



Utilisation de la simulation proactive: une aide au pilotage des systèmes de production

Olivier Cardin, Pierre Castagna

► To cite this version:

Olivier Cardin, Pierre Castagna. Utilisation de la simulation proactive: une aide au pilotage des systèmes de production. 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, 2006, Rabat, Maroc. pp.CDROM, 2006. <hal-00620873>

HAL Id: hal-00620873

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00620873>

Submitted on 8 Sep 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UTILISATION DE LA SIMULATION PROACTIVE : UNE AIDE AU PILOTAGE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

O. CARDIN, P. CASTAGNA

Institut de Recherches en Communication et Cybernétique de Nantes
1, rue de la Noë
44321, Nantes FRANCE
Olivier.Cardin@ircsyn.ec-nantes.fr, Pierre.Castagna@univ-nantes.fr

RESUME : *La simulation est un outil puissant utilisé depuis longtemps comme aide à la conception des systèmes de production. La simulation proactive est une nouvelle approche qui permet une aide précieuse à la conduite de ces systèmes. Dans cet article, nous présentons une architecture de commande permettant l'utilisation de cet outil, ce qui permet d'explicitier les obstacles restant à surmonter avant un développement optimal.*

MOTS-CLES : *Simulation Temps-Réel, Simulation Proactive, Observateur, Recalage.*

1. INTRODUCTION

Face à des marchés concurrentiels où les coûts de main d'œuvre représentent à eux seuls une part importante des coûts de production, beaucoup d'industries cherchent à améliorer leur productivité. A ce titre, la flexibilité du système de production peut constituer un avantage décisif. La flexibilité passe par la recherche d'une plus grande réactivité, d'une part pour s'adapter à une variété de produits toujours plus grande et d'autre part pour prendre en compte de façon efficace les nombreux aléas pouvant intervenir.

Le garant sur le terrain de cette réactivité est le pilote de la ligne. (Castagna *et al.*, 2001) ont montré à quel point la simulation, couplée à d'autres applications (ERP, MES, etc.) pouvait être un puissant outil d'aide au pilotage des systèmes de production, et non plus seulement un outil d'aide à la conception (Ait Hssain, 2000).

La possibilité de tester plusieurs scénarios alternatifs avant le lancement d'une production était déjà utilisée (Law et Kelton, 1982), mais depuis peu, les utilisations de la simulation s'orientent vers la création d'un véritable *atelier virtuel*, fidèle représentation de l'évolution de l'atelier en temps réel. Cet atelier sert à donner une meilleure visibilité de l'atelier au pilote pour lui permettre de prendre des décisions plus facilement. En effet, la conduite d'un système de production complexe nécessite de nombreuses décisions, souvent prises dans un contexte flou et sans réelle prise de conscience de l'impact qu'elles auront sur l'évolution future du système. Notons que cette approche est aussi devenue possible avec le développement du concept de simulation répartie, permettant une simulation exécutée en parallèle sur plusieurs ordinateurs (Verbraeck, 2004). Les travaux sur la norme HLA sont significatifs de cette évolution (Petty, 2002).

Nous nous focalisons dans cet article sur l'approfondissement de cette notion d'*atelier virtuel* en proposant une nouvelle application de la simulation dans la prise de décision du pilote de production. En effet, outre donner une vue plus complète du système de production, une application de simulation proactive permettra de simuler le comportement futur du système. Nous présenterons tout d'abord la problématique du pilotage d'un système de production. Puis, nous présentons les concepts de simulation proactive et d'observateur par la simulation temps réel dans les sections 3 et 4. Nous présentons ensuite dans la section 5 une ligne d'assemblage sur laquelle nous avons appliqué ces concepts. La section 6 est consacrée à un exemple de simulation proactive réalisé sur la ligne d'assemblage. Enfin, nous concluons.

2. PROBLEMATIQUE DU PILOTAGE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION

2.1. Architecture de contrôle/commande du système de production

Un système de production est classiquement décomposé en trois sous-systèmes (Le Moigne, 1990) (Lenclud, 1993) :

- Un sous-système opérant
- Un sous-système d'information
- Un sous-système de décision.

Une telle décomposition s'avère être une base solide pour commencer à construire une architecture de commande.

Le sous-système opérant comprend bien sûr le système physique mais il intègre aussi la commande de bas niveau, souvent réalisée par un ensemble d'automates.

Le sous-système d'information est la plupart du temps construit autour d'une base de données.

Le sous-système de décision est aujourd'hui souvent constitué d'une couche logicielle appelée Manufacturing Execution System (MES). Par l'utilisation d'informations à jour et précises, le MES, guide, initie, réagit aux activités de l'atelier au fur et à mesure de leur déroulement, et fournit des rapports sur ces activités.

Notons que le MES ne se substitue pas au système informatique d'entreprise (SIE) qui regroupe des fonctions de gestion de l'entreprise (comptabilité, logistique, GPAO etc.) Le MES vient compléter le SIE en assurant des fonctions de contrôle/commande (SCC) qui permettent le pilotage en temps réel des ateliers de fabrication. Il ne faut pas oublier d'intégrer au système de décision le pilote du système de production. C'est souvent lui qui prend les décisions de conduite, à partir des indications fournies par le MES.

2.2. Problématique de la prise de décisions

Les systèmes de production sont de plus en plus complexes et on demande à ces systèmes des performances toujours plus élevées. Il faut donc que le système de décision soit de plus en plus performant. Pour cela, deux conditions sont indispensables. Le système de décision doit tout d'abord posséder des informations fiables, complètes, très souvent mises à jour, le renseignant sur l'état exact du système. Ces informations ne sont pas toujours disponibles à l'instant de la prise de décision. On doit alors faire appel à un OBSERVATEUR qui reconstituera, à partir des informations partielles connues sur le système, l'ensemble des données nécessaires à la prise de décision. Le système de décision doit ensuite être capable d'évaluer les conséquences correspondant aux différentes options qui s'offrent à lui. Pour cela il doit disposer de MODELES DE PREVISION. Ces modèles de prévision doivent à la fois être fidèles, c'est-à-dire que leurs prévisions doivent être précises et bien correspondre au comportement du système, et ils doivent être rapides. En effet, devant une situation donnée, le système de décision ne dispose en général que de peu de temps pour faire son choix. La complexité des systèmes de production fait que souvent, aucun modèle analytique satisfaisant n'existe. Nous proposons alors d'utiliser la simulation informatique comme outil de prévision.

