse du système de production

Un SdP peut être défini comme étant une association dynamique de trois parties essentielles (figure 1) :

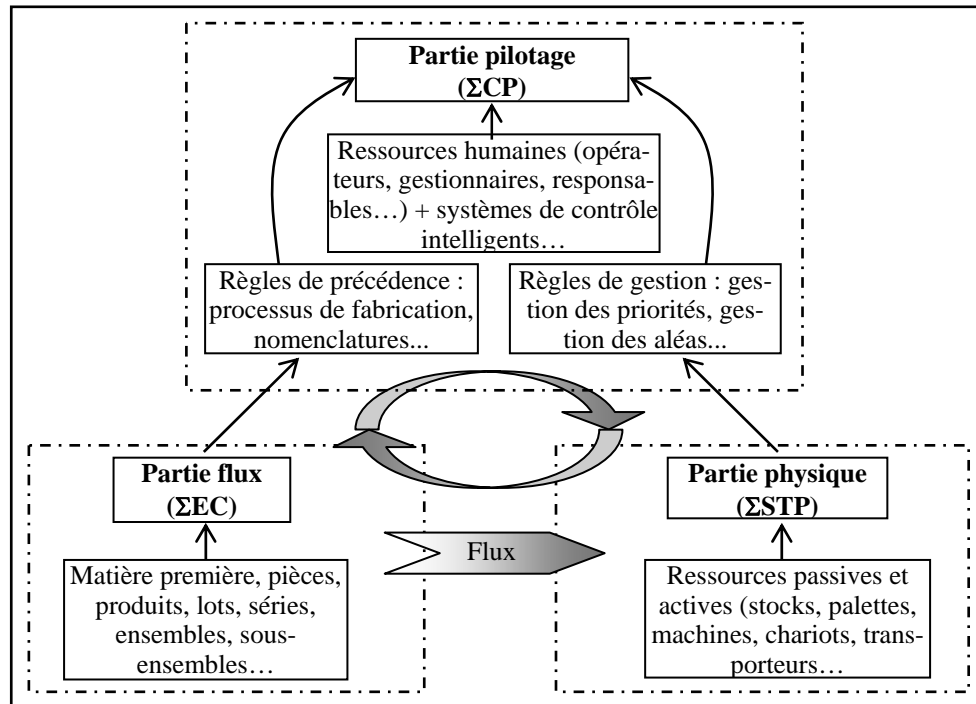


Figure 1. Décomposition d'un système de production

- D'abord, la partie constituée par un flux de matière ou d'entités à transformer ou à assembler et qui représentent généralement matières premières, composants, produits en cours de fabrication et produits finis. Le flux formé par ces éléments peut se trouver sous différentes formes : pièces unitaires, groupements temporaires, assemblages, lots, séries.
- Ensuite, une partie physique qui représente l'ensemble des moyens nécessaires à la réalisation des opérations sur le flux de matière. Elle comprend les machines, les espaces de stockage, les moyens de transfert, les robots, les manipulateurs, etc.
- Enfin, une partie contrôle ou pilotage qui représente la partie intelligente du système, c'est-à-dire ; systèmes de commande, systèmes de supervision, acteurs humains (gestionnaires, responsables, opérateurs, etc.). La partie pilotage associe des points d'acquisition et de collecte de l'information, des processus décisionnels (analyse, traitement de l'information et évaluation pour générer des décisions) et des actions (points de transfert des ordres ou des actions de la partie pilotage aux autres parties du système).

Plusieurs travaux de la littérature proposent des modélisations différentes du SdP en vue de sa simulation. Nous pouvons citer par exemple (Lopez-Mellado *et al.*, 2005) qui exploitent des réseaux de Petri à trois niveaux avec notamment un réseau d'agents et un réseau d'objets. Le réseau d'agents permet de représenter un produit qui évolue au sein de l'atelier en fonction des gammes de production. Le rôle de l'agent est de coordonner l'exécution des tâches en fonction de la gamme. Le formalisme de réseau de Petri différentiel à objet est quant à lui, utilisé pour la simulation de processus continu par lots (Hétreux *et al.*, 2004). La problématique abordée est l'évolution de la matière à ces

différents stades de production. La technologie objet permet de modéliser les procédés de manière modulaire (Hétreux *et al.*, 2003). Elle est également exploitée pour modéliser les SdPs à un niveau logistique supérieur (Hung *et al.*, 2006). D'autres travaux se basent plutôt sur l'aspect fonctionnel du SdP. Par exemple, concernant la conception d'un SdP de type « lean », les auteurs de (Houshmand and Jamshidnezhad, 2005) proposent de partir d'une description fonctionnelle du SdP pour obtenir les paramètres de conception du système et enfin les variables du processus. La description de modèles fonctionnels est également proposée par (Ghazel *et al.*, 2004) pour décrire un système de manière générale et plus particulièrement une usine ou un atelier de production. Ici la modélisation est réalisée à l'aide d'un méta-modèle basé sur le formalisme UML et proposé par les auteurs. L'exploitation de techniques de réalité virtuelle peut également être citée pour la simulation des systèmes de production (Mujber *et al.*, 2005). Cette technique permet de visualiser l'état des différentes machines de l'atelier (en production, en attente, en maintenance, etc.) par la représentation visuelle de la machine et de l'opérateur. Enfin, des approches proches du concept d'agents ou bien exploitant les systèmes multi-agents sont également proposées. Nous reviendrons sur ces travaux dans la suite de l'article.

Ces différentes techniques permettent de modéliser les SdPs en vue de leur simulation. Cependant, l'exploitation des résultats de la simulation reste un travail à fournir par l'utilisateur. Ainsi, après avoir analysé le SdP tel que décrit en figure 1, nous présentons dans la section suivante les concepts que nous avons retenus pour la modélisation d'un SdP dans le but de le simuler en y intégrant la notion de centre de pilotage.

