

LA SIMULATION POUR L'AIDE AU PILOTAGE DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT

Olivier CARDIN, Pierre CASTAGNA, Etienne CHOVÉ

IRCCyN IUT de Nantes - Département QLIO
2, avenue du Prof Jean Rouxel BP539
44475 Carquefou

olivier.cardin@univ-nantes.fr, pierre.castagna@univ-nantes.fr, etienne.chove@univ-nantes.fr

RESUME : *Dans un système de production piloté par le produit, le produit devient un acteur intelligent participant à des décisions locales. Pourtant, ce système de production a des objectifs de plus en plus globaux. Nous montrons dans cet article comment la simulation peut être une aide importante pour cette prise de décision locale, en permettant à la fois une VISION globale de l'état du système et une PREVISION prenant en compte le comportement émergent de l'activité de l'ensemble des centres locaux de prise de décision. Nous présentons un exemple de système où la simulation sert à la fois d'observateur et d'outil d'aide à la décision.*

MOTS-CLES : *Pilotage par le produit, observateur, simulation en ligne, aide à la décision*

1. INTRODUCTION

Nous vivons depuis quelques années une double évolution concernant le pilotage des systèmes industriels, double évolution qui paraît de prime abord contradictoire. La première évolution se traduit par une intégration de plus en plus poussée de tous les acteurs du système industriel, depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'au service commercial en relation avec le client final. C'est le concept de « supply chain », qui prend la plupart du temps une dimension internationale du fait de la mondialisation. La deuxième évolution, se traduit par une recherche de flexibilité et de dynamisme, d'une part pour répondre à une demande elle-même de plus en plus variée et d'autre part pour mieux réagir aux aléas induits par des systèmes de plus en plus complexes. Cette double évolution conduit à une profonde évolution de la structure des systèmes de production qui passent progressivement d'une organisation hiérarchique, où les décisions sont prises niveau par niveau, du haut vers le bas, chaque niveau communiquant ses décisions aux niveaux inférieurs, à une organisation en réseaux, chaque nœud de ce réseau étant un centre de décision plus ou moins autonome (Trentesaux, 2001). Il est intéressant de constater le caractère fractal de cette évolution. Nous pouvons en effet la constater au niveau le plus global de la « supply chain », celle-ci étant constituée d'un réseau complexe de donneurs d'ordres et de sous-traitants. Mais nous pouvons aussi voir cette évolution au niveau d'un atelier de production, de plus en plus considéré comme un réseau de ressources de production négociant entre elles pour se répartir la charge de travail. Au plus bas niveau, des capteurs et des actionneurs intelligents deviennent capables de communiquer entre eux à travers des réseaux de terrain. Ce passage d'une structure

hiérarchique à une structure hétérarchique se traduit par une importante mutation du principe de pilotage qui de prédictif devient réactif. Le pilotage prédictif est basé sur la notion d'ordonnancement. Ce dernier consiste à prévoir dans le temps la date de réalisation de chaque activité. L'avantage de cet ordonnancement prédictif réside dans l'approche globale du problème, qui, en traitant l'ensemble des ressources de production, permet de garantir une relative optimisation du comportement du système. Cette optimisation est malheureusement relative à cause de deux problèmes. Le premier réside dans la complexité algorithmique de la plupart des méthodes d'ordonnancement, rendant leurs applications délicates pour des problèmes de taille industrielle. Si l'utilisation de méta-heuristiques permet en partie de résoudre ce premier problème, on se heurte alors à une deuxième difficulté qui est le manque de flexibilité de la solution obtenue. Dans la pratique industrielle, l'efficacité des meilleurs ordonnancements est souvent rapidement dégradée à cause des nombreux aléas venant remettre en cause les dates initialement prévues.

Le pilotage réactif est basé sur l'application d'un ensemble de règles de décisions prises en temps réel durant le fonctionnement de l'unité de production. Cette approche conduit à donner une place plus importante au produit qui, de simple matériau circulant dans le système, devient un acteur du système de pilotage, capable d'interactions intelligentes avec les autres composantes du système. Ainsi s'est développé le concept de pilotage par le produit. Il s'agit de conférer au produit un rôle actif et participatif dans les décisions et les flux d'informations engendrés dans un système de production, pour remplir des objectifs de transformation, de déplacement, de maintenance, de logistique, d'usage

et de recyclage (Pétin *et al.*, 2007), (McFarlane *et al.*, 2003).

Si le pilotage par le produit répond à un besoin d'évolution des structures de pilotage vers plus de flexibilité, il a été rendu possible par l'émergence des techniques d'identification automatique RFID (Radio Frequency Identification), conférant au produit des facultés de communication et de stockage d'information (Cea et Bajic, 2004).

Nous nous intéressons dans cet article à la prise de décision dans ce nouveau contexte de production. Dans le chapitre 2 nous montrons le dilemme d'une prise de décision locale pour faire fonctionner un système ayant des objectifs globaux.

Dans le chapitre 3, nous envisageons de donner à l'acteur de la décision locale la possibilité d'avoir une vision plus large du contexte de sa décision. Nous montrons les limites de l'extraction directe d'informations dans le système de commande et nous proposons une autre solution consistant à utiliser un simulateur reproduisant le comportement du système réel. Nous montrons enfin qu'il est alors nécessaire que ce simulateur soit connecté au système réel pour que son comportement soit le plus conforme possible au comportement du système réel. C'est le concept d'observateur par simulation.

Après avoir donné au décideur la possibilité de VOIR le système pour prendre sa décision, nous envisageons dans le chapitre 4 de lui donner la possibilité de PREVOIR, à court terme, l'incidence et les conséquences de ses décisions, par des mécanismes de simulation en ligne.

Le chapitre 5 est consacré à la description d'un exemple réel de production pilotée par le produit dans lequel nous avons intégré un observateur par simulation et un outil d'aide à la décision basé sur une prévision par simulation en ligne.

Enfin, le chapitre 6 nous permet de conclure et de donner quelques perspectives de ces travaux.