3. LA SIMULATION PROACTIVE

3.1. De la simulation informatique à la simulation proactive

La simulation de flux est devenue aujourd'hui un outil très répandu pour l'étude des systèmes de production complexes. Elle consiste à créer un modèle de comportement. Ensuite, un ordinateur va permettre de reconstituer la suite ordonnée de tous les événements faisant évoluer l'état de ce modèle. Si le comportement du modèle représente bien le comportement du système étudié, alors l'analyse de cette suite ordonnée

d'événements, permettra de faire des prévisions sur le futur comportement du système de production.

La simulation a longtemps été cantonnée à la phase de conception ou de re-conception du système de production. Nous avons proposé dans (Castagna *et al.*, 2001) d'étendre l'utilisation de la simulation pour en faire un outil d'aide à la décision, en prenant comme exemple le pilotage d'une unité de production pour l'industrie aéronautique.

(Pujo *et al.*, 2004) ont proposé d'utiliser la simulation pour l'aide au pilotage d'une unité organisée au moyen de KANBAN. Ils indiquent que grâce à la simulation proactive, « le responsable de production [...] va pouvoir s'appuyer sur une vue prévisionnelle simulée à partir des informations structurelles contenues dans le synoptique de son atelier, du modèle représentant la production en cours, et de l'état actuel de l'atelier ».

Cette méthodologie est composée de plusieurs scénarios prédéfinis. Ces derniers sont réalisés par l'expert en simulation – concepteur de la simulation proactive. C'est le juste emploi de ces scénarios qui garantira une performance élevée de la simulation. Le choix du scénario à utiliser est délégué au système de décision.

3.2. La simulation proactive : quelques contraintes fonctionnelles

De nombreux outils de simulation existent sur le marché. Ces outils ont été mis en place pour une utilisation lors d'une phase de conception.

Pour être utilisés dans le cadre de la simulation proactive, deux problèmes majeurs vont apparaître : la durée de la simulation et son initialisation.

3.2.1 Le problème de la durée de la simulation proactive

Il n'est pas rare que la simulation d'un système industriel demande plusieurs heures de calcul. Cela ne pose pas nécessairement de problème lors d'une étude de conception du système de production. Cette durée devient par contre rédhibitoire dans une simulation proactive. Nous avons montré précédemment que le centre de décision ne dispose souvent que de peu de temps pour prendre sa décision.

Si on note :

D_T Durée totale dont dispose le centre de décision pour faire son choix,

D_C Durée nécessaire à la collecte des informations nécessaires à la simulation

D_S Durée totale de la phase de simulation proactive nécessaire à la prise de décision,

D_D Durée de prise de décision, les résultats de la simulation étant connus,
il faudra vérifier que :

$$D_C + D_S + D_D \leq D_T$$

La durée D_S correspond bien sûr à plusieurs simulations, chacune correspondant à un scénario envisagé. Si on a un modèle déterministe et que le déroulement d'une simulation à une durée D_u alors il faudra $D_S = N D_u$ pour simuler N scénarii possibles. Si, de plus, le modèle est

stochastique et qu'il faut enchaîner M réplifications pour déterminer un intervalle de confiance sur le résultat, alors nous aurons :

$$D_S = N M D_u$$

Il faudra donc, lors de la construction du modèle, être très attentif à sa durée d'exécution. Remarquons que, fort heureusement, l'horizon de simulation nécessaire à la prise de décision est souvent relativement court.

3.2.2 Le problème de l'initialisation de la simulation proactive

La plupart des outils de simulation considèrent que le système de production est vide à l'état initial. Nous observons alors une période de chargement progressif de l'unité qu'il convient d'éliminer si elle n'est pas représentative du fonctionnement normal de l'unité. On parle alors de biais initial. Lors d'une simulation proactive, l'état initial de la simulation doit correspondre exactement à l'état du système à l'instant de la prise de décision. Il faut donc amener le modèle de simulation dans cet état initial non vide en partant d'un système vide et en suivant une trajectoire qui l'amènera dans cet état initial. Ceci peut se révéler très complexe. On peut aussi rechercher à placer directement le modèle de simulation dans cet état initial. Il est par exemple facile d'initialiser des stocks tampons à des valeurs non nulles. Le positionnement de chariots sur un circuit ou de produits sur un convoyeur peut se révéler plus délicat. Remarquons aussi que la date à laquelle doit être appliquée la décision étudiée n'est pas exactement la date de début de la simulation. Il convient en effet de prendre en compte la durée de prise de décision.

Si on note :

d_p Date à laquelle se présente le problème à résoudre.

La décision ne pourra être appliquée au système qu'à la date $d_p + D_C + D_S + D_D$. Durant la durée $D_C + D_S + D_D$ le système continuera à évoluer sans que la décision ait été mise en oeuvre.

Se pose le problème de l'évaluation de $D_C + D_S + D_D$.

Pour limiter le risque d'erreur, on pourra se donner une marge M, la décision étant appliquée à la date :

$$d_p + D_C + D_S + D_D + M$$

Evidemment, il faudra alors vérifier que :

$$D_C + D_S + D_D + M \leq D_T$$

Une fois le problème de l'initialisation du simulateur résolu, se pose encore le problème de la collecte et de la pertinence des informations nécessaires à cette initialisation.

Cette collecte doit être rapide pour limiter D_C . C'est pourquoi il faudra prévoir une communication informatique entre le simulateur et le MES.

Mais cette communication avec le MES ne suffit pas. Il est très rare que le MES connaisse à tout instant l'état complet du système physique. On observe à la fois une incertitude spatiale et temporelle.

L'état du système n'est connu qu'à des endroits particuliers du système (existence de capteurs). C'est la notion d'incertitude spatiale.

L'état du système n'est aussi connu qu'à des instants particuliers. Par exemple la position d'une palette n'est connue qu'à l'instant où celle-ci passe devant un capteur. C'est la notion d'incertitude temporelle.

Pour connaître à chaque instant l'état du système nous ferons appel à un observateur. Nous avons développé le concept d'observation par simulation temps réel.

4. OBSERVATION DU SYSTEME PAR LA SIMULATION TEMPS REEL

4.1. La simulation temps réel

Comme nous l'avons déjà vu, la simulation est souvent un outil de prédiction. Pour cela, nous cherchons à avoir un temps simulé qui s'écoule plus rapidement que le temps réel. Pour cela, la plupart des simulateurs ont aujourd'hui un moteur de fonctionnement basé sur les événements. Le simulateur construit un échéancier, qui est une liste ordonnée de tous les événements futurs pouvant être datés, classés par ordre croissant de date d'occurrence. Ensuite il exécute l'événement se trouvant en début de liste puis il recommence la construction de l'échéancier, celui-ci ayant été modifié par l'exécution de l'événement. Ce fonctionnement permet une exécution très rapide de la simulation, la date simulée allant de date d'occurrence en date d'occurrence.

