



HAL
open science

La Simulation Informatique en Génie Industriel, Etat de l'Art Actuel

Georges Habchi

► **To cite this version:**

Georges Habchi. La Simulation Informatique en Génie Industriel, Etat de l'Art Actuel. 4ème Congrès Int. de Génie Industriel (GI'01), Mar 2001, Aix-En-Provence, France. hal-01647875

HAL Id: hal-01647875

<https://hal.science/hal-01647875>

Submitted on 24 Nov 2017

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.

La Simulation Informatique en Génie Industriel

Etat de l'Art Actuel

Georges Habchi
LLP/CESALP – ESIA
Université de Savoie
Annecy – France

Résumé : cet article résume et analyse l'état de l'art de la simulation informatique, principalement dans le domaine du génie industriel, durant ces dix dernières années à travers un échantillon représentatif de plus de cinquante articles sélectionnés dans des revues internationales et ciblées. Les points suivants sont abordés dans cet article. D'abord, une introduction situe l'état de recherche actuel de la simulation dans le domaine du génie industriel en général et dans le domaine des systèmes de production en particulier. Ensuite, nous analysons le processus de simulation et les travaux à apporter dans ce domaine. Nous résumons aussi les différents travaux de la simulation pour l'analyse, la conception, le pilotage, l'ordonnancement et la planification des systèmes de production. Un paragraphe fait apparaître les approches hybrides et l'intégration d'autres techniques telles que les réseaux de neurone, les algorithmes génétiques, les plans d'expérience avec la simulation. Enfin, un dernier paragraphe expose les travaux en simulation pour l'enseignement et l'apprentissage.

1. Introduction

Les systèmes industriels hiérarchiques, statiques et rigides sont et seront remplacés par des systèmes adaptables, exhibant une grande aptitude à des changements rapides et capables de produire des volumes bas à faibles coûts. Les systèmes manufacturiers de la nouvelle génération seront conçus à partir de sous-systèmes ou de groupements de ressources, relativement simples, distribués, autonomes mais coopératifs et organisés comme des entreprises virtuelles [Gindy *et al.* 1998]. Le processus de conception des sous-systèmes appelés aussi cellules, est dynamique, piloté par les objectifs, auto-optimisé et auto-organisé. Les ressources sont combinées en vue d'accomplir une tâche ou une fonction. La formation des cellules repose sur une stratégie collaborative pour l'utilisation de ressources suffisantes et la réalisation des objectifs fixés. Une variété d'unités de production génériques seront modélisées à l'aide de ressources élémentaires et seront associées pour former des groupements à des niveaux hiérarchiques différents et appropriés au niveau de détail de l'application.

Dans un article récent [Rooks 2000], Brian Rooks, éditeur associé de la revue « *Assembly Automation* », présente une étude intitulée « *Winning ways for manufacturing* » qui analyse les travaux de la conférence « *Winning Ways'99* ». L'auteur rappelle l'objectif de la conférence qui était l'exploration des voies possibles permettant de préparer l'industrie manufacturière à entrer dans le nouveau millénaire. Un sous-titre de la conférence était le suivant : « avez vous les outils et la compétence nécessaires pour propulser votre compagnie dans le nouveau millénaire ? ». Ci-après nous résumons les points essentiels présentés par différents industriels lors des sessions plénières. Des techniques et des approches dont certaines ont déjà fait preuve d'utilisation et de réussite pourraient être à l'origine de changements futurs dans les systèmes industriels, notamment : les centres d'excellence, la

simulation, les compétences multiples, la « *lean¹ and agile manufacturing* », l'automatisation intégrée totale, le commerce par réseau internet (e-business), etc. Certaines des entreprises représentées ont témoigné de leur évolution actuelle. Par exemple, TRW Aeronautics a : fortement amélioré sa productivité, doublé ses ventes, quintuplé la rotation de ses stocks, diminué ses temps de production de 6 mois à 7 jours, etc. Les systèmes de production ont été réorganisés en centres d'excellence en affectant à chaque centre un rôle spécifique. L'approche de « *one piece at a time material flow* » a été adoptée. La simulation a été utilisée dans un rôle privilégié pour : identifier les processus individuels, optimiser le flux à travers le système, aider au dimensionnement des centres d'excellence, évaluer le comportement du système global, etc. Elle a aussi servi de support pour la formation des opérateurs à l'ensemble du processus de fabrication dans un centre d'excellence. Une formation à des compétences multiples et croisées pour qu'un opérateur puisse assurer la responsabilité d'une partie de l'ensemble du processus a été adoptée. Certains industriels prônent les opportunités élevées de la « *lean and agile manufacturing* » que le secteur industriel peut en bénéficier pour améliorer le service client et la rentabilité des processus. Il est avancé qu'une utilisation effective de cette approche permet de réduire les temps de production et les encours. Une intégration automatisée et totale à partir de l'atelier jusqu'à la direction est nécessaire. En effet, le personnel gestionnaire des couches hiérarchiques supérieures a besoin d'un accès temps réel aux informations de la production. Cette intégration doit s'étendre à l'extérieur de l'organisation interne de l'entreprise à l'aide des moyens de réseaux de l'Internet qui sont devenus possibles grâce aux développements réalisés ces dernières années. Dans la suite de cet article, nous synthétisons certains des travaux dans les dix dernières années, portant sur la thématique de la simulation informatique dans le domaine du génie industriel.

2. La simulation informatique

Plusieurs définitions de la simulation informatique existent dans la littérature. Selon [Law *et al.* 1991] elle peut être définie de diverses manières : « *un moyen explicatif pour définir un système, un vecteur d'analyse pour déterminer des résultats critiques, un évaluateur de conception pour analyser et évaluer des solutions proposées, etc.* ».

La simulation peut être caractérisée par certains faits : elle introduit des changements dans le temps (technique temporelle), elle possède un processus de conception de modèle logique et d'expérimentation, elle aide au choix de la politique la plus désirable, elle est utilisée pour la modélisation de systèmes complexes (généralement stochastiques), etc.