2. PRISE DE DECISION DANS UN CONTEXTE DE PILOTAGE PAR LE PRODUIT

Nous avons montré dans le chapitre précédent comment la recherche de flexibilité avait entraîné le passage d'un pilotage prédictif à un pilotage réactif, basé sur les décisions prises localement. Mais nous avons aussi souligné, au début de cet article, l'intégration de plus en plus poussée du système industriel global, à travers le concept de la « supply chain ». Un objectif majeur de la « supply chain » est d'améliorer les flux de produits et d'informations entre les fournisseurs et les clients, afin de mieux satisfaire ces derniers (Proth, 2006). Cet objectif suppose que l'ensemble des centres de décision locaux aient des objectifs communs globaux. Cette dualité entre autonomie d'un centre de décision et coopération entre centres de décision pour satisfaire un objectif global est au centre de la vision holonique du système de production. Le holon est tout à la fois un tout capable de décider, et une partie d'un système plus global ayant des objectifs à atteindre. Ainsi, dans un

contexte de pilotage par le produit, la décision locale qui sera prise devra aussi prendre en compte des objectifs qui dépassent le simple contexte de cette décision locale. Ceci peut se traduire par une décision prise à plusieurs niveaux. Prenons l'exemple d'un produit arrivant dans un stock, en amont d'un poste de travail. La décision consiste à indiquer dans quelle position de ce stock sera placé ce produit, c'est-à-dire quel sera son ordre de passage sur le poste de travail. Pour connaître cette position, le produit, à partir de ses paramètres propres (Date de livraison, priorité, durée opératoire, ...) applique une règle de priorité. La règle de gestion de stock à appliquer (EDD, SPT, CR/SPT,...) est choisie par le centre de décision global de la ligne. Ainsi, la décision de position dans le stock est prise à la fois localement par le produit en fonction de ses caractéristiques propres et globalement par la ligne de production en fonction des objectifs globaux du système. De nombreux chercheurs ont travaillé sur les mécanismes de résolution de problèmes par une entité décisionnaire. Rasmussen et Hoc ont décrit trois mécanismes conduisant à la prise de décision (Rasmussen, 1983), (Hoc, 1996). Le premier est basé sur une action réflexe. Elle correspond à une situation déjà rencontrée, pour laquelle la réponse à apporter est déjà connue. Le second fait appel à des règles. La situation n'a pas déjà été rencontrée, mais des situations similaires sont déjà connues. Un ensemble de règle a été défini. L'application de ces règles va permettre de définir un ensemble de stratégies possibles. Le troisième mécanisme fait appel à la connaissance du décideur. La situation est entièrement nouvelle et le décideur devra repartir des objectifs globaux de son système pour bâtir une nouvelle réponse au problème rencontré. Nos travaux se situent clairement dans le cadre de la seconde alternative, où la décision est basée sur des règles.

De façon générale, le centre de décision utilise alors, pour prendre sa décision, un ensemble d'alternatives. Il essaie alors d'évaluer l'impact de chacune d'elles pour choisir celle qui sera appliquée. Le centre de décision a donc besoin de deux choses. D'une part il doit connaître l'ensemble des informations lui permettant de bâtir les différentes alternatives possibles. Il doit, d'autre part, disposer d'un outil de prévision pour évaluer ces différentes alternatives.

Le problème dans le pilotage par le produit est que le comportement global du système émerge d'un ensemble de décisions locales prises par différents centres de décision.

Il y a donc une double difficulté pour le centre de décision local : celle d'avoir une VISION globale du système et celle d'avoir une PREVISION globale du comportement de ce système.

3. AVOIR UNE VISION GLOBALE

Notre premier objectif a été de déterminer un moyen efficace d'étendre la vision que peut avoir un pilote sur un système contrôlé par le produit. Nous avons choisi d'examiner trois principales possibilités pour avoir une

vision complète et à jour de l'état du système à tout instant. Les paragraphes suivants détaillent ces possibilités. Leurs conclusions traitent des conditions d'applicabilité de chacune des solutions.

3.1. Données directement collectées sur le système réel

La première solution que nous avons envisagée, pour connaître l'état global du système, est de collecter des données issues du système réel, au travers de la commande, du MES ou des composantes supérieures de la décomposition CIM, telles que l'ERP ou l'APS (Figure 1).

Cette solution a plusieurs avantages. Les données récupérées sont fiables et représentent l'état réel du système de production.

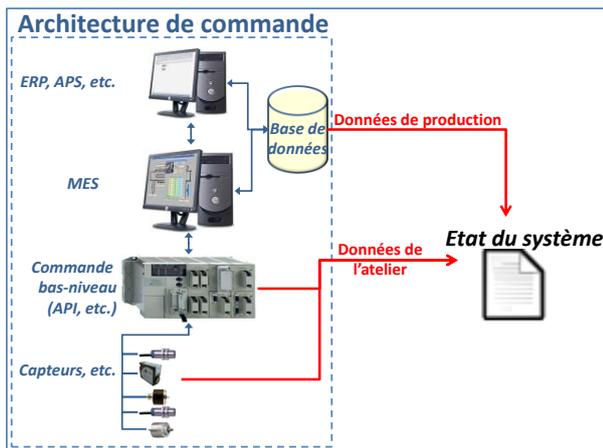


Figure 1. Données directement collectées sur le système de production

La composante la plus importante de cette collecte de données est la performance des capteurs et détecteurs installés sur le système. Certains capteurs pourront nous renseigner en continu sur l'évolution d'une grandeur du système. Un capteur de température pourra par exemple nous donner en continu les conditions à l'intérieur d'un four. Toutefois, en général, beaucoup de données ne sont pas mesurées de cette manière. Prenons l'exemple de la position de véhicules autoguidés (AGV) dans un atelier. Des détecteurs disposés à certains points du circuit (intersections, postes de travail, etc.) suffisent pour piloter la flotte. Le problème est qu'une grande incertitude naît de l'utilisation de tels dispositifs. En effet, lorsqu'un AGV est en face d'un détecteur, on connaît à la fois sa position et la date courante. Dès qu'il se déplace entre deux détecteurs, sa position est totalement inconnue (exceptée l'information disant qu'il se situe sur le tronçon entre les deux détecteurs), et sa date de passage devant le prochain détecteur est indéterminée. Il est impossible que l'ensemble de la flotte d'AGV ne se situe en face des détecteurs présents sur le système à chaque moment où un centre de décision local a besoin des informations. De ce fait, le MES n'a accès, à chaque ins-

tant, qu'à une vue partielle de l'état complet de l'atelier : c'est ce que l'on a pu définir comme étant les incertitudes spatiales et temporelles du MES (Cardin et Castagna, 2006).

Nous avons de plus pris le parti dans ces travaux de n'utiliser que les capteurs et détecteurs strictement utilisés par la commande. Pour reprendre l'exemple précédent, l'utilisation des technologies telles qu'un module GPS ou un système de reconnaissance d'image serait envisageable pour obtenir la position exacte des AGV, mais peut également s'avérer très coûteuse, d'autant qu'il sera souvent indispensable de coupler plusieurs de ces technologies pour obtenir l'ensemble des informations nécessaires à la définition de l'état du système. Cette contrainte permet de limiter les coûts d'installation de notre système de perception globale du système.