2.2. Concepts de modélisation d'un SdP

Une analyse approfondie du SdP a montré que les éléments appartenant à chaque partie (figure 1) sont structurellement et fonctionnellement identiques et peuvent être modélisés par trois concepts. Il s'agit de l'Entité Circulante (EC), du Système de Transformation du Produit (STP) et du Centre de Pilotage (CP). Nous présentons brièvement ces trois concepts :

- L'EC est un concept générique modélisant le produit et son flux et ayant les caractéristiques suivantes : elle possède un objectif et une trajectoire définie *a priori* dans un processus de fabrication, elle est passive vis-à-vis d'elle-même et elle active les STPs et CPs qu'elle rencontre à son passage en déclenchant leurs comportements.
- Le STP est un concept générique possédant toutes les caractéristiques structurelles et fonctionnelles d'une ressource de production et ayant les trois propriétés essentielles suivantes : c'est un atome regroupant la cascade naturelle des trois opérations *réception* (obtention d'une ou plusieurs ECs à transformer), *transformation* (occupation du STP et blocage de l'EC pendant un temps donné de transformation) et *fourniture* (libération du STP et fourniture de l'EC transformée à un autre STP défini par le processus de fabrication ou la trajectoire). Il synthétise à la fois une ressource et sa commande dans un contexte non perturbé. C'est une structure récursive permettant de développer des modèles à différents niveaux hiérarchiques et d'abstraction.
- Le CP est défini comme étant « une structure organisée et autonome, dépendante de la stratégie de l'entreprise, ayant un pouvoir décisionnel, associée à une entité à piloter et disposant d'un ensemble de moyens nécessaires à la mise en place d'actions pour atteindre un ou plusieurs objectifs définis dans le cadre global de l'entreprise » (Berchet, 2000). Le processus de pilotage entrepris par un CP est défini par la séquence suivante : acquisition de l'information d'un STP, traitement et évaluation de l'information, prise de décision, choix d'un plan d'actions et transfert de ce plan aux ressources concernées.

Ces concepts ont été formalisés selon une approche algébrique et implémentés dans une plate-forme de modélisation et simulation orientée composants et dénommée *Apollo*.

3. APPLICATION À UN SDP

Le SdP choisi est proposé à titre d'exemple pour valider les concepts définis. Il aura l'avantage d'avoir un aperçu global des différents composants génériques utilisés dans Apollo mais aussi de montrer les manques à apporter aux concepts proposés.

3.1. Description du SdP étudié

Le SdP étudié comporte 10 stocks (Stk1 à Stk10), 5 centres de fabrication et 2 postes d'assemblage (CC1 à CC7). Il est organisé en 4 sous-processus (figure 2) :

- Le sous-processus défini par Stk1, CC1, Stk3, CC2 et Stk5 pour la fabrication des EC1,
- Le sous-processus défini par Stk2, CC3, Stk4, CC4 et Stk6 pour la fabrication des EC2,
- Le sous-processus défini par Stk8, CC6 et Stk9 pour la fabrication des EC3,
- Le sous-processus défini par CC5 et Stk7 pour assembler des sous-ensembles SE1 (EC1 + EC2),
- Le sous-processus défini par CC7 et Stk10 pour assembler des produits finis PF (EC3 + SE1).

Les processus (gammes) de fabrication des pièces EC1, EC2, EC3, du sous-ensemble SE1 et du produit fini PF sont fournis dans les tableaux 1, 2 et 3. Ces tableaux fournissent le n° d'opération, la ressource (stock ou centre de charge) ainsi que le temps opératoire unitaire exprimé en minutes. Une colonne assemblage indique les pièces à assembler pour SE1 et PF (Tableau 3).

N°Op	Ress.	T. Op.	N°Op	Ress.	T. Op.
1	Stk1	0	1	Stk2	0
2	CC1	5	2	CC3	5
3	Stk3	0	3	Stk4	0
4	CC2	7	4	CC4	4
5	Stk5	0	5	Stk6	0

Tableau 1. Processus EC1 et EC2

N°Op	Ress.	T. Op.
1	Stk8	0
2	CC6	6
3	Stk9	0

Tableau 2. Processus EC3

N°Op	Ress.	T. Op.	Ass.	N°Op	Ress.	T. Op.	Ass.
1	CC5	9	EC1 EC2	1	CC7	7	SE1 EC3
2	Stk7	0		2	Stk10	0	

Tableau 3. Processus SE1 et PF

Les ordres de fabrication pour les trois types de pièce EC1, EC2 et EC3 sont donnés dans le tableau 4 qui fournit la taille de lot, la date du 1^{er} lancement et l'intervalle entre les lancements exprimé en minutes.

	Taille lot	Date 1 ^{er} lot	Intervalle
EC1	15	0	70
EC2	10	0	45
EC3	20	0	90

Tableau 4. Ordres de fabrication

Tous les stocks sont gérés en FIFO et leur capacité en nombre de pièces est donnée dans le tableau 5. Les informations concernant les centres de charge sont récapitulées dans le tableau 6. Chaque centre est défini par : sa capacité en nombre de machines, son rendement ou performance, sa moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF), sa moyenne des temps techniques de réparation (MTTR) et son taux de rebut et/ou de reprise. À l'exception de la capacité, tous les paramètres peuvent être constants ou définis selon des lois de probabilité (normale, exponentielle, uniforme, Weibull, etc.). Dans notre cas, il faut noter qu'une loi normale est définie par Norm (moyenne ; écart-type), une loi uniforme par Unif (minimum ; maximum) et une loi exponentielle par Expo (moyenne).

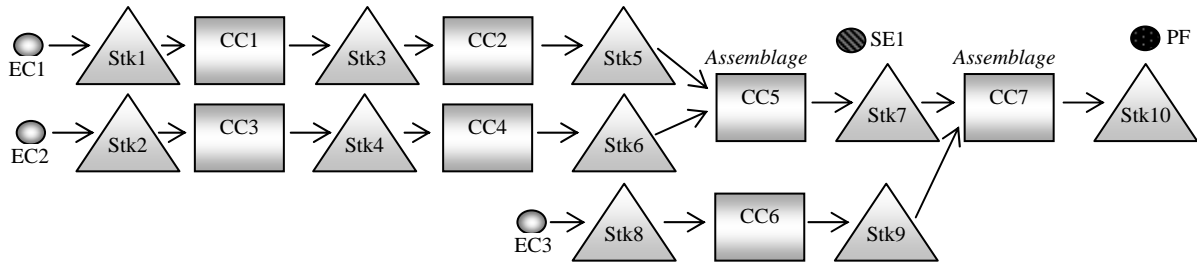


Figure 2. Système de production étudié

Stocks	Stk1	Stk3	Stk5	Stk2	Stk4	Stk6	Stk8	Stk7	Stk9	Stk10
Capacité	∞	25	10	∞	25	10	100	15	15	∞

Tableau 5. Capacité des stocks

Centres de charge	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7
Capacité (nb machines)	1	1 à 2	1	1 à 2	1 à 2	1 à 2	1 à 2
Rendement	1 à 1,15 maxi	Norm(0,9 ; 0,1)	1 à 1,15 maxi	1	1	1	1
MTBF estimée en min	Unif(800 ; 1000)						
MTTR estimée en min	Expo(15)						
Taux rebut estimé			Norm(0,05 ; 0,01)				
Taux reprise estimé						Norm(0,07 ; 0,01)	

Tableau 6. Caractéristiques des centres de charge

Comme le tableau 6 l'indique, le modèle réalisé au paragraphe 3.2 est stochastique puisque 4 centres de charge sur 7 comportent des caractéristiques non constantes (rendement, défaillances, rebuts, reprises) et selon 3 lois de probabilité (uniforme, exponentielle, normale).