Dans une simulation temps réel, le moteur de fonctionnement est très différent. Nous cherchons ici à caler l'horloge du simulateur sur celle de l'ordinateur sur lequel fonctionne la simulation.

La principale application de la simulation temps réel est le développement de modèles de simulation de systèmes physiques pour vérifier le comportement d'applications informatiques temps réel. (Cofer et Rangarajan, 2003)

Notre idée est d'utiliser un modèle de simulation temps réel comme observateur du système physique. Ce modèle de simulation va reproduire de comportement du système de production. Ainsi, l'état complet du système réel sera connu à travers l'état du simulateur temps réel.

Evidemment, il faudra s'assurer que le comportement du modèle temps réel est proche du comportement de l'unité de production. Pour cela, nous proposons de recalibrer le comportement du simulateur chaque fois qu'une information venant du MES nous renseigne sur le système réel.

4.2. Le recalage du simulateur temps réel

Le MES perçoit l'état du système physique à travers un ensemble de capteurs. Le changement d'état de chacun de ces capteurs correspond à un événement ayant fait évoluer le système physique. La connexion avec le simulateur va nous permettre de réaliser une opération de recalage du simulateur chaque fois que le MES détecte un événement.

Deux cas de figure peuvent se produire. Le premier cas correspond à une avance du simulateur par rapport au système réel. Dans ce cas, le simulateur attendra l'événement de synchronisation venant du MES. Cela

signifie que le modèle de simulation connaît chaque situation devant donner lieu à une synchronisation. Le modèle évolue jusqu'à ce qu'il se trouve dans une situation où il sait qu'une information de synchronisation doit arriver. Il se place alors localement en attente de cette information. L'évolution de cette partie du modèle ne continuera que lorsque cette information lui sera envoyée par le MES, alors que le reste du modèle continuera normalement.

Mais il peut aussi se produire le cas inverse : Le modèle de simulation étant en retard, il reçoit l'information venant du MES alors que son évolution ne l'a pas encore amené à l'événement de synchronisation. Nous proposons alors une accélération locale du temps pour amener le simulateur dans un état conforme à celui du système réel.

Prenons, pour illustrer cela, l'exemple d'un convoyeur muni de deux capteurs c_1 et c_2 , présenté dans la figure 1. Nous voyons que pour le simulateur, le colis (1) est déjà en face du capteur c_1 alors que dans la réalité, ce colis n'est pas encore arrivé en c_1 . Il y a avance du simulateur par rapport au système réel.

Le simulateur va donc bloquer le colis (1) dans cette position jusqu'à ce que le capteur c_1 détecte le colis (1).

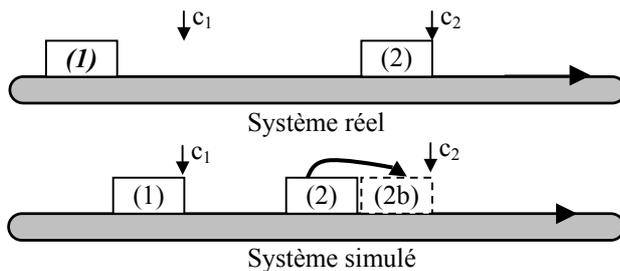


Figure 1. Exemple de recalage

Par contre, nous voyons que le colis (2) est déjà en face du capteur c_2 alors que le simulateur considère que (2) se trouve avant le capteur. Le simulateur est en retard par rapport au système réel. Le recalage va ici consister à replacer instantanément le colis (2) en position 2b.

Nous voyons qu'ainsi, chaque fois que le système est connu par le MES, le simulateur se recalcule sur le système réel. Par contre, entre les deux capteurs c_1 et c_2 la position des colis est inconnue du MES. On utilisera alors le simulateur pour connaître la position des colis.

Ainsi, notre système d'aide à la décision est constitué de deux simulateurs. Le simulateur temps réel nous sert d'observateur pour connaître l'état du système réel et le simulateur proactif nous permet une aide à la décision en faisant une prévision du comportement futur.

Notons que la présence de deux simulations imbriquées nous place dans le concept de simulation réflexive développée par Berruet *et al.* dans (Berruet *et al.*, 2004) Les concepts de simulation proactive et d'observateur par simulation temps réel ont été mis en application sur une ligne d'assemblage. Nous nous proposons ensuite de décrire cette application.

5. UN EXEMPLE D'APPLICATION : UNE LIGNE D'ASSEMBLAGE

5.1. Le système physique

La ligne d'assemblage a été mise en place en septembre 2005 au département Qualité, Logistique Industrielle et Organisation de l'IUT de Nantes. Cette installation a, d'une part, un but pédagogique et d'autre part une vocation à être une plateforme permettant des recherches sur les systèmes de production.

Cette ligne de type Job Shop est constituée de six postes de travail et d'un magasin de 42 palettes (figure 3). Ces palettes, équipées d'une étiquette électronique (figure 2), sont utilisées pour transporter les produits sur la boucle centrale.

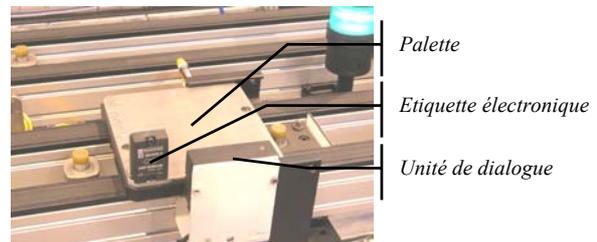


Figure 2. Palette équipée de son étiquette électronique

Chaque poste connaît la liste des opérations qu'il est capable de réaliser. Cette liste peut être modifiée à chaque instant.

Lors d'un lancement en production, la liste ordonnée des opérations à effectuer, ou gamme, est inscrite sur l'étiquette de chaque palette participant à la réalisation de l'ordre de fabrication (OF).

A chaque entrée de poste, une unité de dialogue communique à l'automate en charge du poste les données contenues dans l'étiquette. On applique alors une règle de décision permettant de déterminer si la palette doit entrer dans le poste. Dans ce cas, la palette sort de la boucle centrale pour rentrer dans le stock du poste de travail.