La conclusion que nous avons tirée est que l'utilisation de cette solution est limitée, du fait du manque de disponibilité de certaines des données, prépondérantes dans la définition de l'état du système. Toutefois, elle est à conseiller dans les rares cas particuliers permettant son utilisation principalement grâce à la fiabilité des données obtenues et à la simplicité de mise en œuvre de la solution. Nous citerons par exemple le contrôle aérien où la position, le plan de vol et la trajectoire actuelle de chaque appareil sont parfaitement connus à chaque instant (Rogers et Flanagan, 1991).

3.2. Utilisation d'un simulateur temps-réel

Depuis quelques années, la plupart des éditeurs de logiciels de simulation proposent des versions dites « temps-réel » de leurs outils. Ces simulateurs ont la particularité de ne pas tourner à vitesse maximale mais de caler leur horloge sur le temps du système réel (souvent appelé wall clock), d'où le nom de simulateur temps-réel. Ces simulateurs ont été développés pour répondre à des besoins d'utilisation de la simulation en temps qu'émulateur de système physique. L'idée initiale est de réduire la durée de mise au point de systèmes complexes de production en réalisant les tests du système de commande en le couplant sur cet émulateur, sans attendre l'existence du système physique.

Notre idée est d'utiliser un tel simulateur, tournant parallèlement à la production. Ce simulateur réagit aux sollicitations de production venant du MES ou de l'ERP, tout comme le système de production réel. Ainsi, il permet de créer une « image » permanente du système réel, que nous considérons comme étant la plus complète approximation de l'état réel du système (Figure 2). Cette solution offre deux avantages importants par rapport à l'utilisation directe des informations issues du système réel. Le premier est qu'elle supprime le problème des incertitudes spatiales et temporelles définies précédemment. Si nous revenons un instant sur l'exemple de l'AGV précédemment présenté, le simulateur permet de connaître sa position actuelle à tout temps.

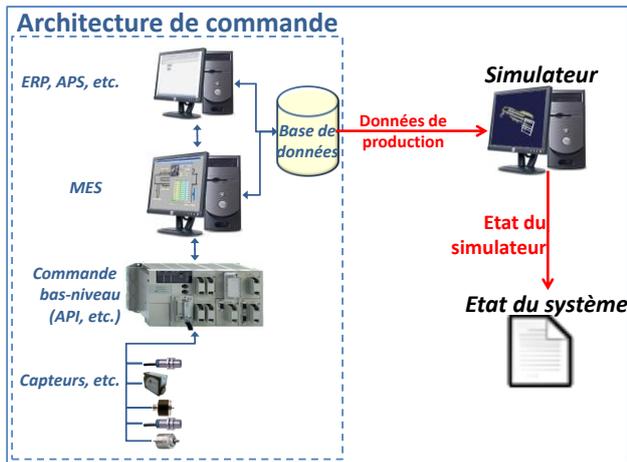


Figure 2. Utilisation d'un simulateur temps-réel

Un second avantage est que l'état récupéré avec cette méthode est très bien formaté pour un traitement informatisé ultérieur. Un tel traitement informatisé est généralement nécessaire tant l'état récupéré est fourni et complexe.

Plusieurs problèmes se posent néanmoins lors de l'application de cette solution. Tout d'abord, l'initialisation de ce simulateur : celui-ci doit démarrer sur un état connu du système de production, qui sera typiquement choisi « vide et inactif » (empty and idle), car c'est généralement l'état le plus facile à décrire complètement « à la main ». De plus, les défauts dans la modélisation du système et les différents aléas qui surviennent au cours de toute production entraînent une déviation sur le résultat final. L'aspect additif de ces écarts au cours du temps finirait par avoir un effet qui peut être loin d'être négligeable.

Pour répondre à cela, plusieurs contraintes doivent être imposées pour garantir l'applicabilité de la solution. Tout d'abord, le simulateur doit être extrêmement fidèle pour limiter au maximum les erreurs dues à la modélisation. Ensuite, il sera préférable de considérer des systèmes qui reviennent régulièrement à un état connu (généralement vide). On pourra citer par exemple des systèmes de production qui se vident chaque jour en fin de journée. On parle de systèmes à cycles régénératifs. Ceci permettra à la simulation d'être réinitialisée, et donc de rattraper les erreurs qui auront été commises. Enfin, il est préférable que le système considéré ait une fréquence d'occurrence d'aléas faible relativement à l'horizon de simulation sans remise à jour. En effet, ces aléas ne peuvent être directement pris en compte dans la modélisation du simulateur, et ajoutent donc directement à la déviation du simulateur.

La classe de systèmes qui peut être considérée est donc restreinte, mais cette solution a l'avantage de constituer une alternative possible et crédible pour des applications de taille limitée qui ne peuvent se permettre les investissements nécessaires à l'utilisation des autres solutions et qui ne nécessitent pas l'obtention d'une précision importante.

3.3. Utilisation d'un observateur

Comme nous avons pu le voir dans les paragraphes précédents, les deux solutions que nous avons initialement envisagées se sont avérées bien adaptées pour des classes restreintes d'application. Dans un souci de construire une solution applicable à la classe de systèmes la plus élargie possible, nous avons donc eu l'idée d'hybrider les deux solutions proposées précédemment comme présenté dans la Figure 3. Ainsi, nous pensons gagner les avantages du simulateur temps-réel au niveau de la disponibilité des données et ceux de l'utilisation directe des données du système réel au niveau de la fiabilité des données.

La figure 3 présente les principes d'une telle solution. Par rapport à la solution précédente, le simulateur est complété par une couche d'observation en temps réel qui gère les données en provenance de la commande bas-niveau. L'ensemble (simulateur temps-réel et couche d'observation) constitue un observateur du système de production. En utilisant les données collectées par la couche d'observation, cet ensemble est capable de recalculer ses prévisions sur ce qui s'est effectivement passé sur le système. Ce recalage permet d'éviter toute dérive de l'état du simulateur temps-réel par rapport à la réalité. De ce fait, cet observateur tournant à la même vitesse que le système réel, il constitue une image très complète du système. Ainsi, pour connaître l'état du système réel, le décideur local peut d'adresser directement à cet observateur.