Afin d'assurer la production demandée et vérifier la réactivité et la stabilité du SdP étudié, ce dernier doit atteindre les *objectifs de production* suivants :

- Une production de 300 PF par jour de 24 heures,
- Un temps de cycle moyen inférieur à 5 min/PF,
- Un encours maximal de 250 pièces dans le système.

Nous rappelons que le temps de cycle représente l'écart entre 2 dates de sortie successives de deux PF bons. Le temps de cycle moyen est recalculé à chaque fourniture de PF par le centre CC7. L'encours à un instant donné, est la somme de l'ensemble des pièces qui se trouvent dans le système (EC1, EC2, EC3 et SE1) aussi bien dans les stocks que sur les centres de charge. Un produit fini PF est considéré aussi comme un encours tant que l'opération d'assemblage sur CC7 n'est pas encore terminée.

Pour atteindre les objectifs assignés, le système est piloté à l'aide d'un ensemble distribué de CPs utilisant des indicateurs de performance tels que le taux d'occupation d'un STP ou la charge d'un stock mis à jour à chaque réception et à chaque fourniture de pièce. D'autres indicateurs auraient pu être également utilisés pour piloter le système. Dans notre cas, ils ne sont pas considérés uniquement pour des raisons de simplification. En cas de dérive du système, nous disposons des leviers d'actions suivants :

- Améliorer le rendement de CC1 et CC3 dans une limite qui ne dépasse pas les 15%,
- Augmenter la capacité des centres de charge en tenant compte de leur limite maximale.

L'adaptation de la capacité des centres de charge aux besoins de production peut être considérée comme un problème de pilotage et non d'optimisation dans la mesure où le système de production est existant. Le problème ici consiste à redéployer la main d'œuvre et déterminer le nombre d'opérateurs à affecter par centre de charge.

3.2. Modélisation du système et résolution

Pour modéliser le système, nous utilisons la plate-forme *Apollo* qui est développée en utilisant les concepts STP, EC et CP présentés précédemment. Pour l'exécution, la plate-forme est dotée d'un moteur de simulation hybride orienté événement/activité.

3.2.1. Modélisation

Le modèle est obtenu de manière naturelle et intuitive puisque *Apollo* propose des composants génériques et paramétrables, et par conséquent l'étape de modélisation ou de programmation est largement simplifiée. En effet, après saisie des listes des composants du système (pièces et produits, stocks, centres de charge, centres de pilotage), ces derniers sont placés sur l'écran et organisés de la même manière que le système réel. Les caractéristiques de ces composants sont saisies au niveau de l'interface du composant même. La liste des ordres de fabrication est saisie pour chaque type de pièce. Plusieurs types de variables, indicateurs, tableaux de bord et graphiques peuvent être rajoutés pour suivre l'évolution du système pendant l'exécution (figure 3).

3.2.2. Démarche de résolution

Pour atteindre les objectifs de production définis précédemment, nous adoptons une démarche à 3 étapes :

- Dans la 1^{ère} étape, nous simulons le système en conservant les caractéristiques suivantes : 1 machine par centre avec un rendement de 1 pour tous les centres sauf CC2 (rendement suivant loi normale),