La règle appliquée pour savoir si la palette est admise dans le poste peut être très variée. Par exemple, le produit peut rentrer sur le poste si :

- la prochaine opération dans la gamme du produit est exécutée par le poste
- le stock d'entrée du poste n'est pas plein
- le poste n'est pas vide
- etc.

Cette règle, simple, peut aussi être complétée par des considérations autres. Par exemple si deux postes exécutent les mêmes opérations, une palette sur deux seulement entrera sur le premier.

Chaque poste comporte une zone de stockage en entrée. Si les postes 1, 3, 4 et 5 ont des règles de priorité FIFO de par leur structure, les postes 2 et 6 comportent des boucles internes qui permettent d'imaginer d'autres règles de gestion (LIFO, Clear a Fraction, etc.).

Le poste 1 est muni d'un robot cartésien permettant de placer des produits bruts issus du magasin

(stockage/déstockage gravitationnel) sur la palette, ainsi que de retirer les produits finis.

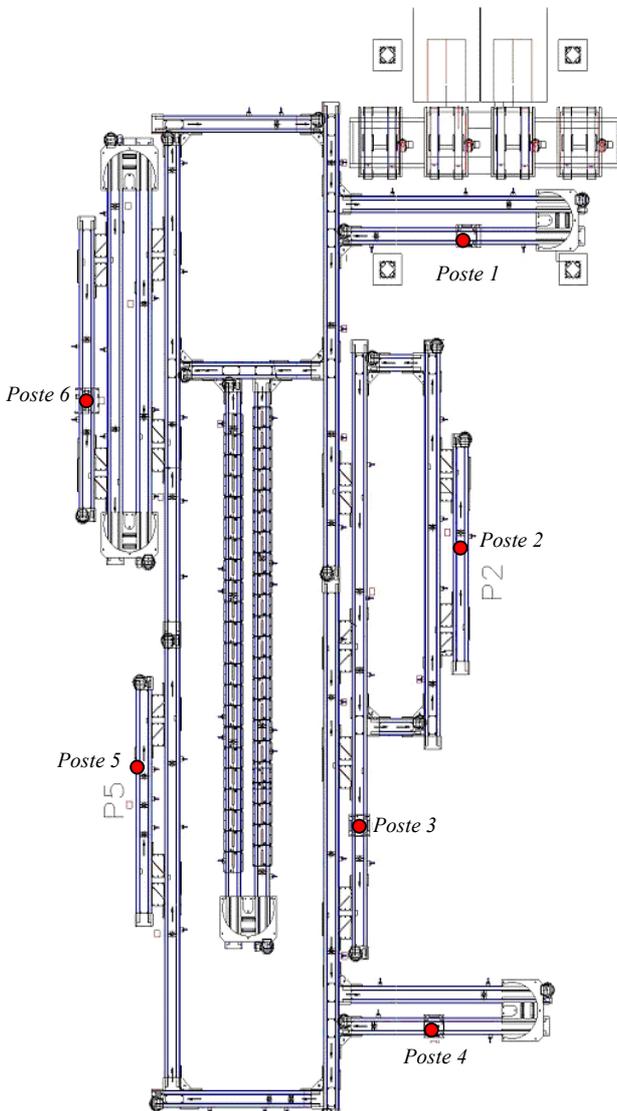


Figure 3. La ligne d'assemblage

Un déroulement classique de production pourrait être celui-ci :

1. Un ordre de fabrication est lancé par le pilote de la ligne.
2. Le nombre de palettes nécessaires sortent du magasin. L'unité de dialogue située à la sortie de celui-ci écrit toutes les informations relatives au produit et à la palette sur l'étiquette : gamme en cours, nombre de produits à faire sur la palette, état actuel de la production, etc.).
3. Les palettes se dirigent vers le poste 1. Le robot cartésien dépose un produit brut sur chaque palette.
4. L'unité de dialogue située au poste 1 met à jour les données présentes sur l'étiquette : le pointeur modélisant l'état actuel de la production indique la réalisation de cette opération.

5. La palette circule sur la boucle centrale de poste en poste à la recherche d'un poste réalisant l'opération suivante dans la gamme de fabrication.

6. Dès que la gamme de fabrication est terminée, le produit est évacué (grâce au robot du poste 1), et la palette évalue s'il lui reste des produits à effectuer. S'il en reste, le robot pose un nouveau produit brut, et l'étape 4 recommence. Dans le cas contraire, la palette rentre au magasin.

Un intérêt de ce système est que son fonctionnement nécessite un grand nombre de prises de décisions. Nous avons déjà vu la décision d'autoriser ou pas l'entrée d'une palette dans un poste. Le pilote de la ligne a lui aussi des décisions à prendre. Lorsqu'il lance un nouvel OF, il doit décider du nombre de palettes à placer sur la ligne pour réaliser son OF. Pour fabriquer 10 produits, il peut par exemple placer 10 palettes réalisant chacune un produit. Il peut aussi placer 5 palettes qui réaliseront chacune deux produits. La seconde solution pourra allonger la durée de réalisation de l'OF mais elle engorgera moins la ligne.

Le pilote peut aussi réagir à un dysfonctionnement sur la ligne en réaffectant une opération assurée par un poste en panne à un autre poste (Kouiss et Pierreval, 1999). On parle de reconfiguration de la ligne.

Il est clair que si la commande de ce système ne comporte pas de difficulté de programmation majeure, la complexité de son comportement rend les décisions souvent difficiles à prendre.

5.2. Le système de pilotage

La commande de la chaîne d'assemblage est assurée par quatre automates, tous reliés par un réseau TCP/IP. L'ensemble des relations existant entre chaque élément du système de pilotage se fait donc par Ethernet (Figure 4).

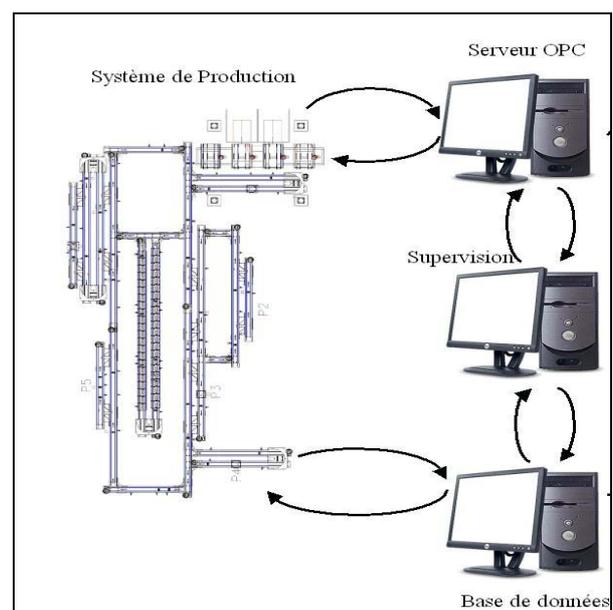


Figure 4. Les flux d'informations internes au système de pilotage

OPC (OLE for Process Control) est un standard de communication basé sur la technologie OLE/COM qui constitue un moyen unifié d'échange d'informations entre applications en environnement 32-bit.