La simulation est largement utilisée dans le monde et par conséquent elle est très familière. Les principales raisons de son utilisation sont : elle ne nécessite pas l'utilisation de mathématiques poussées, la réalisation de modèles réalistes est possible, les résultats visuels sont un support pour l'aide au développement du modèle et à son validation, ils sont aussi un moyen de compréhension et de confiance à disposition du client, des options ou alternatives différentes peuvent être considérées sans expérimentation directe sur le système, des systèmes non existants peuvent être modélisés, les méthodes analytiques sont perçues comme des techniques peu utiles par le management de l'entreprise ou peuvent nécessiter beaucoup de simplifications.

¹ *Lean manufacturing* est définie selon l'apics [APICS 1995] par : *a philosophy of production that emphasizes the minimization of the amount of all the resources (including time) used in the various activities of the enterprise. It involves identifying and eliminating non-value-adding activities in design, production, supply chain management, and dealing with the customers. Lean producers employ teams of multi-skilled workers at all levels of the organization and use highly flexible, increasingly automated machines to produce volumes of products in potentially enormous variety.*

La simulation à événements discrets pilote le comportement du modèle en examinant et en mettant à jour le modèle (à travers ses variables et ses attributs) quand il est connu qu'un changement dans l'état du système doit arriver. De ce fait, la simulation comporte : des changements instantanés à des points différents du temps et de l'espace, une série d'événements, une série d'activités, des processus et généralement une description selon une approche à trois phases. D'abord, la base de la simulation à événements discrets est le diagramme à cycles d'activités (*Activity Cycle Diagram – ACD*). Un diagramme à cycles d'activités est une approche de modélisation du système réel, particulièrement adaptée pour les systèmes à files d'attente. Ensuite, le diagramme à cycles d'activités contient des entités représentant les éléments du système modélisé (pièces, opérateurs, machines, chariots, etc.). Les entités peuvent être soit occupées soit libres. Un rectangle modélise une activité. L'activité représente ce que transforme l'état d'une entité et correspond à l'état occupé d'une entité. Un cercle modélise une file d'attente et représente l'état libre d'une entité. Enfin, une activité démarre si les entités nécessaires sont présentes et s'arrête à un moment pré établi à partir d'un temps défini fixe ou par tirage sur la base d'une distribution de probabilité. Une activité peut avoir différents types d'entités alors qu'une file d'attente ne peut contenir qu'un seul type. Outre, le diagramme à cycles d'activités, le comportement du modèle peut être piloté par les événements, orienté processus ou piloté par l'envoi de messages dans une approche orientée objet.

3. Analyse du processus de simulation

Il est important de rappeler que la construction d'un modèle pour la simulation d'un système n'est qu'une étape dans un projet appelé « le processus de simulation ». Il est connu que le temps de développement du modèle ne représente que 30 à 40% du temps global de l'ensemble du processus. Un processus de simulation peut être défini selon différentes vues [Hoover *et al.* 1989] [Yucesan *et al.* 1992] [Musselman 1993] [Banks 1994] [Law 1994]. Ces vues sont beaucoup plus diverses que celles concernant la définition de la simulation elle-même ou les raisons de son utilisation [Lehane *et al.* 1998]. Toutefois, à travers les vues proposées, et sans pour autant donner une position absolue, quelques étapes émergent : la définition et la formulation du problème, la collecte et l'analyse des données, la modélisation et la programmation, la vérification et la validation du modèle, l'expérimentation et l'analyse des résultats, la décision et l'implémentation des résultats.

La simulation est focalisée sur une formalisation et une recherche de solutions en utilisant des méthodes par tâtonnement [Davis *et al.* 1994]. Le processus de simulation est un processus itératif. Il révèle souvent le besoin pour des informations importantes et fait apparaître des points nouveaux dans le problème. Pendant ce processus, les relations entre le système à étudier et le modèle sont définies et redéfinies continuellement. Une recherche fondamentale et approfondie sur l'automatisation du processus de simulation est aujourd'hui un besoin urgent et nécessaire pour un utilisateur potentiel non confirmé. En effet, la littérature manque cruellement de recherches sur les deux premières étapes du processus : la définition du problème et la collecte des données. Concernant la deuxième étape, nous retrouvons souvent des indications ou des suggestions non approfondies et sans directives sur la collecte et l'analyse des données, telles que : « *les données qui étaient réduites* », « *la réduction des données* », etc. La situation est quasi similaire dans la plupart des ouvrages de simulation, nous retrouvons par exemple : « *As preliminary to the construction of a simulation, it is necessary to abstract from the real system all those components (and their interactions) that are considered important enough for inclusion in the model* » [Mitrani 1982], « *A model should contain only enough detail to capture the essence of the systems for the purposes for which the model is intended* », « *the construction of a mathematical and logical model of a*

real system for a given objective is still as much an art as it is a science » [Law *et al.* 1991], etc. D'après Robinson [Robinson 1994], il y a une tendance à tout modéliser sans s'arrêter pour reconsidérer exactement ce qui est nécessaire. De ce fait, la définition du problème et la collecte et l'analyse des données restent un domaine non couvert par la recherche. Pour la réalisation de ces deux étapes, les plus expérimentés utilisent intuition et expérience.

A ce sujet, Lehtonen *et al.* [Lehtonen *et al.* 1997] proposent une méthodologie pour la collecte et l'analyse des données dans un processus de simulation en logistique. Cette méthodologie appelée « analyse de contrôlabilité en logistique » (*controllability analysis in logistics*), se concentre sur les deux premières phases du processus. Le terme « Analyse de Contrôlabilité » dérive du concept de Contrôlabilité dans la théorie des systèmes, où ce concept est défini par « la capacité d'un système à atteindre un certain état dans un temps fini ». Les auteurs se limitent à une définition moins rigoureuse : « la capacité d'un système de production à remplir ses objectifs ». L'objectif de l'analyse est double : d'abord révéler les terrains d'amélioration potentiels et ensuite définir et analyser les données pour qu'elles soient disponibles pour le processus de simulation. En effet, aucun problème ne peut être résolu selon une méthode bien structurée à moins qu'il soit clairement bien défini avant le processus de résolution. Aussi, l'identification et la définition du problème nécessitent l'identification, la collecte, l'analyse et le traitement des données. En d'autres mots, la définition du problème et la collecte et l'analyse des données ne sont pas deux étapes subséquentes mais plutôt simultanées dans un processus de simulation.