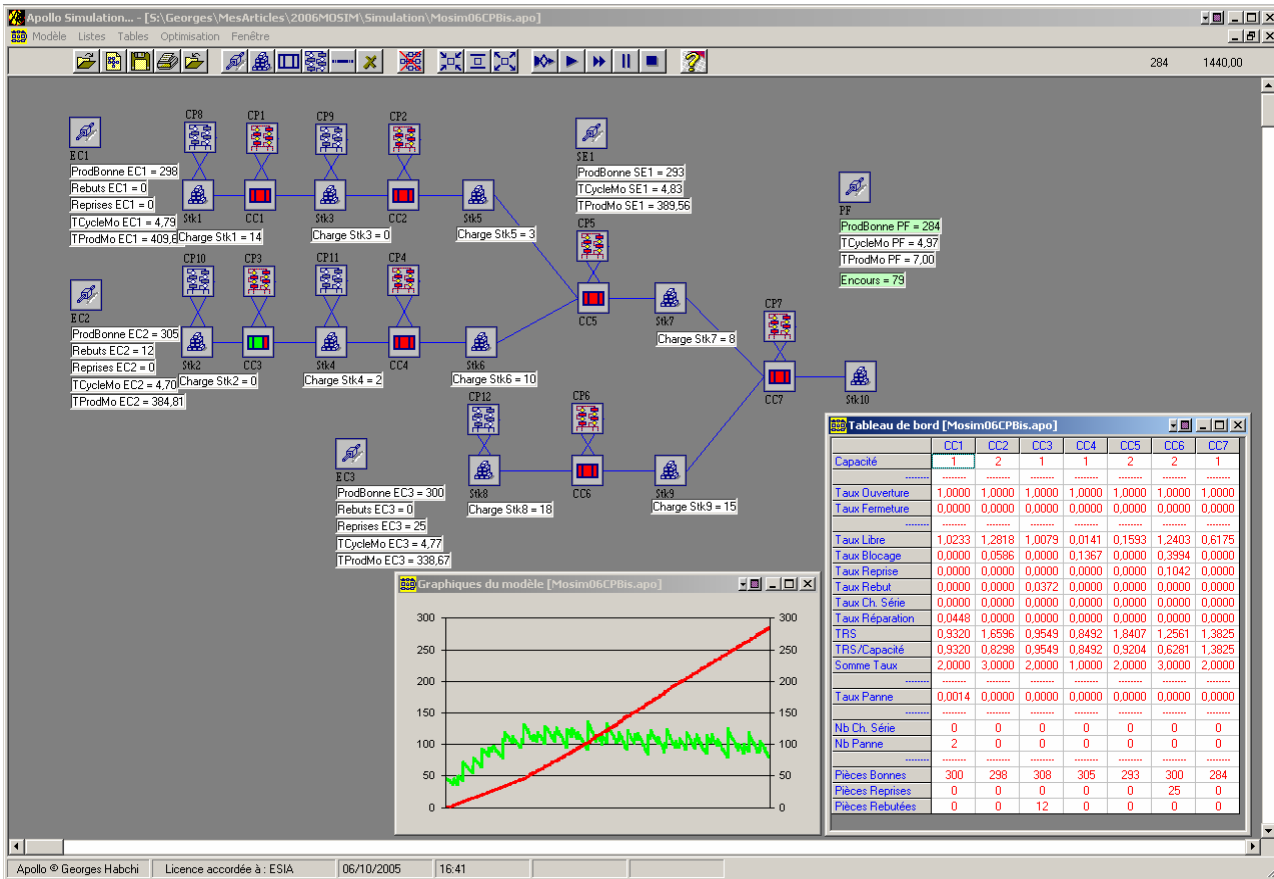


Figure 3. Modèle développé avec Apollo

- Dans la 2^{ème} étape, nous simulons le système en conservant ses caractéristiques d'origine à l'instant initial mais en introduisant des centres de pilotage tenant compte des objectifs et des actions à réaliser,
- Dans la 3^{ème} étape, nous simulons le système avec des ressources optimisées obtenues à la 2^{ème} étape.

Dans la 2^{ème} étape de simulation, les centres de pilotage vont modifier certaines caractéristiques des STPs en fonction des objectifs, des leviers d'action et des valeurs des indicateurs fournis par les stocks et les centres de charge de manière à adapter le système aux besoins. Dans notre cas, les règles suivantes sont utilisées :

- Si la charge d'un stock dépasse un seuil maximal, alors augmenter la capacité du centre de charge situé directement en aval ou éventuellement améliorer son rendement,
- Si le taux d'occupation d'un centre de charge est inférieur à un seuil minimum, alors réduire la capacité de ce centre si elle était augmentait,
- Si le taux d'occupation d'un centre de charge est supérieur à un seuil maximum, alors augmenter la capacité de ce centre ou améliorer son rendement.

L'augmentation continue de la charge d'un stock situé en aval d'un STP permet de déduire que ce dernier est probablement saturé ou goulet (parfois d'autres indicateurs sur le STP sont aussi nécessaires) par contre une charge stable ou nulle ne permet pas d'affirmer que le STP est sous-chargé. D'autre part, le taux d'occupation (ou le TRS) d'un STP utilisé seul et même

s'il est à 100% ne permet pas de déduire que le STP en question est goulet ou pas, sans aucune information sur l'état du stock en amont. Dans ce cas, une utilisation combinée de ces deux indicateurs permettra de piloter au mieux le STP concerné.

3.2.3. Résultats de simulation et interprétation

Pour les 3 étapes, les simulations sont exécutées une par une pendant une durée de 10 jours. Les résultats des indicateurs objectifs obtenus en fin de simulation sont récapitulés dans le tableau 7 et ceux concernant les différents centres de charge sont résumés dans les tableaux 8 à 10.

	1 ^{ère} étape	2 ^{ème} étape	3 ^{ème} étape
Production (PF)	1597	3022	3014
Encours final (pièces)	3098	172	174
Temps cycle moyen (minutes)	9	4,76	4,77

Tableau 7. Résultats en fin de simulation sur 10 jours

D'après le tableau 7, nous remarquons que les objectifs sont loin d'être atteints dans la 1^{ère} étape : en 10 jours la production est de 1597 PF seulement, l'encours ne cesse d'augmenter pour atteindre 3098 (figure 4) et le temps de cycle moyen (9) est largement supérieur à l'objectif. Le système n'est pas adapté à la production demandée.

Par contre, en utilisant des CPs les objectifs sont atteints dès la 2^{ème} étape. La production est de 3022, l'encours maximal est largement inférieur à 250 (figure 5) et le temps de cycle moyen (4,76) est inférieur à 5 min.

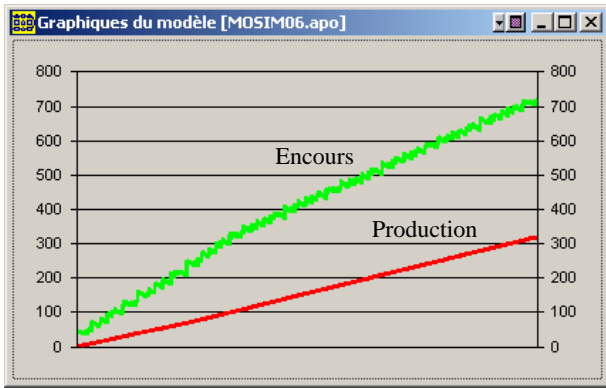


Figure 4. Production et encours sans pilotage (2 jours)

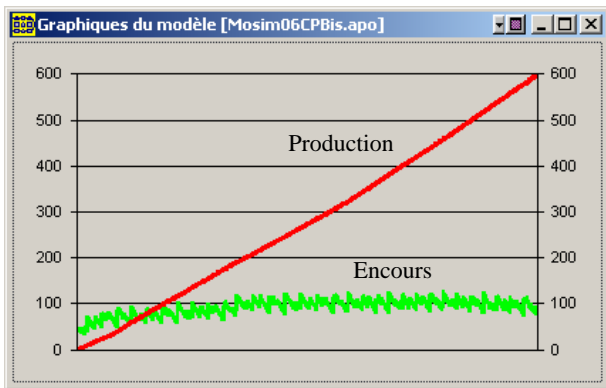


Figure 5. Production et encours avec pilotage (2 jours)

Pour la 3^{ème} étape, les objectifs sont aussi satisfaisants avec une production de 3014 PF, 174 encours en fin de production et un temps de cycle moyen de 4,77 min. En effet, nous remarquons d'après la 1^{ère} étape de simulation (tableau 8) que le centre CC5 est occupé quasiment à 100%. Par conséquent, comme les stocks d'encours ont une capacité limitée, celui-ci bloque les centres des sous-processus situés en amont (voir les taux de blocage des centres CC1 à CC4). Aussi, CC7 ne pouvant être alimenté à sa propre cadence par CC5 et la capacité du stock Stk9 étant limitée, le centre CC6 a également un taux de blocage important.