Il offre une grande interopérabilité (lecture et écriture) entre les équipements industriels (API, capteurs, actionneurs), l'ensemble des applications de contrôle/commande/supervision et les applications bureautiques de gestion.

Il définit également des objets standards, des méthodes et des propriétés bâtis sur le concept COM (Component Object Model) pour permettre à des serveurs de données "temps réel" comme les API et les équipements de terrain de communiquer leurs données vers des applications clientes OPC.

Le serveur se charge du rafraîchissement des données, rafraîchissement pouvant s'effectuer à des périodes différentes selon les équipements et notamment selon les protocoles de communication.

Un serveur OPC a été installé et se place en intermédiaire entre l'utilitaire de supervision et les automates.

La base de données du MES est en lien direct avec le superviseur, mais communique également avec les automates. En effet, un archivage des résultats de production est effectué automatiquement (à la fin de la production de chaque ordre de fabrication par exemple). Ce lien est effectué par un module de communication Internet ajouté à un des automates. Ce module permet également une supervision de la chaîne flexible à distance via une interface html.

5.3. L'observateur par simulation temps réel.

Cette simulation se déroule sur un modèle ayant un comportement le plus proche possible du système physique. De ce fait, les vitesses (en ligne droite et en virage) sont estimées le plus fidèlement possible, et les algorithmes de choix (ordonnancement local) sont les mêmes que ceux implantés dans les automates. Toutefois, certaines différences sont encore perceptibles et difficilement modélisables, dues notamment aux aléas (aussi minimes soient-ils) qui peuvent survenir lors de la production (ralentissement excessif d'une palette dans un virage par exemple).

Le simulateur temps réel va donc permettre d'observer le système physique et d'obtenir une vue simulée complète de l'état du système à tout instant.

Pour pouvoir tourner, cette simulation a besoin des données de production stockées dans la base de données, ce qui impose un lien direct avec la base de données.

Le recalage est lui effectué par l'intermédiaire du serveur OPC. Celui-ci génère effectivement un événement à chaque fois qu'un groupe de variable change de valeur. Il suffit donc de déclarer l'ensemble des variables caractérisant la présence d'une palette devant un capteur dans ce groupe et d'attendre l'évolution de ce groupe. A l'arrivée de cet événement, le simulateur traite les informations attendantes (référence du capteur, numéro de la palette concernée etc.) tel que défini précédemment.

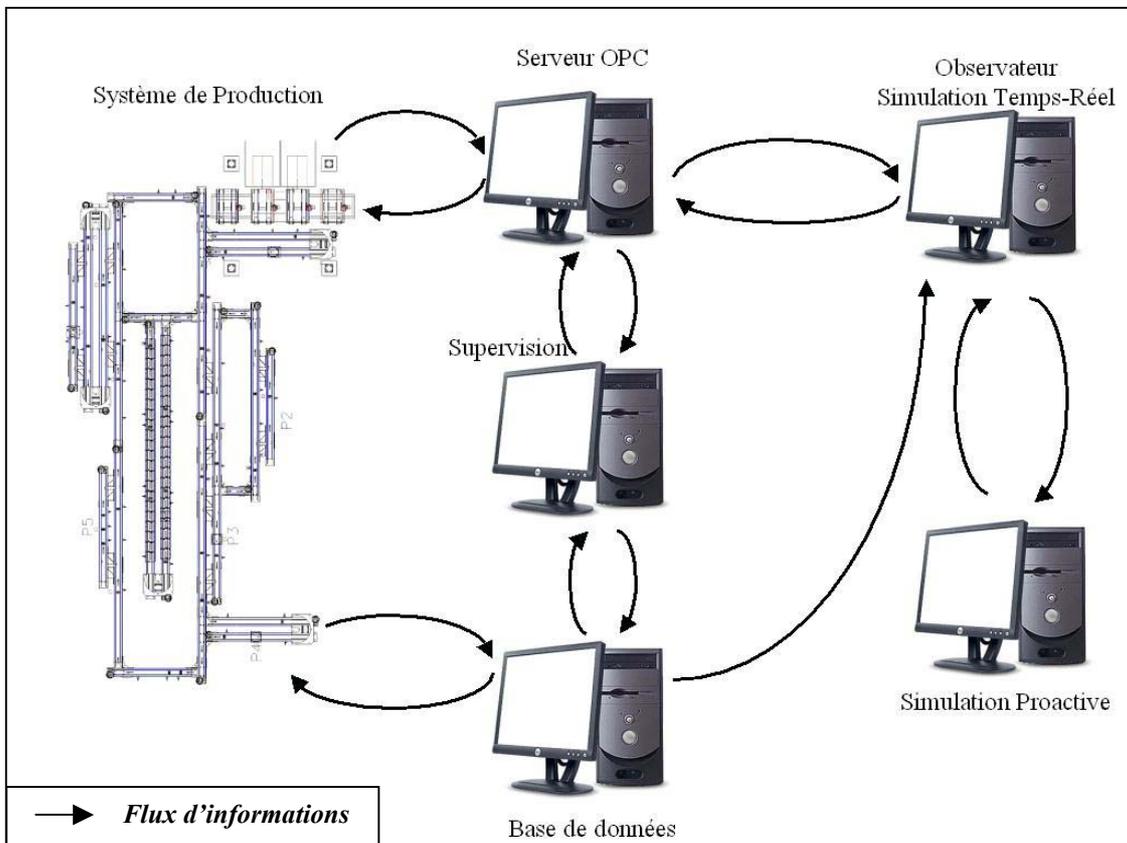


Figure 5. L'architecture complète

A partir du moment où la simulation temps réel est calée sur le système réel, la simulation proactive peut intervenir dans de bonnes conditions. A son lancement, elle copie la base de données pour récupérer les données de production actuelles, et pouvoir mettre à jour les résultats (simulés) sans influencer sur la production en cours – tout ceci dans un but d'analyse ultérieure. De plus, elle récupère l'état complet du simulateur temps réel : ce sont ces données qui vont lui permettre de déterminer l'état initial nécessaire à un déroulement fidèle à la réalité (Figure 5).