Les systèmes industriels peuvent être modélisés en utilisant deux types de techniques : les techniques temporelles (time based techniques) et les techniques non temporelles (non-time based techniques). La simulation est une technique temporelle alors que les techniques non temporelles comportent une série de techniques faisant partie de la recherche opérationnelle (la programmation linéaire, la théorie des files d'attente, la théorie des graphes, etc). La technique utilisée détermine le degré de simplification, fixe les hypothèses nécessaires pour la construction du modèle, et impose le fait que si le caractère aléatoire des systèmes réels doit être exclu du modèle (par exemple la programmation linéaire). L'une des caractéristiques les plus puissantes de la simulation est sa capacité à modéliser le caractère stochastique d'un système réel. Mais, aussi l'un des dangers les plus importants est l'utilisation d'une hypothèse fautive en simulant un système à caractère aléatoire à l'aide d'un modèle ayant des données déterministes. Dans ce sens, un article récent [Bekker *et al.* 1999] expose ce type de problème. Ainsi, à l'aide de deux modèles de simulation représentant un système réel à caractère aléatoire (l'un utilisant des données déterministes et l'autre des données stochastiques), les auteurs montrent à l'aide de résultats divers le risque engendré par le choix du type de données.

L'étape de modélisation nécessite un effort au préalable pour faire le choix adéquat du logiciel ou du langage de simulation. A ce propos, le processus hiérarchique analytique (AHP²) est proposé dans une étude de cas [Davis *et al.* 1994]. Les auteurs avaient deux objectifs en vue : le premier est d'évaluer la confiance dans l'outil pour l'aide à la décision, et le second est de recommander à l'entreprise un outil convenable. Pour définir les critères de sélection trois environnements ont été considérés : le domaine de l'assemblage manuel, le problème de l'ordonnancement dans un système d'assemblage hautement automatisé, l'analyse et le re-engineering d'un système manufacturier. L'échantillon considéré porte sur 14 outils de simulation. Huit critères ont été ainsi définis : le coût, la convivialité (flexibilité, graphiques, animation), l'intégration avec d'autres systèmes, la documentation, la formation, la facilité d'utilisation, le matériel informatique et l'installation, l'importance du logiciel sur le marché (SAV, nombre de logiciels vendus, taille de l'entreprise, etc.). L'analyse à l'aide de

² AHP – Analytic Hierarchy Process.

la méthode AHP a montré que la flexibilité, la compréhension et le support accompagnant le logiciel sont les critères les plus importants dans le choix du logiciel.

4. La simulation pour l'analyse et la conception des systèmes industriels

Le concept de simulation informatique utilisé comme un outil légitime pour la conception et l'analyse de systèmes manufacturiers qu'ils soient nouveaux ou existants a été bien documenté et accepté par académiciens et par industriels [Paul 1991] [Chan *et al.* 1995] [Trego 1997] etc. Law et Kelton déjà en 1991 [Law *et al.* 1991] résument le paradigme de l'augmentation de l'utilisation de la simulation par quatre raisons. La première est la compétition dans l'industrie qui a poussé les industriels à améliorer la productivité et la qualité et à réduire les coûts. La deuxième est la réduction des coûts dans le secteur de l'informatique. La troisième est l'amélioration des outils de simulation. Et la quatrième est la disponibilité de l'animation graphique facilitant la compréhension de la simulation. L'utilisation de la simulation pour la conception et l'analyse des systèmes industriels reste privilégiée puisque des articles nombreux et récents portent sur cette thématique. En effet, certains avantages pour la simulation des systèmes manufacturiers peuvent être avancés :

- la simulation peut réduire les risques de conception de systèmes qui ne fournissent pas une flexibilité suffisante,
- un modèle de simulation peut représenter des caractéristiques importantes d'un système et de manière réaliste ; il peut notamment incorporer des interactions complexes pouvant exister entre différentes variables du système,
- différentes alternatives de conception peuvent être facilement évaluées dans un environnement bien contrôlé,
- un modèle de simulation est capable d'utiliser les mêmes indicateurs de performance qu'un système réel utilise, et de montrer ainsi les résultats de ces indicateurs pour évaluer le système réel.

Plusieurs travaux existent dans ce domaine. Nous proposons ci-après une synthèse de certains de ces travaux. L'objectif de l'étude de Polajnar *et al.* [Polajnar *et al.* 1995] concerne l'analyse de la productivité d'un système composé de quatre centres d'usinage flexibles tenant compte du système de transfert des pièces en simulant différentes alternatives de transport. Le modèle est développé à l'aide de l'outil de simulation *SIMFACTORY II.5*. Trois alternatives de transport ont été testées en utilisant des chariots filo-guidés, des chariots à rails et des convoyeurs. Les résultats ont montré qu'une meilleure productivité a été obtenue en utilisant des convoyeurs. La simulation est utilisée ici pour la conception d'un système géré en juste à temps [Welgama *et al.* 1995]. L'étude a été développée pour analyser la performance de deux cellules de production dans une entreprise de produits chimiques, dans un environnement juste à temps où la production est pilotée par kanban. Deux alternatives ont été comparées en se basant sur la charge du matériel de manutention. Les taux d'utilisation des opérateurs ont été estimés et les résultats pourront être utilisés pour la conception de ce type de système. Chakravorty et Atwater [Chakravorty *et al.* 1995] présentent une étude pour comparer deux types de lignes : l'un géré en juste à temps et l'autre organisé par équilibrage de charge traditionnelle. La comparaison est effectuée à l'aide d'un modèle de simulation réalisé avec l'outil *SLAM II*. Le système modélisé est de type fermé avec un nombre d'encours constant. Les stations de travail sont soumises à des défaillances aléatoires avec une variabilité faible et élevée. Le temps de cycle est utilisé pour évaluer les deux types de lignes. Un plan d'expériences est réalisé pour organiser les simulations et une analyse de la variance est ensuite effectuée. Il a été conclu que dans le cas d'une variabilité faible, les lignes gérées en juste à temps fournissent un temps de cycle plus faible que les lignes