1 ^{ère} étape	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7
Capacité initiale	1	1	1	1	1	1	1
Taux libre				0,003	0,0009		0,22
Taux blocage	0,41	0,12	0,40	0,550		0,27	
Taux reprise						0,06	
Taux rebut			0,03				
Taux réparation	0,02						
Taux occupation	0,57	0,88	0,57	0,447	0,9991	0,67	0,78

Tableau 8. Résultats des CC pour la 1^{ère} étape

L'introduction des CPs nous a permis d'optimiser le nombre de machines par centre de charge (tableau 9). Ainsi, pour CC4, une seule machine est suffisante. Alors que pour les autres centres il faut 2 machines. Toutefois, nous remarquons que pour les 2 centres CC1 et CC3 la somme des taux à l'exception du taux libre est respectivement de 1,10 et 1,11. Donc, l'amélioration du rendement de ces centres dans une limite inférieure à 15% suffira pour atteindre les objectifs.

2 ^{ème} étape	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7
Capacité optimisée	2	2	2	1	2	2	2
Taux libre	0,73	0,09	0,89	0,14	0,11		0,53
Taux blocage	0,17	0,24		0,01		0,64	
Taux reprise						0,09	
Taux rebut			0,06				
Taux réparation	0,03						
Taux occupation	1,07	1,67	1,05	0,85	1,89	1,27	1,47

Tableau 9. Résultats des CC pour la 2^{ème} étape

Pour la 3^{ème} étape, la solution suivante est adoptée (tableau 10) :

- Capacité CC4 = 1 machine,
- Capacité CC2, CC5, CC6 et CC7 = 2 machines,
- Rendement CC1 et CC3 = 1,12.

3 ^{ème} étape	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7
Capacité optimisée	1	2	1	1	2	2	2
Taux libre	0,02	0,07	0,008	0,16	0,11	0,04	0,53
Taux blocage	0,01	0,27				0,59	
Taux reprise						0,11	
Taux rebut			0,056				
Taux réparation	0,02						
Taux occupation	0,95	1,66	0,936	0,84	1,89	1,26	1,47

Tableau 10. Résultats des CC pour la 3^{ème} étape

Dans les tableaux 8 à 10, le taux d'occupation peut être supérieur à 1 si le centre de charge dispose d'une capacité supérieure à 1 aussi.

3.3. Analyse de la problématique du pilotage d'un système de production

L'application présentée dans cette partie montre un intérêt limité de la capacité d'utilisation des centres de pilotage dans un modèle de simulation. Les règles qu'on peut y implémenter sont nombreuses et le comportement peut être largement amélioré. En effet, plusieurs points méritent d'être approfondis pour exploiter amplement le concept de centre de pilotage.

Actuellement, le comportement du CP est séquentiel et prédictif et est défini *a priori*. Il a ainsi la possibilité de réagir et modifier le comportement et les caractéristiques des STPs dont il est responsable. Toutefois, il ne possède pas de capacité de raisonnement et n'a pas la possibilité d'accumuler des connaissances. Les différents CPs peuvent recevoir des informations sur l'état d'un STP ou d'un stock par exemple, mais en aucun cas il n'est prévu une coopération des CPs pour atteindre un objectif global. Chaque CP cherchera à atteindre ses objectifs locaux et son comportement est fondé sur des opérateurs simples. Or, pour répondre aux objectifs globaux du pilotage d'un SdP, le comportement du CP doit être amélioré. Il est en effet primordial que les différents CPs puissent se coordonner dans leurs actions pour atteindre un objectif global. Le CP doit également être doté d'un comportement intelligent lui permettant de raisonner et de prendre les bonnes décisions. Le comportement du CP peut être amélioré en le dotant :

- De plus d'autonomie (auto-modification de l'objectif local par exemple),
- De plus d'intelligence en utilisant des règles plus sophistiquées de manière à rendre le comportement aussi bien anticipatif que réactif,

- De capacité de communication, coordination et coopération avec les autres CPs.

La question se pose également de savoir si un CP doit piloter un centre de charge ou plutôt un ensemble de centres de charge formant un processus. Faut-il choisir une architecture centralisée ou une architecture décentralisée (plate) ?

Une autre limite de la modélisation actuelle des CPs réside dans la difficulté à optimiser le SdP sans faire appel à l'utilisateur. En effet, il faut une intervention externe pour analyser les résultats de la simulation et ainsi pouvoir optimiser le SdP. L'objectif est alors de pouvoir arriver à une configuration du SdP qui soit stable par émergence. Ainsi, les trois étapes décrites précédemment seraient réalisées dans une seule et même étape de simulation. Il pourra également être envisagé de sauvegarder les expériences de pilotage passées et les réutiliser afin de compléter le processus décisionnel des agents cognitifs, ceci dans le but d'améliorer le pilotage (Ruet, 2002).

Enfin, les différents niveaux décisionnels que l'on pourrait envisager au niveau du pilotage ne sont pas pris en compte actuellement. Le pilotage se fait donc à un seul niveau et il semble intéressant de pouvoir enrichir le modèle avec des niveaux décisionnels multiples permettant de mieux représenter la structure décisionnelle interne à l'entreprise. La prise en compte de ces différents niveaux soulève deux nouvelles problématiques que nous souhaitons pouvoir résoudre à long terme :

- Comment envisager le déploiement des objectifs des niveaux décisionnels supérieurs vers les niveaux opérationnels inférieurs ?
- Comment envisager la fusion des résultats des niveaux opérationnels inférieurs vers les niveaux décisionnels supérieurs ?

Ainsi, une perspective importante de cet article concerne la modélisation SMA du processus de pilotage d'un SdP dans le cadre de la plate-forme *Apollo*. Nous chercherons à associer les concepts développés (ECs, STPs, CPs) à l'approche multi-agents. Le travail de recherche consistera en la définition et la réalisation :

- Des propriétés devant être satisfaites par le SMA d'après les concepts proposés,
- De l'architecture de l'agent pour modéliser les composants du système (STPs, ECs, CPs),
- De l'architecture du SMA pour obtenir une solution globale par coopération, coordination et émergence,
- Des mécanismes de coordination entre agents,
- D'une méthode de validation des propriétés du système.

4. SYSTÈMES MULTI-AGENTS POUR LE PILOTAGE DES SDPs MANUFACTURIERS

Les systèmes multi-agents (SMA) sont nés du constat d'échec des systèmes experts dans les années 80. En effet, ces derniers devaient disposer de l'ensemble des connaissances nécessaires pour résoudre un problème.

Cela devenait vite difficile à réaliser si jamais le domaine d'expertise était important et si ce domaine nécessitait d'autres domaines connexes. De plus, aucune coopération entre les systèmes experts n'était envisageable, par conséquent si un système expert disposait de connaissances pour un autre système expert, il ne les lui donnera pas car les systèmes experts n'étaient pas prévus pour cela. Pour finir, les systèmes experts ne disposent d'aucune autonomie. Par conséquent, ils sont invoqués par l'utilisateur et il n'est pas possible d'avoir un système expert qui effectue de l'expertise sur changement de l'environnement par exemple. L'ensemble des remarques données ci-dessus a fait naître le domaine de l'intelligence artificielle distribuée où la connaissance, l'expertise et le traitement ne sont plus centralisés dans une unique entité, mais répartis entre plusieurs entités actives appelées agents. Ces agents, une fois réunis définissent un SMA.