Ce simulateur s'appuie sur un modèle sensiblement identique à celui utilisé en temps réel. Toutefois, des différences conséquentes influent grandement, notamment sur la vitesse d'exécution (et donc la durée de simulation D_u).

5.4. Les modèles de simulation.

Les modèles de simulation proactive et temps réel ont été construits sous SIMAN/ARENA™ en utilisant le concept de transporteur. Chaque palette est un transporteur évoluant sur le circuit représenté à la figure 6. Les intersections , correspondant aux zones de virage, permettent de n'avoir qu'une palette à la fois dans une zone de changement de direction. Les intersections , correspondant aux zones de travail, permettent le blocage des palettes pendant la durée opératoire et celle de réglage. Les points de routage  permettent l'orientation des palettes suivant la gamme qui leur est associée et leur état d'avancement dans cette gamme. Les intersections de convergence , permettent d'éviter les collisions et les blocages entre les palettes. Les points de stockage  constituent le magasin de palettes vierges, c'est-à-dire non utilisées en production. Enfin, les autres intersections  permettent la gestion des zones de stockage de chaque poste, ces zones étant à capacité finie.

Les deux modèles diffèrent peu. En effet, la configuration générale du système doit évidemment être la même pour garantir une homogénéité des résultats. Les différences sont principalement dues aux fonctions spéciales réalisées par chacun des modèles.

Le simulateur temps réel a deux fonctions spéciales : la synchronisation avec le système de production et la copie de son état en vue de l'initialisation d'une simulation proactive.

La fonction de synchronisation est réalisée de la façon suivante : chaque fois qu'une palette passe devant une unité de dialogue, elle est identifiée. Le superviseur génère alors un événement Winsocket. A la réception du message correspondant, le simulateur synchronise l'entité commandant le transporteur « palette » : il accélère le transporteur s'il est en retard et le met en attente s'il est en avance.

La copie de l'état consiste à sauvegarder :

- 1- la valeur de toutes les variables d'état du modèle
- 2- l'état réservé ou libre de toutes les ressources du modèle

- 3- la position et les caractéristiques de toutes les entités en attente
- 4- la position exacte de tous les transporteurs.

Notons que nous utilisons pour ce simulateur la technologie ARENA RT qui permet d'utiliser comme horloge de la simulation l'horloge système de l'ordinateur.

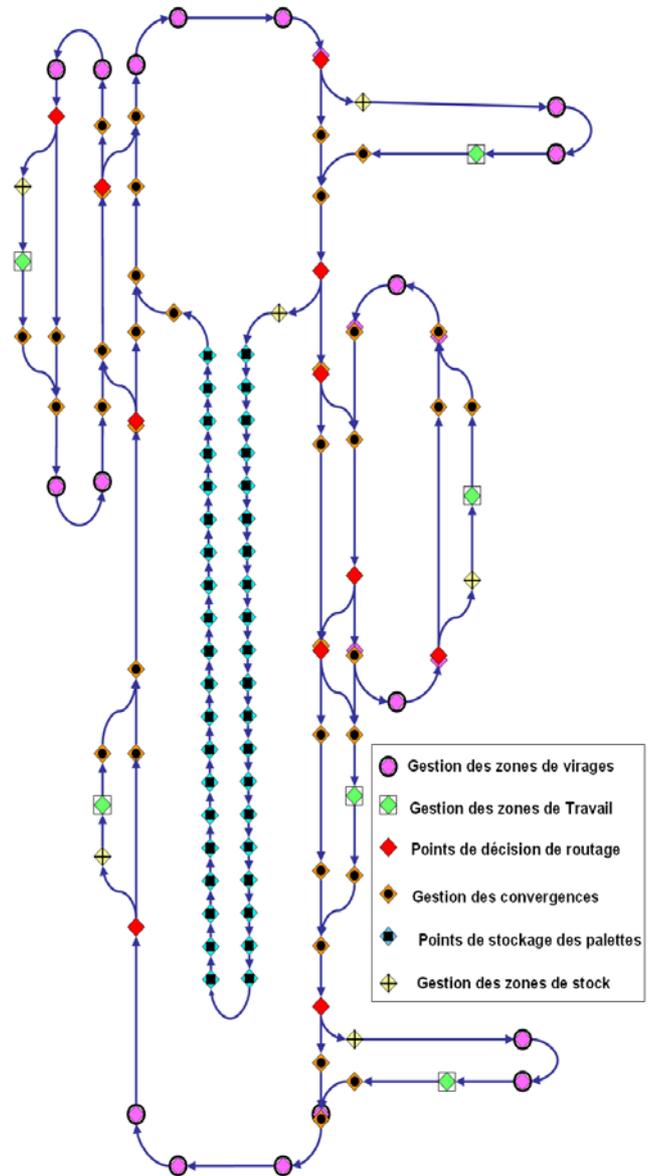


Figure 6. Modèle du circuit d'évolution des palettes

Le simulateur proactif n'a qu'une seule fonction spéciale qui est l'initialisation à un état non vide du système. L'initialisation nécessite d'effectuer, à partir de la sauvegarde de l'état du simulateur temps réel, les quatre actions suivantes :

- 1- positionner des variables à une valeur non nulle
- 2- réserver certaines ressources
- 3- placer des entités dans certaines files d'attente
- 4- positionner chaque transporteur « palette » en des points

Les trois premières ne posent aucun problème particulier. La quatrième se fait par la modification

automatique des blocs de déclaration des transporteurs, à l'intérieur même du modèle en tout début de simulation. Cette fonctionnalité est assurée principalement par un programme Visual Basic for Applications déclenché par l'occurrence d'un événement Winsocket – cette technologie est aussi utilisée pour la communication des résultats en fin de simulation. Le programme VBA étant relativement indépendant du modèle en lui-même, celui-ci est très peu modifié par rapport au modèle du simulateur temps réel.

Nous avons décrit les fonctions particulières imposées par la simulation proactive. Le reste de la modélisation est très classique. Nous avons réutilisé en grande partie un modèle de la ligne qui avait été réalisé lors de sa phase de conception.

6. UN EXEMPLE DE SIMULATION PROACTIVE.

6.1. La décision à prendre.

Comme nous l'avons vu, ce système est le siège de nombreuses prises de décision, où la simulation proactive peut être envisagée.