équilibrées sauf dans le cas de très faibles encours. Dans le cas d'une variabilité élevée, les résultats montrent que quand le niveau d'encours est faible les lignes équilibrées fournissent un temps de cycle meilleur que le juste à temps alors que le juste à temps fournit un meilleur temps de cycle quand le niveau d'encours est plus élevé. Cet article [Saad *et al.* 1998] concerne l'analyse d'un système d'assemblage hybride et flexible³. Une étude de simulation et une analyse de la variance (ANOVA) ont été réalisées pour identifier les facteurs qui affectent significativement les indicateurs de performance du système. Une classification des facteurs affectant ce type de système est réalisée. Dans le but de généraliser les résultats, d'autres configurations et d'autres niveaux de facteurs ont été examinés. Marin *et al.* [Marin *et al.* 1998] proposent une étude de simulation pour l'aide à la conception d'un système automatisé de stockage aérien dans l'industrie automobile. Le système est composé de chariots circulant sur des monorails et stockés par accumulation sous l'effet de la pesanteur. Le système doit répondre à des contraintes dépendant de l'espace, du temps de recherche des pièces, des besoins clients, etc. L'étude présente le processus de décision et les solutions adoptées pour surmonter les contraintes et répondre aux spécifications. Aussi, un outil de simulation intégré dans un cadre de conception orienté objet est présenté. Il a été développé pour soutenir le processus de décision spécialement dans la première phase du projet. L'article suivant concerne la conception de cellules de fabrication et d'assemblage dans une entreprise du secteur automobiles [Chan *et al.* 1999]. La simulation est utilisée pour assister les managers et les ingénieurs dans la conception et l'analyse d'un nouveau système manufacturier. Les objectifs de l'étude sont : l'évaluation de différentes alternatives de conception, la prédiction de la performance du système, la détection des problèmes potentiels, l'expérimentation avec les paramètres du système réel et la détermination de la sensibilité du système en fonction de ces paramètres. Dans cet article récent [Irani *et al.* 2000], une étude de cas est réalisée pour démontrer combien la modélisation et la simulation peuvent être utilisées avec efficacité pour le re-engineering des processus manufacturiers. Le modèle développé est utilisé pour générer les résultats qui permettent d'évaluer les possibilités d'augmenter le flux de produit à travers le système. La modélisation et la simulation sont ainsi utilisées pour évaluer différentes stratégies. Des directives sont proposées pour l'achèvement de plus larges utilisations dans la simulation de processus de re-engineering. Caron *et al.* [Caron *et al.* 2000] proposent une approche de simulation permettant de dimensionner des zones de stockage dans un système de triage manuel. La productivité de ce type de systèmes est largement influencée par le type d'implantation et par le nombre d'allées. En effet, l'implantation joue un rôle important dans la détermination de la distance à parcourir pour accomplir un groupement de demandes donné. L'étude montre que le nombre d'allées optimal dépend à la fois de la stratégie de décision à long et à court terme. Elle montre de plus, que les conceptions sont fortement affectées par des décisions opérationnelles concernant la taille de lot, le nombre de tris par tour, la politique de stockage, etc. Certaines directives sont fournies dans le cas d'un environnement stable où les règles opératoires sont bien définies et dans le cas d'un environnement instable où ces règles peuvent varier.

5. Simulation, pilotage, ordonnancement et planification des systèmes industriels

Dans le domaine du pilotage temps réel, la simulation a été traditionnellement utilisée pour l'aide à la décision hors ligne (offline). Le temps passé pour la collection des données était

³ Un système d'assemblage hybride et flexible est une ligne partiellement automatisée comprenant à la fois des stations complètement automatisées et d'autres complètement manuelles. Les stations manuelles sont généralement affectées à des tâches à faible coût, ayant un caractère variable et les tâches de contrôle nécessitant des aspects intellectuels.

l'une des barrières de son utilisation en temps réel. Ce fait a représenté un frein de son utilisation en temps réel pour la prise de décision. Les mots clés en pilotage temps réel sont : acquisition de données, réponse rapide et réaction quasi instantanée. Ainsi, les principaux composants des systèmes de simulation en ligne (online) discutés dans la littérature consistent généralement en un module d'acquisition de données, un modèle de simulation et une cellule de pilotage ou de contrôle. Parfois, des modules tels qu'un système expert sont inclus pour remplacer l'être humain. Ces dernières années un nombre croissant d'articles a été publié en pilotage temps réel des systèmes manufacturiers. La simulation en ligne a été utilisée dans un mécanisme de lancement des ordres de fabrication dans un système manufacturier flexible [Muller *et al.* 1990]. Rogers et Flanagan [Rogers *et al.* 1991] ont développé un cadre pour un système de simulation en ligne pour l'ordonnancement en temps réel. Récemment, certains auteurs, notamment [Spedding *et al.* 1997] ont utilisé un modèle de simulation construit avec le logiciel *ARENA* et lié au contrôleur d'une cellule d'assemblage de claviers informatiques pour effectuer un pilotage adapté en temps réel. L'article présente l'architecture de modélisation et du système de pilotage, le mouvement des entités sur les convoyeurs et décrit la modélisation de quatre types de claviers. Un PC contrôleur supervise les changements d'état de la ligne d'assemblage et fournit en temps réel les données collectées au modèle de simulation.