4.1. Théorie Multi-Agent

Selon le modèle Voyelle (Demazeau, 1997), un SMA est constitué d'un ensemble d'agents (Voyelle A) réuni en organisation (Voyelle O) qui interagit (Voyelle I) dans un environnement (Voyelle E). Nous ne rentrerons pas en détail sur chacun des éléments mais présenterons les principales caractéristiques. Le principal élément qui sous-tend un SMA concerne les notions de coopération et d'autonomie. En effet, un agent n'est pas en mesure de disposer de toute la connaissance nécessaire pour résoudre un problème ou, tout simplement, il n'a pas les capacités nécessaires (prenons l'exemple d'un robot qui doit déplacer une lourde charge et qui doit le faire avec d'autres robots). La deuxième caractéristique est l'autonomie ; un agent n'est pas invoqué par un utilisateur ou un autre agent mais il agit en fonction de ses objectifs et des changements dans l'environnement. Si un événement se produit dans l'environnement et que cela peut avoir une incidence sur lui (un service sur l'Internet qui n'est plus disponible ou une rupture de stocks par exemple), il modifiera son comportement en fonction. Comme nous l'indiquons, le comportement d'un agent n'est pas dicté par un autre agent, cela change donc le modèle de communication entre agents comme nous le verrons plus loin, il ne s'agit plus de faire de l'invocation de comportement dans l'agent (par appel de méthode par exemple) mais de faire des demandes par communication, libre à l'agent « invoqué » d'accepter ou non cette demande.

Deux types d'agents (et par conséquent d'architectures) sont considérés dans le domaine des SMA (Wooldridge, 2001) : les agents réactifs et les agents cognitifs. Ces deux types d'agents répondent à deux objectifs différents. Les agents réactifs simulent des entités animales comme les fourmis où le comportement est relativement limité. Un agent réactif agit selon un mode perception-action, i.e. lorsqu'un événement se déclenche dans l'environnement, l'agent modifie son comportement en fonction, et ce, grâce à des règles du type préconditions → actions. Les préconditions correspondent à ce que l'agent percevra. L'agent est dit réactif car il ne définit pas un comportement associé aux changements dans

l'environnement mais réagit de façon câblée aux percepts. Les agents réactifs sont fréquemment utilisés dans des systèmes de modélisation de vie animale (MANTA par exemple (Drogoul, 1993)) ou en relation avec des agents cognitifs (AGENT (Fernandes, 2001)). Dans ce dernier cas, les agents cognitifs observent le comportement des agents réactifs pour en déduire des situations particulières et agir en conséquence. Dans le cas du projet AGENT, il s'agissait de la réalisation de cartes routières à l'aide d'agents. Chaque agent réactif est une portion de la carte. Les agents cognitifs assurent un comportement global à la carte.

Il existe plusieurs types d'environnement dans les SMA selon le type d'application visé : de l'environnement correspondant à un ensemble d'ordinateurs mis en relation jusqu'aux environnements virtuels simulant de véritables environnements comme c'est le cas dans MANTA. Les environnements sont les loci où les agents et les ressources se trouvent et où ils peuvent évoluer.

L'interaction dans les SMA est cruciale car c'est elle qui porte la coopération, la coordination et l'échange d'information entre agents (Huget, 2001). Comme il existe deux types d'agents, il existe deux types d'interaction qui sont corrélées : une interaction pour agents réactifs et une interaction pour agents cognitifs. L'interaction entre agents réactifs se fait à l'aide de phéromones virtuelles et de force. Un agent réactif qui désire communiquer dépose dans l'environnement une trace qui est accessible pendant un certain temps par les autres agents. Les agents qui passeront à côté de cette trace pourront la consommer et modifier leur comportement en fonction. Il s'agit de l'approche qui a été suivie dans MANTA pour la communication entre les fourmis. Un cocon pourra ainsi informer les fourmis qu'il a faim. Dans le projet AGENT, les agents réactifs communiquent par l'intermédiaire de forces. Un agent bâtiment pourra appliquer sa force due à sa position sur un autre agent qui représente une portion de route. L'interaction entre agents cognitifs, rejoint la communication entre humains. Les agents cognitifs enverront des messages où il y aura un verbe et un contenu. Ainsi un agent pourra communiquer qu'il demande de l'information sur une donnée particulière par l'intermédiaire d'un message *request(a)*. La communication entre agents cognitifs utilise des protocoles. De nombreux exemples de protocoles existent, et en particulier le protocole de Contract Net (Smith, 1981) qui permet de mettre en place une coopération entre plusieurs agents.

Finalement, l'organisation suit les organisations humaines avec la présence de groupes et de hiérarchies. Ainsi, un agent pourra être sous les ordres d'un autre. La structure la plus naturelle reste toutefois le groupe où tous les agents adhèrent à un objectif commun (même si les agents peuvent être en compétition (Ferber, 1995)).

4.2. SMA pour STPs et CPs

Les agents offrent une approche nouvelle pour la modélisation et la conception de systèmes distribués

complexes par l'extension d'autres approches telles que l'approche orientée objet ou l'informatique distribuée. Au lieu de modéliser les systèmes distribués à l'aide de programmes échangeant données et commandes, la technologie agent permet la création d'agents décideurs autonomes qui communiquent leurs préférences, négocient des sous-objectifs et coordonnent leurs intentions de manière à atteindre leurs objectifs propres ou ceux globaux du système (Bussmann *et al.* 2004). Les avantages de la technologie agent sont largement reconnus et ont mené à une large étendue d'études dans différents domaines. Ces études comprennent entre autres des applications industrielles, commerciales, médicales, etc. (Luck *et al.*, 2003). Les SMA ont été aussi considérés pour des applications de chaîne logistique sans toutefois descendre au niveau de l'atelier (Fox *et al.*, 2000). Il s'agit uniquement de décrire les flux informationnels entre les différentes entités de la chaîne logistique. D'autres travaux provenant du domaine de génie industriel ont également exploité les SMA pour la simulation et/ou le pilotage des systèmes de production (Kouiss *et al.*, 2002). Concernant la modélisation de la chaîne logistique, les auteurs de (Labarthe *et al.*, 2004) proposent, à partir d'un agent cognitif et d'un agent réactif, un agent « acteur » qui permet de représenter n'importe quel acteur de la chaîne logistique.