Elle peut tout d'abord uniquement être une aide à la décision pour le pilote de la ligne. Le rôle de la simulation proactive est alors de donner un maximum d'informations au pilote pour qu'il puisse prendre une décision efficace. Nous avons pour cela recherché à intégrer le plus possible le simulateur proactif à l'outil de supervision de la ligne. L'opérateur peut très rapidement décider de faire appel à une simulation, ses choix de paramètres étant ceux saisis dans l'outil de supervision. De même, les résultats apparaissent sur ce même outil de supervision et la décision pourra se faire avec un minimum de saisies informatiques de sa part.

Le système de décision peut à l'inverse être totalement automatisé. De ce fait, la simulation sera lancée directement par le système de commande pour répondre à une question précise. La décision sera ensuite automatiquement prise, au vu de la réponse à la question posée.

Nous proposons de décrire ici un exemple : cette approche totalement automatisée appliquée à une règle d'ordonnancement locale.

Comme nous l'avons vu, les postes 2 et 6 de la ligne comportent un stock à accès aléatoire constitué d'une boucle.

Nous nous intéressons ici à la décision prise au point de passage du stock à la zone de travail (voir figure 7). La règle de gestion du stock utilisée est la règle nommée « Clear a Fraction », décrite par (Kumar et Seidman, 1990). Nous supposons que le poste est capable de réaliser deux opérations différentes et qu'il existe un « setup time » c'est-à-dire que le passage d'une opération à l'autre nécessite un réglage ayant une durée significative.

Cette règle consiste, une fois le poste réglé pour réaliser l'opération A, à réaliser l'ensemble des opérations A en attente dans le stock. Au cas où il n'y aurait plus de job

A en attente dans le stock, on règle à nouveau le poste pour changer d'opération. Cette règle est particulièrement efficace lorsque les temps de réglage sont importants.

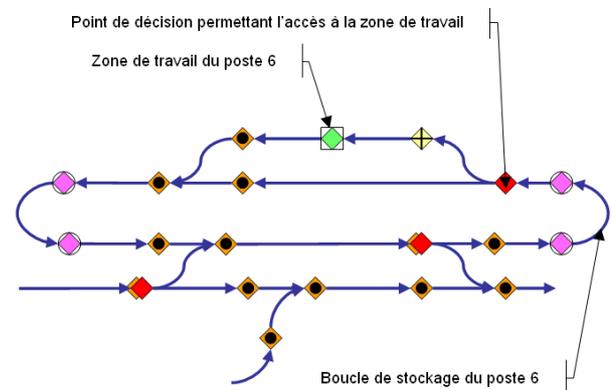


Figure 7. Structure du poste 6

La Figure 8 montre le poste 6 de notre installation en cours de production. Deux ordres de fabrication ayant deux gammes différentes ont été lancés. Pour les repérer, les palettes sont numérotées différemment (1 et 3). La prochaine opération que les palettes 1 doivent accomplir est la 10, alors que les palettes 3 doivent accomplir l'opération 30.

Le poste de travail est actuellement réglé pour l'opération 10. Le principe étant de faire passer toutes les palettes du stock interne du poste nécessitant l'opération pour laquelle le poste est réglé, le poste 6 a fini de produire toutes les palettes 1 qui étaient dans son stock jusqu'ici. N'ayant plus de palettes 1 dans le stock, le poste a donc pris la décision de faire rentrer une palette 3 dans le poste de travail. Le poste va donc être réglé pour l'opération 30, et toutes les palettes 3 vont donc être produites.

Or, à l'entrée de la boucle interne se présente une palette 1. La palette va donc entrer sur le poste, et devra attendre la fin de production de toutes les palettes 3 (sachant que des palettes supplémentaires risquent de rentrer dans l'intervalle) pour pouvoir être traitée. Lorsque son tour viendra, il faudra de nouveau régler le poste pour l'opération 10, ce qui rallonge encore le temps de production. De plus, l'OF n°1 ne se terminera que beaucoup plus tard, ce qui peut être préjudiciable.

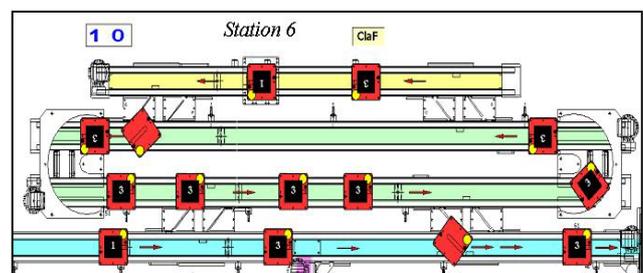


Figure 8. Le poste 6 en production

La question est donc de savoir s'il n'eut pas été plus judicieux d'attendre un peu avant de laisser la palette 3

rentrer dans le poste de travail. Ainsi, la palette 1 aurait pu être traitée avant le changement de production.

Le problème du temps de la simulation apparaît clairement ici : si l'on bloque la palette 3 trop longtemps à l'entrée du poste de travail, les effets pourraient être plus néfastes que bénéfiques à cause des phénomènes de saturation du poste.

La décision est ici forcément automatisée au vu des temps de décision extrêmement réduits. La question intéressante est de savoir si une palette 1 va rentrer dans un futur proche dans le stock interne du poste 6.

Nous proposons, lorsqu'une palette se présente au point de décision alors qu'il n'y a plus de job en attente correspondant à l'opération réglée de lancer une simulation. Le système de décision lance une sauvegarde de l'état du simulateur temps réel, qui sera stocké dans des fichiers annexes. La simulation proactive est initialisée à partir de ces fichiers. A la fin de la simulation, une réponse est envoyée au système de décision (protocole Winsocket) qui va pouvoir prendre les mesures qui s'imposent, en l'occurrence ne pas laisser la palette 3 rentrer dans le poste de travail, mais attendre la palette 1.

6.2. Quelques résultats de simulation.

Le but de cette étude est d'évaluer l'intérêt de la simulation proactive présentée précédemment. Pour cela nous n'avons pas utilisé le système réel. Nous avons remplacé ce système réel par le simulateur temps réel. Ce simulateur a été modifié, pour déclencher une simulation proactive comme décrite au paragraphe précédent.

Nous avons lancé sur cet exemple 80 ordres de fabrication de chacun 10 produits sur 5 palettes. 40 ordres devaient exécuter la gamme 1, et 40 la gamme 3. De plus, les ordres étaient alternés (une gamme 1, une gamme 3 etc.), ce qui nous permet un brassage de la population de palettes.