Un système d'aide à la décision pour l'ordonnancement (DSS⁴ ou DSSMS⁵) dans un environnement job shop est proposé dans [Jacobs *et al.* 1994]. L'étude concerne l'amélioration de l'ordonnancement dans les systèmes de type fonctionnel pour accomplir plusieurs objectifs : la satisfaction des besoins des départements successeurs, la minimisation des encours, la maximisation du volume réalisé en améliorant la productivité, la minimisation des demandes dans les couches supérieures du système décisionnel, la maximisation du taux de service client en maximisant le nombre d'OF⁶ terminés à temps, en fournissant à l'utilisateur un outil d'ordonnancement qui permet d'atteindre ces différents objectifs conflictuels. Un modèle de simulation a été réalisé à l'aide de *SLAM II* pour l'évaluation du module d'ordonnancement. Abdallah [Abdallah 1995] utilise un modèle de simulation basé-connaissance pour l'ordonnancement d'un atelier de type fonctionnel (job shop). Une base de connaissances pour l'ordonnancement sert à fournir à l'acteur décideur des décisions qui pourront être utilisées dans des situations particulières : augmentation des encours, oisiveté des machines, défaillances des machines, dates de besoin non satisfaites, opérateurs indisponibles, produits rebutés, etc. Les caractéristiques des files d'attente introduisent d'autres facteurs qui affectent l'ordonnancement : temps de fabrication, gamme, date de besoin, temps de changement de série, production sur stock ou à la commande, etc. L'objectif de l'étude est de trouver le meilleur ordonnancement pour un certain nombre d'OF sur un certain nombre de machines en vue de satisfaire différents indicateurs de performance. Différentes règles de priorité ont été utilisées. Des heuristiques de sélection entre les différentes règles ont été également élaborées en vue de trouver la meilleure solution au problème d'ordonnancement. Dans l'article suivant [Leu *et al.* 1995], les auteurs réalisent une analyse comparative de plusieurs heuristiques d'ordonnancement dans un système flow shop. Les résultats de l'étude ont montré que la performance de cinq heuristiques (premier arrivé premier servi, date de besoin la plus proche, temps de processus le plus court, ratio critique, temps opératoire le plus court) dans un environnement de production au plus tard diffère de celle obtenue dans un environnement de production au plus tôt, exceptée pour l'indicateur retard. Les résultats des indicateurs de ; temps de production, encours, taux d'utilisation sont meilleurs dans un environnement de production au plus tard. La mauvaise

⁴ DSS – Decision Support System.

⁵ DSSMS – Decision Support System for Machine Scheduling.

⁶ OF – Ordre de Fabrication.

performance concernant le retard est due au fait que les ordres à réaliser sont retardés en fonction des dates de besoin. La règle du temps de processus le plus court fournit les meilleurs résultats dans un environnement au plus tôt, alors que la règle du ratio critique est meilleure dans un environnement au plus tard. L'article de [Goyal *et al.* 1995] traite du problème d'ordonnancement et propose une analyse de certaines règles à l'aide de la simulation dans un système manufacturier flexible. Les objectifs de l'article comprennent : la modélisation et la simulation d'un système manufacturier flexible qui peut être utilisé en enseignement et l'étude de l'effet de certaines règles de chargement au niveau des files d'attente et des stations d'usinage. Les règles suivantes sont utilisées : FCFS⁷, SPT⁸, LPT⁹, SOT¹⁰, EDD¹¹. Les indicateurs de performance du système sont : l'encours moyen devant les stations, le taux d'utilisation moyen des stations d'usinage, le retard moyen des OF et le temps de production moyen. L'article suivant [Huq *et al.* 1995] traite du problème de sensibilité de combinaison de certaines règles d'ordonnancement dans un système de production job shop et hybride. Quatre règles ont été considérées : SPT, EDD, FIFO (FCFS), LIFO¹². Les quatre règles ont été combinées avec la règle de Johnson ou entre elles pour former huit combinaisons différentes. Trois indicateurs de performance ont été utilisés pour évaluer les différentes combinaisons : temps de production moyen, retard moyen, encours moyen. Le modèle de simulation a été réalisé à l'aide de *SLAM II* et un plan d'expériences a été construit pour structurer les simulations. Lloyd J. Taylor [Taylor 1999] propose une étude comparative de trois méthodes de pilotage des flux (flux poussé fondé sur MRP¹³, flux tiré fondé sur une approche JAT¹⁴ comme le Kanban¹⁵ et flux hybride poussé/tiré fondé sur la théorie des contraintes TOC¹⁶) et leur effet sur des indicateurs financiers. L'analyse statistique des données associées à cette étude a été réalisée grâce à la simulation (*SIMFACTORY*) de trois lignes d'assemblage organisées en flux (flow shop). Les résultats ont montré que d'un point de vue financier (stock d'encours considéré comme un actif), un stock d'encours excessif (supérieur aux besoins minimaux de production) a un effet négatif sur les indicateurs financiers considérés dans cette étude. Haslett *et al.* [Haslett *et al.* 2000] développent une théorie de règles locales en utilisant les travaux de Kauffman et Holland sur les architectures appropriées. Les règles locales sont utilisées par des individus pour augmenter leur chance de survie dans une architecture appropriée. Les auteurs présentent les résultats de simulation de règles locales utilisées par les managers dans un système de production piloté par kanban. Les règles locales utilisées par les managers ont été modélisées et leur succès et conséquences inattendus reportés.

Les stratégies de chargement dans un FMS (Flexible Manufacturing System) ont traditionnellement considéré les décisions d'ordonnancement les plus critiques et les plus importantes [Denzler *et al.* 1987] [Garetti *et al.* 1990] [Rachamadugu *et al.* 1994] etc. Un article récent reporte une comparaison à l'aide de la simulation informatique entre un chargement périodique conventionnel et un chargement par groupes de travaux [Pelagagge *et al.* 1998]. Le chargement conventionnel recherche la meilleure séquence de travaux qui permet d'optimiser la performance d'un FMS. Le chargement par groupe de travaux agit comme une règle dynamique pour l'ordonnancement en temps réel des FMS, définissant ainsi

⁷ FCFS – First Come First Served ou premier arrivé premier servi connue aussi par FIFO – First In First Out.

⁸ SPT – Shortest Processing Time ou temps de processus le plus court.

⁹ LPT – Longest Processing Time ou temps de processus le plus long.

¹⁰ SOT – Shortest Operation Time ou temps opératoire le plus court.

¹¹ EDD – Earliest Due Date ou date de besoin la plus proche.

¹² LIFO – Last In First Out ou dernier arrivé premier sorti.

¹³ MRP – Material Requirements Planning.

¹⁴ JAT – Juste A Temps.