Plus proche du pilotage d'atelier, nous pouvons citer les travaux de (Roy, 1998). Une plate-forme SMA est construite pour le pilotage d'ateliers. Différents types d'agents sont proposés (agents ressource, cellule et produit) qui représentent des entités physiques, des îlots virtuels ou bien des enchaînements d'opération. Un agent superviseur a pour rôle de contrôler le processus de production. Il est aidé d'un agent méta-objet afin d'insérer de nouveaux agents dans le système.

Dans (Kouiss *et al.*, 1997) les auteurs exploitent également une architecture multi-agents dans laquelle chaque agent supervise une ressource de production. L'objectif est ici de réaliser un ordonnancement dynamique suite à une modification de l'état du système. Un agent superviseur est chargé de contrôler l'ensemble du système de production via la communication avec les agents responsables d'une ressource de production. Ces derniers prennent des décisions quant aux règles de production à appliquer sur les ressources qu'ils supervisent. Cependant, l'agent superviseur peut intervenir et indiquer à chaque agent quelle règle appliquer afin d'atteindre les objectifs globaux du SdP. Cette approche du pilotage d'un SdP est proche de nos travaux, bien que les objectifs soient liés à l'ordonnancement dynamique.

Dans le domaine de la simulation des systèmes de production, les auteurs de (Galland *et al.*, 2003) proposent une plateforme de simulation basée sur une architecture multi-agents. Des agents cognitifs permettent de représenter le processus décisionnel. Un des intérêts à utiliser une architecture SMA est notamment de pouvoir réutiliser tout ou partie d'un modèle de simulation pour construire un autre modèle.

De même, les auteurs de (Gertosio *et al.*, 2000) intègrent dans un seul et unique modèle de simulation : un modèle physique regroupant les éléments du système de production et un modèle logique correspondant aux

éléments de pilotage du système. Toutes les entités physiques du système sont modélisées et à chacune de ces entités physiques est associée une entité logique. Alors que les entités physiques cheminent dans l'atelier, les entités logiques cheminent de manière synchronisée au niveau des fonctions de contrôle. Les SMA peuvent également être exploités pour représenter la partie décisionnelle d'un SdP (Lazansky *et al.*, 2001) pour la planification de la production. Les auteurs s'intéressent à la production par projet (quasi unitaire) plutôt qu'à la production en série et trois types d'agents sont utilisés : des agents planificateurs de projet, des agents gestionnaires de projet et des agents de production. Plus éloigné de notre problématique, les auteurs de (El Hmam *et al.*, 2004) proposent un SMA pour la simulation et la régulation de transport urbain. Les éléments du système de transport (bus, métro, stations) sont représentés par des agents. D'autres agents ont pour rôle de réguler l'ensemble de ces éléments. Ils communiquent via un tableau noir. L'objectif est d'assurer la gestion du système au niveau des horaires de passage des éléments aux différentes stations et les correspondances en fonction du trafic urbain (détection d'un accident par exemple).

Dans la proposition que nous faisons ici pour le pilotage des SdPs, nous comptons adopter un SMA ayant à la fois des agents réactifs et des agents cognitifs. Les agents réactifs seront implémentés au niveau des STPs. A chaque agent réactif est associé un ensemble d'indicateurs définis selon la norme, comme par exemple, les indicateurs de temps d'état (temps brut, temps net, temps utile...) et les indicateurs de taux (TRS, disponibilité, performance, taux de qualité...). Cette information sera disponible au niveau du CP qui est représenté sous la forme d'un agent cognitif. A chaque STP (et donc à chaque agent réactif) est associé un CP (et donc un agent cognitif). Dans des versions ultérieures du système, nous considérerons des améliorations du système en adaptant le nombre de CP en fonction des zones à problèmes dans la chaîne de production : si un STP ne pose pas de problème, il est inutile de lui associer un CP, par contre si un stock est régulièrement en situation de famine, il sera préférable d'ajouter un CP pour réguler la production en amont et en aval.

Le CP consigne donc les indicateurs provenant du STP qu'il a en charge et si la situation tend à s'aggraver (comme un TRS qui n'atteint pas l'objectif imposé), le CP décide d'agir en entrant en interaction avec le CP situé en amont ou en aval selon le type de problème rencontré. Ainsi, si le STP qu'il a en charge est souvent en situation de famine, il est peut-être nécessaire d'augmenter le rendement du STP situé avant le Stock concerné. La communication se fera selon un protocole de négociation qui reste à définir (SIAN, Contract Net...). L'idée est que les agents CPs vont faire des propositions entre eux afin d'améliorer la situation globale, i.e. l'objectif de production, jusqu'à ce que un certain consensus émerge. Les propositions pour améliorer le rendement pourront être par exemple d'augmenter la capacité d'un STP, créer un centre de charge (un STP ayant plusieurs unités) ou d'augmenter la capacité d'un Stock. La difficulté de l'approche va

être de définir des critères pour que la négociation aboutisse.

De même, les CPs pourraient intervenir pour modifier l'ordre des commandes clients ou des ordres de fabrication pour améliorer les délais, ou encore de rechercher une gamme alternative en cas d'aléas de production. En effet, si un agent réactif informe que le STP dont il est responsable est en panne, il est nécessaire que l'agent cognitif dérouté la production vers une autre machine. Ou si la taille des lots est inadaptée à la production, il sera possible que les agents du niveau CP coopèrent pour redéfinir une taille de lots mieux adaptée. Les différentes informations issues des STPs apparaîtront par l'intermédiaire de messages de la part des agents réactifs qui feront part de leurs résultats à l'aide d'indicateurs de performance adaptés et pertinents. Dans le paragraphe 3, nous avons fait mention qu'il était nécessaire de mettre en place trois étapes pour obtenir un système optimal. Grâce aux agents et à leur autonomie, il sera possible de laisser le système évoluer de manière à ce qu'une solution optimale apparaisse par émergence. L'utilisateur n'est plus obligé de trouver la solution par déduction, celle-ci apparaît d'elle-même.