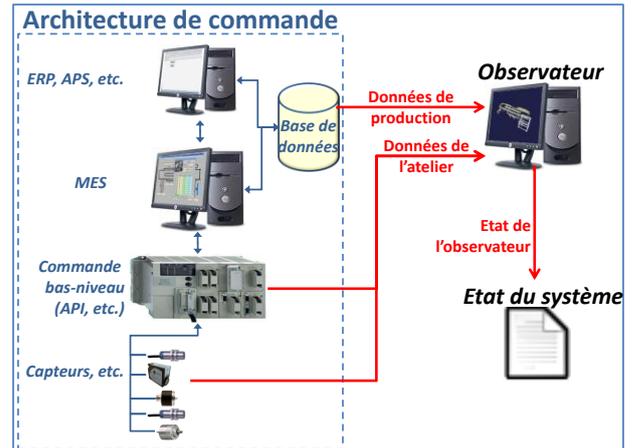


Figure 3. Utilisation d'un observateur

Nous pensons que cette solution est la plus performante implémentable avec les contraintes exprimées précédemment. Mais, même si les coûts d'implantation sont relativement réduits, cette solution reste difficile et est donc réservée aux grandes installations. Lorsque l'on traite de productions contrôlées par le produit, ces contraintes sont généralement respectées car les installations sont rapidement assez importantes.

Nous avons montré dans ce chapitre comment le décideur local peut, grâce à un observateur basé sur la simulation de flux, percevoir le système de production dans sa globalité. Nous allons montrer ensuite comment, à

partir de cette perception, il va pouvoir prévoir l'incidence de ses décisions.

4. PREVISION

Nous proposons dans cette section l'utilisation d'un outil d'aide à la décision basé sur la simulation à événements discrets. À la fin des années 1990, plusieurs réflexions ont été menées sur l'avenir de la simulation. L'idée motrice de ces réflexions a été de passer d'une simulation destinée à la conception d'un système de production à une simulation pour l'aide au pilotage. Ce passage a bien évidemment d'abord été envisagé pour les grandes installations, où des modèles de simulation avaient déjà été construits. Dans (Castagna *et al.*, 2001), les auteurs répondent à une demande de l'industrie aéronautique qui voulait un simulateur permettant d'avoir une prévision claire du comportement de leur unité de production sur un horizon court (une journée). Le concept associé a notamment été exposé dans (Davis, 1998) sous le nom de *simulation en ligne*.

Le comportement local des systèmes contrôlés par le produit est généralement facile à exprimer, étant donné qu'il n'est constitué que d'un ensemble de règles locales que chaque agent respecte. Il est par contre difficile de connaître le comportement global, émergent des comportements de chaque agent. La simulation est aujourd'hui le seul outil permettant la prévision de ce comportement émergent, quelque soit la complexité du système. Elle permet de reconstituer l'évolution globale du système à partir d'un état parfaitement connu. Cette simulation en ligne n'est pas sans poser quelques problèmes. Le premier consiste à démarrer cette simulation à partir d'un état non-vide du système. La plupart des outils de simulation, développés pour concevoir des systèmes complexes ne permettent pas cette initialisation dans un état quelconque. Le deuxième problème est la connaissance de cet état initial. L'ouverture de plus en plus grande des outils de simulation comme QUEST, ARENA ou WITNESS permettent aujourd'hui de résoudre le premier problème. L'observateur décrit dans la section 3 est bien évidemment très utile pour résoudre le second problème, étant donné que les données contenues dans l'état qu'il est à-même de fournir sont en parfait accord avec les données nécessaires à l'initialisation de notre simulation en ligne.

Ainsi, chaque agent local du système peut, lors d'un processus de décision, faire appel à un ou plusieurs déroulements de simulation en ligne dans le but de prévoir l'incidence de chacune des options de sa décision sur le comportement global du système.

Sur le plan de la réalisation physique, il est possible d'interfacer la simulation avec presque tous les composants d'une architecture classique de commande, des APS aux API en passant par le MES. Chacun de ces composants est capable de demander une simulation sans l'intervention des autres. Lors de cette demande, la première étape est alors la récupération de l'état de l'observateur, considéré alors comme étant la meilleure approximation de l'état réel du système de production.

Le déroulement de la simulation en ligne peut alors démarrer. Lorsque celle-ci est terminée, les résultats sont envoyés au composant demandeur de la simulation. La Figure 4 représente cette solution, avec une demande de simulation de la part du MES, les résultats étant alors stockés dans sa base de données. Volontairement, toutes les communications entre éléments de l'architecture ne sont pas représentées pour ne pas surcharger inutilement la figure. Comme nous l'avons dit précédemment, le principal objectif de nos travaux est de fournir une aide à la décision à chaque agent local tout au long de la production. De ce fait, l'architecture que nous proposons a été pensée de manière à laisser la possibilité d'ajouter ultérieurement des algorithmes d'optimisation, pouvant compléter la simulation en ligne dans l'architecture du système d'aide à la décision. Notons enfin que d'autres outils que la simulation peuvent bénéficier de notre observateur pour proposer des solutions au décideur.

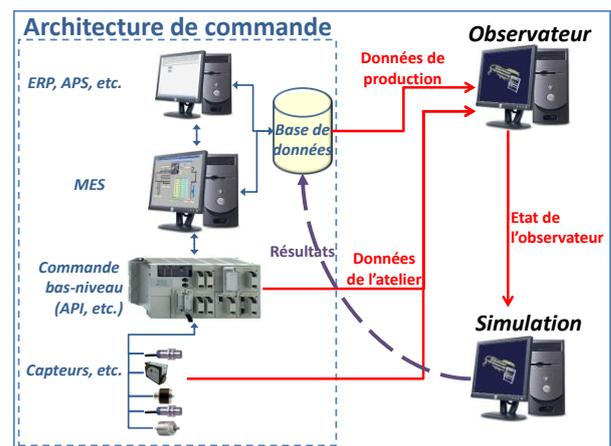


Figure 4. Relation entre simulateur, observateur et architecture de commande

5. Un exemple d'application

Nous avons appliqué les concepts énoncés précédemment au pilotage d'une ligne réelle d'assemblage.

5.1. La ligne d'assemblage

Le système de production étudié (Figure 5) est situé au département Qualité, Logistique Industrielle et Organisation (QLIO) de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Nantes. Il a été conjointement financé par l'IUT et L'Atelier Inter-établissement de Productique (AIP PRIMECA) des Pays-de-Loire, puis développé au sein du département QLIO. Ce système, une ligne d'assemblage automatisée, fait partie d'un ensemble de production plus large, comprenant un magasin dynamique automatisé, et un ensemble de transport comportant deux chariots optoguidés. La finalité de cet ensemble est bien sûr la formation des étudiants de l'IUT mais aussi la recherche.