¹⁵ Kanban – Méthode japonaise permettant de piloter le flux en fonction de la demande des clients.

¹⁶ TOC – Theory Of Constraints.

une politique de lancement capable de garantir un état périodique stable sans temps de non-production sur les stations goulets. Cependant, le chargement dynamique n'assure pas dans certains cas la même performance obtenue avec le chargement conventionnel, concernant les temps non-productifs dans les phases de déchargement, les encours et les temps de production. L'étude démontre que la comparaison d'un chargement dynamique et d'un chargement conventionnel optimal fournit des différences négligeables sur la performance du système. Un autre article utilise la simulation pour évaluer une approche de sélection du type de pièce dans un lot dans les FMS [Tabucanon *et al.* 1998]. La sélection du type de pièce pour un traitement simultané dans les FMS est l'une des phases les plus importantes dans la planification à court terme. L'approche de lancement par lots (batching approach) pour la sélection du type de pièce est une approche très populaire en pratique mais elle nécessite une évaluation « a priori » des résultats obtenus, d'où l'utilisation de la simulation, outil bien adapté. L'objectif de cette approche est la maximisation du nombre de types d'articles dans un lot en tenant compte des contraintes liées à la capacité du magasin d'outillage et la disponibilité des outils nécessaires pour l'usinage. Deux alternatives sont explorées, elles concernent les poids affectés dans la fonction objectif concernant la sélection du type d'article. Une procédure est utilisée pour équilibrer les charges agrégées des machines. Une expérience de simulation a été réalisée pour évaluer la performance de l'approche et examiner le taux d'utilisation des machines. Dans cet article [Gindy *et al.* 1998], les auteurs définissent la sensibilité comme étant la capacité d'un système manufacturier à utiliser ses ressources existantes en vue d'apporter une réponse rapide et équilibrée à des changements prévisibles ou non prévisibles. Une meilleure appréhension de la flexibilité propre d'un système manufacturier permet d'arriver à des améliorations significatives sur la performance et la sensibilité du système. Les auteurs présentent un cadre conceptuel pour la représentation des machines outils et d'usinage à l'aide d'éléments appelés éléments ressources « *resource elements* » ainsi qu'une formulation mathématique permettant de calculer la flexibilité du système manufacturier en utilisant ces éléments. La simulation est utilisée pour examiner la performance du système et comparer l'ordonnancement à base des éléments ressources avec des approches conventionnelles. Les résultats montrent que des améliorations significatives de la performance du système sont obtenues en utilisant les concepts proposés.

Hoyt et Huq [Hoyt *et al.* 1999] présentent un modèle de simulation du processus administratif interne d'une compagnie manufacturière aérospatiale dans des conditions de saisonnalité et de variation de tâches complexes. En effet, il est connu que les modèles de simulation des processus organisationnels et de leur développement sont un moyen très efficace pour étudier l'efficacité des politiques appliquées [Hansford *et al.* 1992]. La compagnie en question a initié un effort majeur de re-engineering avec deux objectifs : la réduction des coûts aussi bien fixes que variables et l'amélioration du taux de service client par la capacité de réponse aux besoins. Ainsi, le modèle a été développé pour simuler les activités depuis que la commande client est reçue jusqu'au moment où un planning préliminaire est réalisé et une proposition formelle est envoyée au client. Ce modèle est réalisé selon une approche à deux étapes : la première comprend une formalisation de l'information et des relations entre activités selon IDEF₀ et la seconde comprend un modèle de simulation utilisant *SLAMII* et utilisant l'information structurée par IDEF₀.

6. Intégrations et approches hybrides de la simulation

Disney *et al.* [Disney *et al.* 1997] utilisent conjointement un modèle du système de pilotage en production et la simulation. Le système de pilotage n'est qu'un système de planification MRP (Manufacturing Resources Planning) puisqu'il est basé sur la demande client, l'état de stock et les ordres de fabrication. L'optimisation du plan est réalisée à l'aide d'un algorithme

génétique dans lequel le choix est basé sur la réponse simulée de plusieurs scénarios. Dans un autre article [Soon *et al.* 1997], les auteurs proposent une approche d'ordonnancement basée sur une simulation intelligente. Actuellement, les techniques d'ordonnancement sont fondées sur une combinaison de trois approches : la recherche opérationnelle (RO), la simulation et l'intelligence artificielle (IA). L'article de Soon et de Souza présente une approche hybride utilisant la simulation et les réseaux de neurone pour résoudre des problèmes d'ordonnancement. A cet effet, des réseaux de neurone sont développés pour analyser une information complexe concernant les ordres de fabrication et pour suggérer des règles d'ordonnancement au modèle de simulation. Le modèle de simulation réalisé à l'aide de l'outil *FACTOR/AIM* utilise ainsi les règles pour ordonnancer les ordres lancés. Le plan est comparé à un ordonnancement classique dans une cellule de production flexible. Les auteurs de l'article suivant [Brennan *et al.* 1999] utilisent la simulation pour mettre en place un cadre de pilotage permettant de supporter un système manufacturier à production « sensible ». L'approche utilisée étudie la mise en place de moyens appropriés en vue de l'intégration de l'information disponible dans le système de pilotage. Le cadre proposé pour intégrer l'information au pilotage d'une ligne d'assemblage automatisée, combine à la fois l'information transitoire (longueur d'une file d'attente) et l'information stable (estimations à l'aide de moyenne et écart type). Il a été montré que l'utilisation d'un pilote approprié à base de logique floue et de la simulation en utilisant *ARENA*, fournissent des performances meilleures que celles obtenues en se basant uniquement sur une information stable ou sur une information transitoire. Dans l'article de [Jahangirian *et al.* 2000] nous trouvons une proposition d'un cadre pour définir des stratégies d'ordonnancement en deux modules couplés : un module sur la simulation intelligente (IS¹⁷) et un module d'apprentissage incrémental piloté par un algorithme génétique. Le problème d'ordonnancement dans un contexte dynamique est ainsi abordé. Le module d'apprentissage génère une bonne solution à partir d'une aléatoire, conduit un processus d'apprentissage incrémental et a la propriété d'intercepter le problème dans un espace de recherche étendu. Les résultats sont obtenus dans le cas d'une machine unique. D'autres travaux couplant simulation et algorithmes génétiques existent [Pierreval *et al.* 1990]. Y. Ito [Ito 2000], considère dans son article une application d'une politique de contrôle adaptative aux systèmes à entrées-sorties dynamiques de l'industrie japonaise en utilisant les réseaux de neurone et la simulation. La politique de pilotage a trois étapes. La première recherche à obtenir la politique de pilotage optimale pour que la somme pondérée des différences au carré entre les cibles réelles et les objectifs soit minimisée. La deuxième détermine les résultats optimaux pour chaque secteur industriel à travers un système à entrées-sorties dynamique en considérant les politiques optimales de pilotage. La troisième permet d'obtenir les résultats à l'aide du réseau neuronal. Les résultats du réseau de neurone sont ensuite utilisés dans un modèle de simulation.