5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté nos travaux de recherche portant sur la modélisation et la simulation des SdPs manufacturiers en introduisant la dimension de pilotage tant importante pour la conduite et l'organisation de ces systèmes. Ces travaux sont réalisés selon une approche de recherche logique et structurée comportant les étapes :

- D'analyse du SdP manufacturier en trois parties dynamiquement liées,
- De proposition de concepts selon une démarche globale du système en intégrant les fonctions de pilotage aux fonctions de fabrication, de stockage et de transfert classiques (STP, EC, CP),
- De modélisation et d'implémentation des concepts proposés dans une plate-forme générique (*Apollo*) permettant de modéliser et simuler des systèmes relativement complexes,
- D'application en modélisant et en simulant un SdP manufacturier qui aurait pu être un système tout à fait réel (modélisation de pannes, de rebuts, de reprises, etc.),
- D'analyse des phases de modélisation, de simulation et des résultats obtenus.

Cette approche nous permet de dresser un bilan positif et prometteur. En effet, les résultats sont très concluants à tous les niveaux : modélisation, vérification, validation, simulation et exploitation des résultats.

En plus, ils nous permettent de recommencer une nouvelle fois l'approche en adaptant nos concepts aux systèmes multi-agents reconnus pour leur capacité à modéliser des systèmes complexes décentralisés. En effet, les concepts STPs, ECs et CPs par leur fonctionnement, sont très proches des agents. Certains s'adaptent aux agents réactifs alors que d'autres pourraient être représentés par des agents cognitifs.

Les manques repérés dans la modélisation et l'implémentation actuelles des différents concepts, tels que la communication, la coopération, la coordination et l'autonomie et l'intelligence pourraient être comblés à l'aide d'un système multi-agent bien conçu.

REFERENCES

- Bakalem M., 1996. Modélisation et simulation orientées objet des systèmes manufacturiers, *Thèse de Doctorat en Électronique – Électrotechnique – Automatique*, Université de Savoie.
- Berchet C., 2000. Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel, *Thèse de Doctorat en Génie Industriel*, INP de Grenoble.
- Bussmann S., N.R. Jennings, M. Wooldridge, 2004. Multiagent Systems for Manufacturing Control: A Design Methodology, *Springer Series on Agent Technology*, Springer.
- Demazeau Y., 1997. Steps Towards Multi-agent Oriented Programming, *1st International Workshop on Multi-agent Systems (IWMAS)*, Boston, États-Unis.
- Drogoul A., 1993. De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes. *Thèse de Doctorat en Informatique*, Université Paris 6.
- El Hmam M., Abouaïssa H., Benasser A., Nicolas J.C., 2004. Modélisation, Simulation et Régulation d'un système de transport urbain, *5^e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, MOSIM'04*, 1-3 septembre 2004, Nantes, France.
- Ferber J., 1995. Les Systèmes Multi-Agents. Vers une intelligence collective. *InterEditions*, Paris.
- Fernandes K., 2001. Systèmes Multi-Agents Hybrides : Une approche pour la conception de systèmes complexes. *Thèse de Doctorat en Informatique*, INP de Grenoble.
- Fox M.S., M. Barbuceanu, R. Teigen, 2000. Agent-Oriented Supply Chain Management. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 12 (2/3), pp. 165-188.
- Galland S., Grimaud F., Beaune P., Campagne J.P., 2003. M_AMA-S : An introduction to a methodological approach for the simulation of distributed industrial systems, *Int. Journal of Production Economics*, vol. 85: pp. 11-31.
- Gertosio G., N. Mebarki and A. Dussauchoy, 2000. Modeling and simulation of the control framework on a flexible manufacturing system, *Int. Journal of Production Economics*, 64 (2000), pp. 285-293.
- Ghazel M., A. Toguyeni and M. Bigand, 2004. An UML approach for the metamodelling of automated production systems for monitoring purpose, *Computers in Industry*, 55 (2004), pp. 283-299.
- Habchi G., 2001. Conceptualisation et Modélisation pour la Simulation des Systèmes de Production, *HDR*, ESIA, Université de Savoie.
- Hétreux G., J. Perret and J.M. Le Lann, 2003. Modélisation et simulation dynamique des procédés à l'aide d'une bibliothèque de composants objets, *5^{ème} Congrès International de Génie Industriel (GI'2003)*, Québec, Canada.
- Hétreux G., R. Thery, J. Perret and Le J.M. Lann, 2004. Approche composant pour la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques hybrides, *5^{ème} Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation (MOSIM'04)*, Nantes, France.
- Houshmand M. and B. Jamshidnezhad, 2005. An extended model of design process of lean production systems by means of process variables, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Article in Press (2005).
- Huget M.P., 2001. Ingénierie des protocoles d'interaction dans les systèmes multi-agents, *Thèse de Doctorat en Informatique*, Université Paris 9.
- Hung W.Y., N.J. Samsatli and N. Shah, 2006. Object-oriented dynamic supply-chain modelling incorporated with production scheduling, *European Journal of Operational Research*, 169 (2006), pp. 1064-1076.
- Kouiss K., Gouardères E., Massotte P., 2002. Organisations distribuées des systèmes de pilotage, dans « *Fondements du pilotage des systèmes de production* », P. Pujo, J.P. Kieffer, *Hermès*.
- Kouiss K., Pierreval H., Mebarki N., 1997. Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 8, pp.41-47.
- Labarthe O., Montreuil B., Ferrarini A., Espinasse B., 2004. Modélisation multi-agents pour la simulation de chaînes logistiques de type personnalisation de masse, *5^e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, MOSIM'04*, 1-3 septembre 2004, Nantes, France.
- Lazansky J., O. Stepankova, V. Marik, M. Pechoucek, 2001. Application of the multi-agent approach in production planning and modelling, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14 (2001) pp. 369-376.
- Lopez-Mellado E., N. Villanueva-Paredes and H. Almeyda-Canepa, 2005. Modelling of batch production systems using Petri nets with dynamic tokens, *Mathematics and Computers in Simulation*, 67 (2005), pp. 541-558.
- Luck M., P. McBurney, C. Priest. 2003. Agent Technology: Enabling Next Generation Computing, *Deliverable du réseau d'excellence AgentLink II (IST-1999-29003)*.
- Mujber T. S., T. Szecsi and M.S.J. Hashmi, 2005. A new hybrid dynamic modelling approach for process planning, *Journal of Materials Processing Technology*, 167 (2005), pp. 22-32.
- Roy D., 1998. Une architecture hiérarchisée multi-agents pour le pilotage réactif d'ateliers de production, *Thèse de Doctorat : Université de Metz*, 1998.
- Ruet M., 2002. Capitalisation et réutilisation d'expériences dans un contexte multiacteur, *Thèse de Doctorat en Systèmes Industriels*, INP de Toulouse.
- Smith R.G. 1981. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*, 29 (12), pp. 1104-1113.
- Wooldridge M., 2001. Introduction to Multi-Agent Systems. *John Wiley and Sons*.