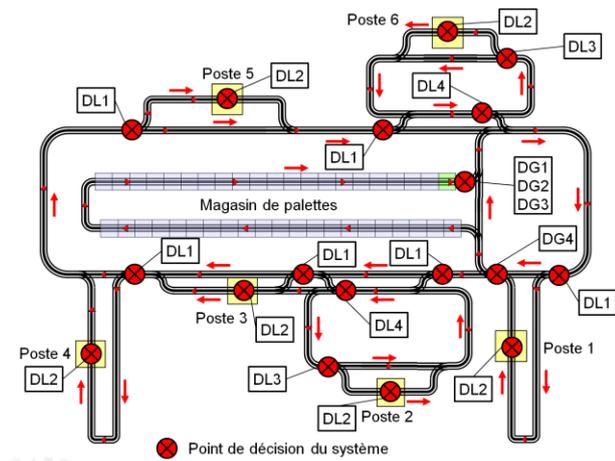


Figure 5. La ligne d'assemblage, avec les points de décision

Ce système de type job shop avec transferts automatisés est composé de six postes de travail, chacun des postes étant un agent indépendant, doté de sa propre intelligence. Les produits sont transportés par 40 palettes se déplaçant sur des convoyeurs unidirectionnels.

Un magasin de palettes (composé d'un convoyeur à accumulation) permet le stockage des palettes inutilisées. Lors du lancement d'un nouvel ordre de fabrication (OF), les palettes quittent le magasin et visitent un ensemble de postes permettant de réaliser la suite des opérations nécessaires à la réalisation du produit chargé lors de la première opération. Pour un même type de produit, cet enchaînement de postes peut être variable, d'une part parce que plusieurs postes peuvent réaliser la même opération, et d'autre part parce chaque opération peut éventuellement donner lieu à des opérations de retouche additionnelles. Une fois ce produit réalisé et déchargé de la palette lors de la dernière opération, celle-ci peut soit retourner au magasin de palettes si la production qui lui a été assignée est terminée, soit reprendre la fabrication d'un nouveau produit.

Le pilotage fait largement appel au concept de pilotage par le produit. En effet, lors de la sortie d'une palette du magasin, les données concernant la palette sont inscrites sur l'étiquette électronique installée sur celle-ci : nombre de produits à réaliser, gamme de chaque produit en termes d'opérations, etc. Parallèlement, à chaque poste de travail est associée une liste d'opérations réalisables sur le poste. Quand une palette se déplaçant sur la boucle centrale arrive à l'entrée d'un poste, la commande compare la prochaine opération à réaliser dans la gamme du produit transporté et la liste d'opérations réalisables sur le poste. Selon la règle choisie (par exemple si l'opération est dans la liste et que le stock tampon du poste n'est pas plein), la commande locale décide si la palette entre ou non dans le poste.

Ainsi, c'est l'objet (Palette+Produit) qui provoque les décisions le concernant durant son évolution sur la chaîne. On ne décide pas au préalable quel poste réalisera une opération, ni quand cette opération sera

réalisée. C'est le cheminement de la palette sur la ligne qui induira ces décisions.

Lors du lancement d'un OF, l'agent « magasin » doit prendre trois décisions :

- DG1 : A quelle date sera lancé l'OF ?
- DG2 : Combien de palettes seront affectées à l'OF ?
- DG3 : Quelle priorité sera donnée à l'OF ?

Cet agent a de plus une décision à prendre en cours de production :

- DG4 : La palette se trouvant à l'entrée du magasin doit-elle y revenir ou doit-elle rester sur la boucle centrale ?

Lors du cheminement de la palette, les agents « poste » devront eux même prendre deux décisions :

- DL1 : Le poste doit-il prendre la palette qui se présente à l'entrée ?
- DL2 : En fin d'opération, le produit doit-il passer à l'opération suivante ou doit-il subir une opération additionnelle de retouche ?

Les stocks tampons des postes 1,3,4, et 5 ont une gestion qui est nécessairement en FIFO. Par contre, les stocks des postes 2 et 6 peuvent avoir une règle de gestion quelconque. Ainsi, ces derniers devront prendre deux décisions supplémentaires :

- DL3 : Le poste doit-il faire entrer dans la zone de travail la palette qui se présente ou doit-il la laisser dans le stock tampon ?
- DL4 : La palette se trouvant dans le stock tampon doit-elle y rester ou aller vers la boucle centrale.

5.2. La simulation en ligne

Comme nous l'avons vu, ce type de fonctionnement permet une approche distribuée de la commande, puisque toutes les décisions prises après que les palettes aient quitté le magasin le sont d'un point de vue purement local. Bien sûr, toutes les décisions décrites ci-dessus ne font pas appel à une aide par la simulation en ligne. Nous proposons deux exemples où nous avons appliqué de principe d'aide à la décision. La première décision que nous présentons est la décision DG2. Cette décision est prise par un opérateur humain : le pilote de la ligne. Il doit, lors du lancement d'un nouvel OF au niveau du MES, définir le nombre de palettes qui seront affectées à cet OF. Ce nombre détermine combien de produits chaque palette devra transporter, c'est-à-dire le nombre de fois que la gamme du produit devra être exécutée séquentiellement par la palette. Ceci aura donc une grande influence sur la durée de production totale de l'ordre. Par exemple, pour produire 40 produits, la question est de savoir s'il est plus pertinent d'allouer 1, 20 ou même 40 palettes à l'ordre? Un nombre faible tend à augmenter la durée de production de l'ordre considéré, mais a une faible influence sur les autres ordres en cours sur le système, tandis qu'un nombre élevé permet d'augmenter la parallélisation des opérations, mais tend à surcharger le système, d'autant que le nombre total de palettes sur le système est limité (42).

Le but de la simulation en ligne est de prévoir, compte tenu des choix du pilote et de la production en cours, quel seront les dates de fin des OFs en cours et de celui que le pilote cherche à lancer. La connaissance de ces dates de fin d'OF permettra au pilote de faire les meilleurs choix.

L'outil est contrôlé via l'écran de supervision du MES. En effet, il est sensé être utilisé par des non-spécialistes de simulation, et un effort particulier doit donc être apporté à l'interface homme-machine. Notre application est relativement simple d'accès. Chaque fois qu'un opérateur clique sur le bouton « Simulation », les données représentant les dates de fin estimées de chaque ordre sont mises à jour avec les nouveaux résultats de simulation. Les ordres concernés peuvent être soit en cours, soit prêts à être lancés. Cette dernière caractéristique permet à l'opérateur d'évaluer la pertinence de la paramétrisation de ces ordres avant le lancement.

Derrière l'écran, après que l'opérateur ait cliqué, le modèle de simulation (simulateur) commence à collecter toutes les informations nécessaires à cette simulation, notamment la table des ordres de fabrication ou les paramètres des postes de travail par exemple. Ces données sont situées dans la base de données du MES. D'un autre côté, il demande à l'observateur une copie de son état actuel. L'observateur le lui transmet alors sous forme de fichiers texte formatés. À ce moment-là, le simulateur commence la simulation par s'initialiser sur cet état. Lorsque cette simulation se termine, les résultats sont inscrits dans la base de données, puis un acquittement est envoyé au MES. Celui-ci se charge ensuite de les afficher sur l'écran de supervision. Dans notre application, pour des ordres de fabrication ayant une durée d'environ une heure, les résultats sont affichés moins de cinq secondes après que l'opérateur ait cliqué sur le bouton « Simulation ».