L'article de Blosch *et al.* [Blosch *et al.* 1999] décrit une étude de cas concernant le système de planification de la marine royale. L'objectif est de fournir une main d'œuvre suffisante pour les engagements opérationnels et structurels. La liste de demandes est affectée par plusieurs variables et ainsi il est essentiel de comprendre l'influence de ces variables et aussi les interactions éventuelles parmi elles. Les plans d'expériences sont une technique adaptée pour accomplir cet objectif. L'expérimentation réelle n'étant pas possible, un modèle de simulation a été développé. L'étude montre comment les deux techniques ont été appliquées et comment des variables clés de risque ont été identifiées.

L'un des obstacles majeurs contribuant à l'augmentation du coût, du temps et de l'efficacité dans l'amélioration de la qualité des produits dans les systèmes manufacturiers est la propagation des défauts et des erreurs à travers le système. Les cartes de contrôle individuels

¹⁷ IS – Intelligent Simulation.

et conventionnels n'abordent pas le problème de manière adéquate en tenant compte des interrelations dans le processus. Les méthodes par tâtonnement pour mettre en place les cartes de contrôle sont les méthodes les plus utilisées à cause de la complexité et de la variété naturelle des systèmes manufacturiers. Les auteurs de l'article suivant [**Spedding et al. 2001**], proposent une méthodologie systématique et informatique permettant de configurer les cartes de contrôle qui améliorent productivité et qualité, et réduisent les coûts. Une ligne de production a servi de plate-forme de simulation pour construire un système à cartes de contrôle en s'aidant de plusieurs scénarios en dehors de la production réelle. Les défauts sur certaines stations sont auto corrélés et à corrélation croisée avec la station amont. La méthode ABC¹⁸ a été utilisée pour l'analyse des résultats.

7. La simulation dans l'enseignement et l'apprentissage

La simulation est l'un des outils le plus largement utilisé en science de management. L'enseignement de la simulation a traditionnellement impliqué le développement de modèles aussi bien théoriques que pratiques. Avec l'avènement d'outils modernes, le développement de modèles pratiques peut être entrepris avec peu de connaissance en théorie de simulation. L'objectif de l'article de Lehaney *et al.* [**Lehaney et al. 1998**] est de montrer que les utilisateurs ayant des faibles connaissances en théorie de simulation peuvent apprendre à utiliser rapidement des outils ou des application graphiques de simulation (Windows-based simulation software) pour le développement de leurs modèles. Ce type d'outils est connu pour son aide d'apprentissage en réduisant la charge cognitive de l'utilisateur et en fournissant à l'utilisateur un certain niveau d'auto-contrôle. La charge cognitive concerne le volume de traitement et le nombre d'éléments que l'utilisateur doit manipuler à un instant donné. Si cette charge est réduite l'apprentissage devient plus facile. Les applications graphiques assistent l'apprentissage en permettant à l'utilisateur de contrôler deux niveaux : d'abord en contrôlant le contenu et la complexité de l'information d'un écran actif et ensuite en contrôlant l'exécution et la vitesse de simulation. Dans une étude plus récente sur l'exploration de l'apprentissage à l'aide de la simulation d'entreprise [**Gopinath et al. 1999**], les auteurs focalisent sur la capacité des participants à traduire les stratégies d'une compagnie en une série de décisions dans un modèle de simulation. Dans un but pédagogique, le caractère itératif et expérimental de la simulation renforce les objectifs de l'enseignement considéré pour un meilleur enseignement. Les résultats de l'étude montrent qu'il est encourageant d'utiliser la simulation dans la prise de décision stratégique à long terme, la simulation d'entreprise est un moteur d'apprentissage expérimental. Dans l'article suivant [**Altmeyer 2000**], l'auteur démontre comment des méthodes non traditionnelles créent un environnement d'enseignement à réussite renforcée. L'exemple utilisé concerne la gestion de stocks à l'aide de la simulation. Les participants travaillent par groupes et recherchent les meilleures stratégies à appliquer. A travers la recherche de solutions, des idées critiques et un raisonnement déductif sont développés. Aussi Doyle *et al.* [**Doyle et al. 2000**], utilisent la simulation en tant que jeu de stratégie d'affaire pour fournir aux joueurs l'expérience dans le développement et l'implémentation de stratégies. Les participants partagés en groupes simulent leur compagnie dans un environnement de compétitivité. Cette démarche les force à prendre des risques et à anticiper les stratégies des autres compétiteurs. Le jeu de simulation est international et il a été appliqué par e-mail et vidéoconférence entre des groupes se trouvant dans différents pays : France, Irlande et USA.

¹⁸ ABC – Activity Based Costing.