Nous avons, d'une part, cherché à mesurer l'intérêt de la simulation proactive dans le cas présenté, et d'autre part, nous avons étudié l'influence de l'horizon de cette simulation proactive. Cet intérêt a été mesuré à travers deux indicateurs de performance : le MAKESPAN ou le temps de production des ordres de fabrication et le nombre de réglages réalisés.

Les résultats sont consignés dans le Tableau 1.

Le temps de production reste globalement constant pour l'ensemble des essais. Ceci s'explique par l'architecture du système. En effet, par un calcul simple, on obtient un taux d'occupation du poste de travail lors de l'essai sans simulation proactive d'environ 60% (40% en travail, 20% en réglage). Le reste du temps est donc du temps de transfert des palettes. Avec l'utilisation de la simulation proactive, le nombre de réglage a constamment diminué, et donc le temps de réglage nécessaire à la production. Or, la flexibilité du système contrebalance ce gain par un accroissement du temps de transfert, ce qui donne un makespan globalement constant.

Si le gain principal de cet exemple est la diminution du nombre de réglages nécessaires, il n'en sera pas obligatoirement de même sur tout autre système. En effet, selon les caractéristiques du système de production étudié, la simulation aura des effets différents, tant sur les réglages que sur la cadence de production ou sur l'organisation du système.

	Architecture simple	Architecture avec Simulation Proactive		
		70	140	200
Horizon de simulation (secondes)	n/a	70	140	200
Temps de production (secondes)	41 686	41 388	41 239	41 294
Nombre de réglages	159	130	109	97
Nombre de simulations proactives	n/a	366	551	651

Tableau 1. Résultats de simulation

L'horizon de simulation a été ici étudié pour indiquer l'orientation future des travaux. En effet, si l'augmentation de l'horizon diminue sensiblement le nombre de réglages, il augmente également grandement le nombre de simulations nécessaires. De ce fait, le temps gagné est nuancé par le temps nécessaire à la simulation en elle-même. De plus, notre essai ne concerne qu'un seul poste de travail. Or, plusieurs types de simulations proactives peuvent être lancés à différents endroits du système : un grand nombre de simulations monopolise et donc diminue les opportunités de lancer d'autres simulations sur un poste informatique. De fait, à moins d'isoler la simulation sur un ordinateur dédié, cette augmentation risque de perturber le fonctionnement du système. Une suite logique à ces travaux doit donc être la détermination des paramètres de la simulation en fonction de l'objectif et de l'architecture du système, pour permettre une utilisation optimale de la simulation proactive.

7. CONCLUSION

Cette étude montre qu'il est possible d'inclure la simulation proactive dans la gestion locale d'un système automatisé en cours de fonctionnement.

Outre son intérêt dans l'aide à la conception des systèmes, la simulation s'avère être une aide précieuse à la conduite on-line des systèmes. En effet, il est tout à fait envisageable (voire particulièrement pertinent) d'appliquer cette méthodologie sur des systèmes très complexes.

Nous avons proposé une démarche de prise de décision de pilotage incluant une phase de simulation. Nous avons ensuite développé un exemple de prise de décision concernant la gestion d'un stock tampon sur un poste de travail. D'autres décisions sont actuellement à l'étude, avec cette même démarche. Elles concernent des

décisions prises lors du lancement d'une production et des décisions prises en cas de dysfonctionnement d'un poste (Kouiss et Pierreval, 1999).

Le point sur lequel la performance d'une telle architecture est diminuée est la prise en compte des événements stochastiques, ce qui nécessite une multiplication des simulations de manière à augmenter l'intervalle de confiance.

Cela nous amène au point crucial restant à développer. Les problèmes de temporalité sont multiples sur une telle architecture. En effet, les temps de traitement des simulations se doivent d'être extrêmement courts pour ne pas pénaliser le système outre mesure. De ce fait, des études restent à mener sur les intervalles de temps dédiés à la simulation à proprement parler et à la décision.

De plus, le système de décision doit être élaboré de manière à prendre une décision rapide. De ce fait, le lien entre ce système et la simulation proactive doit être étroit pour permettre d'optimiser le temps de simulation en ayant une réponse la plus fiable possible.

Enfin, un lien doit être établi entre le système de décision et la commande de bas niveau pour permettre une application des décisions sans intervention du pilote de la ligne.

REFERENCES

- Ait Hssain, A., 2000, *Optimisation des flux de production. Méthodes de simulation*, Editions Dunod.
- Berruet P., T. Coudert et E. Kindler, 2004, Vers une simulation réflexive en ingénierie des systèmes transitiqs, *Proceedings of the 5e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation "Modélisation et simulation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques"*, MOSIM'04, Nantes, France, pp.149-156.
- Castagna P., N. Mebarki, R. Gauduel, 2001, Apport de la simulation comme outil d'aide au pilotage des systemes de production - exemples d'application, *Proceedings of the 3e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation «Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels» MOSIM'01*, Troyes, France.
- Cofer Darren D. and M. Rangarajan, 2003. Event-triggered environment for verification of real-time system. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, ed. S.Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice.*, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp.915-922.
- Kouiss K. et H. Pierreval «Implementing an On-Line Simula-tion in a Flexible Manufacturing System» *Proceedings of the ESS'99 Conference*, Nuremberg, Allemagne, 26-28 octobre, pp 484-488, 1999.
- Kumar P. R. and I. T. Seidman, Dynamic Instabilities and Stabilization Methods in Distributed Real Time Scheduling of Manufacturing Systems, *IEEE Trans. on A.C.* 35(3), 1990, pp. 289-298.
- Law A.M. and W. D. Kelton, 1982. *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, New York.
- Le Moigne J.-L., 1990, *La modélisation des systèmes complexes*, Editions Dunod.
- Lenclud T., 1993, *Contribution à la conception d'un système intégré de simulation des systèmes de production*, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, France.
- Petty M. D., 2002, Comparing high level architecture data distribution management specifications 1.3 and 1516. *Simulation Practice and Theory*, 9(3-5), pp.95-119
- Pujo P., M. Pedetti, F. Ounnar, 2004, Pilotage proactif des lignes de production kanban par modélisation DEVS et simulation temps réel, *Proceedings of the 5e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation "Modélisation et simulation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques"*, MOSIM'04, Nantes, France, pp. 593-600.
- Verbraeck A., 2004, "Component-based Distributed Simulations. The Way Forward?". In *Proceedings 18th Workshop on Parallel and Distributed Computer Simulation. (Kufstein, Austria, 16-19 May 2004)*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 2004. pp. 141-148.