Une deuxième décision fait appel à la simulation en ligne : La décision DL3. Comme nous l'avons vu, cette décision concerne les postes 2 et 6, possédant un stock à accès quelconque, formé d'une boucle. Il s'agit en fait de savoir quel sera l'ordre de traitement des produits se trouvant dans le stock tampon.

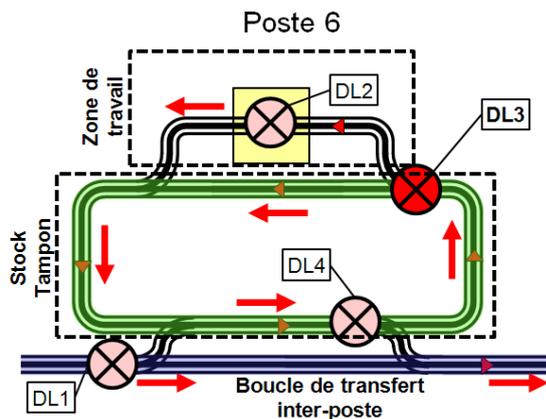


Figure 6. Implantation des postes 2 et 6

De nombreuses règles de gestion dynamique du stock tampon peuvent servir de base à la décision DL3. La plupart de ces règles cherchent le meilleur candidat parmi les produits en attente dans le stock, par rapport à un objectif donné, pour sortir du stock et être traité par la machine. Le problème est que ce stock évolue dynamiquement au cours du temps. Il n'est donc pas sûr que le choix réalisé à l'instant t , prenant en compte le stock à l'instant t , se révèle être la meilleure solution au final. L'idée est donc de lancer une simulation en ligne sur un horizon H pour vérifier la validité de la décision sur cet horizon. Dans (Cardin et Castagna, 2006a et b), nous décrivons l'utilisation de la règle dynamique « Clear a fraction » appliquée à la décision DL3. Il est intéressant de noter que cette décision se fait sans intervention humaine : la simulation en ligne est directement utilisée par le système de commande automatisée.

5.3. L'observateur QUEST

Dans cette partie, nous analyserons la faisabilité d'une telle application à l'aide de QUEST en introduisant les aspects qui sont absents de cet outil mais indispensables à la réalisation d'un observateur. Nous commencerons par aborder les problèmes de communication entre QUEST et le système piloté puis nous étudierons les problèmes de recalage spatiaux et temporels du simulateur.

Le premier point important dans la réalisation d'un observateur est la communication entre le système piloté d'une part et le modèle de simulation d'autre part. Cette communication devra se faire, si possible, de manière synchrone afin d'éviter des dispersions d'observations dues aux temps de communication. Dans le cas d'une communication asynchrone, il faudra veiller à minimiser le temps de scrutation et sa dispersion.

QUEST dispose de deux canaux de communication synchrones : les pipes et les sockets TCP/IP. Les pipes étant peu utilisés sous MS/Windows, nous utiliserons des sockets pour communiquer avec le système piloté. De l'autre côté, la communication avec les API (automates programmables industriels) se fera à l'aide d'OPC (Ole for Process Control) qui fournit une interface de communication uniformisée indépendante du système piloté (Figure 7). La traduction des informations issues d'OPC vers un flux TCP/IP compréhensible par QUEST se fera à l'aide d'un logiciel de routage intervenant au niveau de la couche application du modèle OSI, ou proxy.

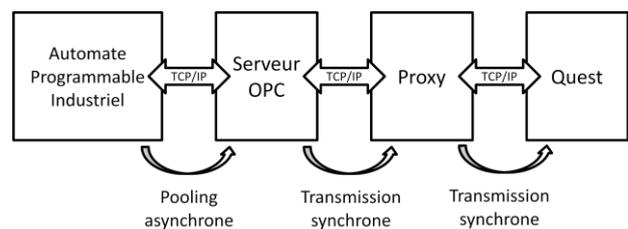


Figure 7. Chaîne de communication Observateur/système contrôlé

Cette chaîne de communication introduit des retards entre le système étudié et l'observateur. L'analyse de ce retard proposée dans (Chové, 2007) met en évidence que la scrutation asynchrone d'OPC est la source principale du temps de transfert constant et variable de l'information. Il est possible d'augmenter la fréquence de scrutation afin de réduire ce retard. La valeur minimale des retards est trouvée pour une période de 20 ms (il n'est pas possible de diminuer plus cette période). On trouve alors un retard constant d'environ 100 millisecondes avec un écart type de 10 millisecondes (valeurs relevées sur 1000 mesures).

Le deuxième problème que nous proposons d'étudier ici est le calage temporel du système étudié et de son observateur sous QUEST. Celui-ci, contrairement à ARENA RT ou à d'autres outils de simulation, ne dispose pas en interne de module temps réel. Il n'a d'ailleurs pas la connaissance de l'heure universelle. Nous allons présenter une méthode permettant de recalibrer l'écoulement du temps de QUEST sur l'écoulement du temps universel. Ce recalage aura pour effet de synchroniser les vitesses des horloges du système étudié et de QUEST.

Nous proposons ici d'ajouter un élément fictif dans QUEST (Figure 8). Cet élément sera contrôlé par une logique qui, d'une part, se connectera à un serveur de temps disposant d'une horloge calée sur le système étudié et, d'autre part, contrôlera l'évolution du temps dans QUEST.

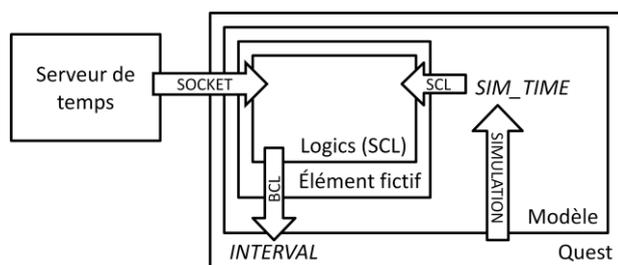


Figure 8. Mécanisme de gestion de temps

On crée ainsi un asservissement du temps de QUEST en utilisant le serveur de temps comme consigne. Ce système met à jour, à intervalle régulier, la vitesse d'écoulement du temps de QUEST, en comparant les écoulements de l'horloge universelle (serveur de temps) et de l'horloge de simulation (sim_time).

A ce stade de l'étude, nous avons un modèle de simulation capable de recevoir les événements du système étudié et dont l'horloge est calée sur l'horloge de ce même système. Il ne reste plus qu'à étudier les problèmes de recalage spatial des éléments mouvants dans le modèle de simulation.

Le problème de recalage spatial est intimement lié au choix des éléments de modélisation. Dans le cas de la modélisation de la ligne flexible présentée plus tôt, et dans le but de pouvoir recalibrer les transporteurs sur leur circuit, nous optons pour la modélisation du circuit à l'aide de convoyeurs et la modélisation des transporteurs

par des « parts » qui représentent les produits sous QUEST.

Le problème du recalage spatial peut se subdiviser en deux problèmes. Le premier concerne un retard du système étudié par rapport au simulateur. Dans ce cas les transporteurs devront être stoppés au point de recalage (capteur, lecteur...) jusqu'à ce que l'événement arrive dans le système piloté. Ce blocage peut être fait sous QUEST à l'aide d'un point de décision qui attendra les événements du système piloté et ne fera passer les transporteurs qu'à partir du moment où il aura reçu l'événement.

Le deuxième problème apparaît lorsque l'observateur est en retard par rapport au système piloté (Figure 9). Le point de décision dual du point de contrôle ne pourra pas laisser passer le transporteur puisqu'il n'est pas encore arrivé. Son rôle va être ici d'aller chercher le transporteur, après l'avoir identifié, là où il se trouve. Cette manipulation nécessite de marquer le transporteur correspondant avec une étiquette indiquant le point où elle doit se rendre. Il faudra ensuite attendre que le transporteur puisse être routé. Le routage ne pouvant se faire que dans des éléments, il faudra ajouter, tout au long du convoyeur, des points de routage (ou point d'extraction). Ces points seront tous connectés à un stock tampon qui routera les palettes marquées vers leur destination.

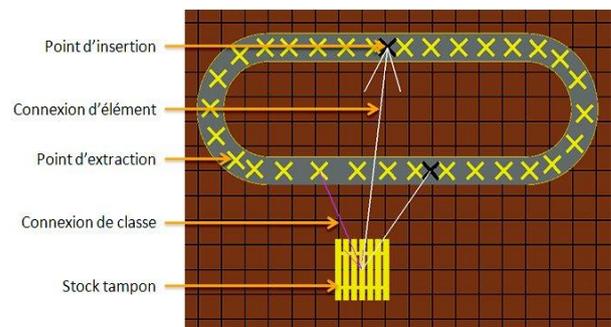


Figure 9. Routage des palettes en retard

Lorsqu'un transporteur sera vu à un point de contrôle du système piloté, l'information remontera jusqu'à l'observateur. Le transporteur simulé sera alors marqué, extrait du convoyeur et réintroduit là où il a été vu dans le système piloté.

Les problèmes présentés ci-dessus permettent de mettre en œuvre des aspects délicats de coopération entre l'outil de simulation QUEST et un système piloté afin de reproduire dans le simulateur tous les événements étudiés. Cette application permet ainsi à chaque instant d'extraire une approximation de l'état actuel du système.

5.4. Précision de l'architecture

Les prises de décisions s'appuyant sur les résultats de notre simulation en ligne, il est important de s'interroger sur la justesse des prévisions.

De ce fait, nous avons essayé d'identifier les causes principales d'incertitudes de notre architecture. Tout d'abord, il est nécessaire de préciser que le modèle de simulation ne peut pas être une image exacte du réel. En effet, des hypothèses sont forcément faites qui font le modèle diverger de la réalité : arrondi sur une accélération, sur une longueur, un temps, etc. Une partie de l'erreur des prévisions sera donc imputée à ce manque de précision inhérent à la modélisation elle-même.

Ensuite, l'état retenu comme étant l'état initial des simulations ne peut pas être l'état actuel exact du système réel.

Une première raison à cela est que l'acquisition de données n'est pas immédiate. Il existe un écart entre l'occurrence d'un événement sur le système réel et sa détection par l'observateur. Nous avons montré dans (Chové, 2007) qu'il existe un retard de l'ordre de 150 ms entre l'occurrence d'un événement et sa perception par notre observateur.

Rapporté à la dynamique du système, ce retard implique déjà une imprécision de 3 cm environ sur la position des palettes en mouvement.

Une seconde raison est l'inexactitude de la modélisation du système dans l'observateur, qui fait que les prévisions de comportement ne sont pas fidèles à la réalité. L'ensemble de ces deux raisons nous implique une erreur de justesse moyenne mesurée à environ 500ms, ce qui représente une distance parcourue par les palettes d'environ 10cm.

Le problème que nous avons rencontré pour évaluer l'incertitude globale est qu'une légère inexactitude sur l'état initial du simulateur peut avoir de grandes répercussions sur le comportement global du système. De manière à éviter ces effets de bord, nous avons choisi de lancer un test complet sur les prévisions de la date de fin de production d'un ordre lancé sur notre système. Pour ce faire, nous avons lancé un ordre de fabrication sur la ligne, puis nous avons estimé par simulation, à intervalle régulier (toutes les 3 secondes), la date de fin de l'ordre. Nous avons ensuite comparé chaque date simulée à la date de fin réellement obtenue. Ce test a été réalisé sur plusieurs ordres, représentant différentes charges de la ligne. La charge du système est simplement considérée ici comme étant le nombre de palettes utilisées par la production. Une charge de 100% correspond donc à une utilisation des 42 palettes de la ligne et une charge de 50% à 21 palettes.

La figure 10 représente l'évolution de l'erreur commise en fonction du taux d'avancement de la production. En effet, toutes les productions ayant une charge différente, les durées de production totales des ordres ne sont pas les mêmes. Nous avons donc adimensionné les durées en un taux d'avancement pour permettre une comparaison entre les différentes charges. Enfin, l'erreur exprimée ici représente la valeur absolue de l'écart entre la durée de production réelle et la durée de production simulée rapportée à la durée réelle. L'ensemble des points obtenus

par la méthode décrite précédemment n'est pas représenté sur la figure : seules les courbes de tendance obtenues sont représentées par souci de lisibilité.

La première remarque à faire sur ces courbes est l'allure globale similaire de l'ensemble des courbes de tendance. Toutes commencent par augmenter pendant une durée que nous avons vérifiée correspondre à la durée de chargement de la ligne, c'est-à-dire la durée nécessaire à toutes les palettes impliquées pour sortir du magasin. Cette hausse de l'erreur indique une imprécision de modélisation de la sortie du magasin dans le simulateur.

L'erreur tend ensuite à diminuer régulièrement au fur et à mesure que le taux d'avancement augmente. Ceci s'explique par la diminution de l'horizon simulé. Dans ce type de simulation, les erreurs ont un caractère additif. L'horizon diminuant, la durée de simulation est inférieure, et moins d'erreurs peuvent être commises. L'ensemble des courbes suivent la même trajectoire car la fin de production de chaque ordre se ressemble sensiblement, les prévisions sont donc globalement les mêmes. Un écart significatif serait apparu si les durées de production étaient plus dispersées qu'ici, où elles s'étendent de 500 à 1000 secondes.

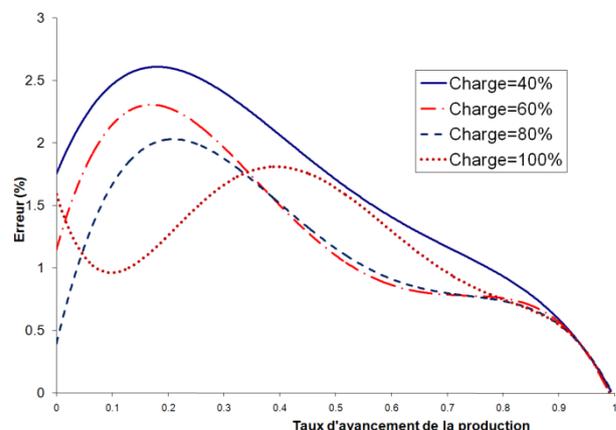


Figure 10. Justesse des prévisions

L'évaluation de l'erreur réalisée sur cet exemple nous indique donc une précision d'environ 3% dans le cas général. Cette erreur est le résultat des délais dus aux communications et des erreurs de justesse des différents modèles (observateur et simulateur). Au vu des résultats obtenus sur les mesures de temps de réponse par OPC, négligeables par rapport aux durées mises en jeu dans ce cas (3% correspond à environ 20 secondes), ce sont les erreurs de justesse qui sont largement prépondérantes dans l'erreur finale. Or, cette justesse est l'élément sur lequel il est possible d'influer, par une modélisation toujours plus fine et précise du système considéré. Nous pensons donc que les résultats chiffrés évoqués ici doivent être considérés avec la plus grande prudence puisqu'ils dépendent grandement du temps passé à la modélisation du simulateur et de l'observateur. De plus, il semble tout-à-fait possible de diminuer l'erreur obtenue si la décision associée à la mise en œuvre de la simulation ne tolère pas une si grande incertitude.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le but de ce papier était de présenter comment la simulation pouvait devenir un outil important d'aide au pilotage des systèmes contrôlés par le produit. Cet outil est destiné à aider chacun des centres de décision locaux à prendre des décisions concernant le comportement global du système de production. De ce fait, ce papier est à la fois destiné à présenter un outil d'aide à la vision, permettant au pilote d'avoir une vue globale sur l'état du système à tout instant, et sur un outil d'aide à la prévision, lui permettant de prévoir les conséquences des alternatives qu'il a formulées sur le comportement futur du système.

Cet outil est basé sur le principe novateur d'observateur par simulation pour la partie Vision et sur un simulateur plus classique pour la partie Prévision. L'observateur a la particularité d'être également utilisé dans la phase de Prévision pour fournir son état initial au simulateur, reflétant aussi précisément que possible l'état actuel du système. Réaliser l'observateur par simulation permet également d'utiliser les possibilités puissantes de la simulation pour modéliser le système et rendre l'observateur performant.

Nous avons utilisé la simulation de flux comme outil d'aide à la décision, mais l'état complet du système fourni par l'observateur pourrait être utilisé par d'autres outils d'aide à la décision, par exemple basés sur l'intelligence artificielle ou la recherche opérationnelle.

Notons que la notion d'observation par simulation permettra aussi d'autres applications intéressantes comme par exemple la détection de dysfonctionnement dans les unités de production. En effet, une étude statistique des recalages entre l'observateur et le système réel de production peut permettre de mettre en évidence un fonctionnement anormal de ce dernier. Des études prometteuses sont en cours sur la ligne d'assemblage décrite dans le chapitre 5.

À l'heure actuelle, nos travaux sont particulièrement centrés sur la phase de production de la « supply chain ». Les directions futures de ces travaux étendront les concepts présentés ici à l'ensemble de la « supply chain », de manière à être capable de prévoir plus précisément les conséquences des décisions du pilote sur l'ensemble de la chaîne.

REFERENCES

Cardin, O. and P. Castagna (2006a). Handling uncertainty in production activity control. In: *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2006*, Saint-Etienne, France, 579-584.

Cardin, O. and P. Castagna (2006b). Utilisation de la simulation proactive: une aide au pilotage des systèmes de production. In: *Proceedings of the 6e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM'06*. Rabat, Maroc.

Cardin, O. (2007). Contribution de la simulation online dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production. Application à un système flexible de production. Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes.

Cea, A., and E. Bajic (2004). Ambient Services for Smart Objects in the Supply Chain Based on RFID and UPnP Technology. In: *Proceedings of the Third Conference on Management and Control of Production and Logistics MCPL'04*. Santiago de Chile.

Chové, E. (2007). *Observateur par simulation sous QUEST*, Thèse de Master, Université de Nantes.

Davis, W. J. (1998). Online simulation: Need and evolving research requirements. In: *Handbook of simulation* (J. Banks (Ed)), 465-516, John Wiley and Sons, New-York.

McFarlane, D., J. Carr, M. Harrison and A. McDonald (2002). Auto-ID's three R's: Rules and Recipes for product Requirements. *Auto-ID Centre White Paper*

McFarlane, D., Sarma S., Ashton K., Chirn JL, Wong C.Y. (2003) Auto ID systems and intelligent manufacturing control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16, 365-376.

Hoc, Jean-Michel. Supervision et contrôle de processus, la cognition en situation dynamique. Presses Universitaires de Grenoble, 1996.

Pétin, J.-F., D. Gouyon, and G. Morel (2007). Supervisory synthesis for product-driven automation and its application to a flexible assembly cell. *Control Engineering Practice*, 15(5), 595-614.

Proth, J.M. (2006). Scheduling: New Trends in Industrial Environment.. In: *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2006*, Saint-Etienne, France, 41-47.

Rasmussen, Jens. «Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models.» *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics* Vol. SMC-13, n° 3 [1983]: pp. 257-266.

Rogers, P. And M. T. Flanagan (1991). On-line simulation for real-time scheduling of manufacturing systems. *Industrial Engineering*, 23, 37-40.

Trentesaux, D. (2002). *Pilotage hétérarchique des systèmes de production*, HDR Thesis. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.