8. Bibliographie

- [**Abdallah 1995**] M.H. Abdallah, « *A knowledge-based simulation model for job shop scheduling* », International Journal of Operations & Production Management, Vol. 15, No. 10, 1995, pp. 89-102.
- [**Altmyer 2000**] D.J. Altmyer, « *Using an online stock market simulation as a cross-disciplinary learning enhancer : simulation as an example of grey literature* », The International Journal on Grey Literature, Vol. 1, No. 3, 2000, pp. 121-126.
- [**APICS 1995**] Apics Dictionary, 8th edition, Editors : J.F. Cox, J.H. Blackstone, M.S. Spencer, American Production and Inventory Control Society, Inc. 1995.
- [**Banks 1994**] J. Banks, « *Pitfalls in the simulation process* », Conference on New Directions in Simulation for Manufacturing and Communications, Operations Research Society of Japan, Tokyo, Japan, 1994, pp. 57-63.
- [**Bekker et al. 1999**] J. Bekker, S. Saayman, « *Drawing conclusions from deterministic logistic simulation models* », Logistics Information Management, Vol. 12, No. 6, 1999, pp. 460-466.
- [**Blosch et al. 1999**] M. Blosch, J. Antony, « *Experimental design and computer-based simulation : a case study with the Royal Navy* », Managing Service Quality, Vol. 9, No. 5, 1999, pp. 311-319.
- [**Brennan et al. 1999**] R.W. Brennan, B. Foroughi, « *A control framework to support responsive manufacturing* », International Journal of Agile Management Systems, Vol. 1, No. 3, 1999, pp. 159-168.
- [**Caron et al. 2000**] F. Caron, G. Marchet, A. Perego, « *Layout design in manual picking systems : a simulation approach* », Integrated Manufacturing Systems, Vol. 11, No. 2, 2000, pp. 94-104.
- [**Chakravorty et al. 1995**] S.S. Chakravorty, J.B. Atwater, « *Do JIT lines perform better than traditionally balanced lines* », International Journal of Operations & Production Management, Vol. 15, No. 2, 1995, pp. 77-88.
- [**Chan et al. 1995**] F.T.S. Chan, B. Jayaprakash, N.K.H. Tang, « *Design of automated cellular manufacturing systems with simulation modelling : a case study* », International Journal of Computer Applications in Technology, Vol. 8, No. 1/2, 1995, pp. 1-11.
- [**Chan et al. 1999**] F.T.S. Chan, B. Jiang, « *Simulation-aided design of production and assembly cells in an automotive company* », Integrated Manufacturing Systems, Vol. 10, No. 5, 1999, pp. 276-283.
- [**Davis et al. 1994**] L. Davis, G. Williams, « *Evaluating and selecting simulation software using the analytic hierarchy process* », Integrated Manufacturing Systems, Vol. 5, No. 1, 1994, pp. 23-32.
- [**Denzler et al. 1987**] D.R. Denzler, W.J. Boe, « *Experimental investigation of flexible manufacturing scheduling decision rules* », International Journal of Production Research, Vol. 25, No. 7, 1987, pp. 979-994.
- [**Disney et al. 1997**] S.M. Disney, M.M. Naim, D.R. Towill, « *Dynamic simulation modelling for logistics* », International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 27, No. 3/4, 1997, pp. 174-196.
- [**Doyle et al. 2000**] D. Doyle, F.W. Brown, « *Using a business simulation to teach applied skills – the benefits and the challenges of using student teams from multiple countries* », Journal of European Industrial Training, Vol. 24, No. 6, 2000, pp. 330-336.
- [**Garetti et al. 1990**] M. Garetti, A. Pozzetti, A. Bareggi, « *On-line loading and dispatching in flexible manufacturing systems* », International Journal of Production Research, Vol. 28, No. 7, 1990, pp. 1271-1292.
- [**Gindy et al. 1998**] N.N. Gindy, S.M. Saad, « *Flexibility and responsiveness of machining environments* », Integrated Manufacturing Systems, Vol. 9, No. 4, 1998, pp. 218-227.
- [**Gopinath et al. 1999**] C. Gopinath, J.E. Sawyer, « *Exploring the learning from enterprise simulation* », The Journal of Management Development, Vol. 18, No. 5, 1999.
- [**Goyal et al. 1995**] S.K. Goyal, K. Mehta, R. Kodali, S.G. Deshmukh, « *Simulation for analysis of scheduling rules for a flexible manufacturing system* », Integrated Manufacturing Systems, Vol. 6, No. 5, 1995, pp. 21-26.
- [**Hansford et al. 1992**] L.C. Hansford, J.R. Grove J.R., P.J. Sweeney, « *Using simulation technology in organisational development* », Journal of Systems Management, February, 1992, pp. 28-31.
- [**Haslett et al. 2000**] T. Haslett, C. Osborne, « *Local rules : their application in a kanban system* », International Journal of Operations & Production Management, Vol. 20, No. 9, 2000, pp. 1078-1092.

- [Hoover *et al.* 1989] S. Hoover, R. Perry, « *Simulation – A problem solving approach* », Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [Hoyt *et al.* 1999] J. Hoyt, F. Huq, « *Research communications – A simulation model of the contract change process* », *Kybernetes*, Vol. 28, No. 6/7, 1999, pp. 826-836.
- [Huq *et al.* 1995] F. Huq, Z. Huq, « *The sensitivity of rule combinations for scheduling in a hybrid job shop* », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 3, 1995, pp. 59-75.
- [Irani *et al.* 2000] Z. Irani, V. Hlupic, L.P. Baldwin, P.E.D. Love, « *Re-engineering manufacturing processes through simulation modelling* », *Logistics Information Management*, Vol. 13, No. 1, 2000, pp. 7-13.
- [Ito 2000] Y. Ito, « *Adaptive dynamic input-output analysis using neural networks (Japanese industrial structure)* », *Kybernetes*, Vol. 29, No. 9/10, 2000, pp. 1087-1102.
- [Jacobs *et al.* 1994] L.W. Jacobs, J. Lauer, « *DSS for job shop machine scheduling* », *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 94, No. 4, 1994, pp. 15-23.
- [Jahangirian *et al.* 2000] M. Jahangirian, G.V. Conroy, « *Intelligent dynamic scheduling system: the application of genetic algorithms* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 4, 2000, pp. 247-257.
- [Law *et al.* 1991] A.M. Law, W.D. Kelton, « *Simulation modeling and analysis* », Second edition, McGraw Hill, New York, NY, 1991.
- [Law 1994] A. Law, « *How to successfully simulate your system* », Conference on New Directions in Simulation for Manufacturing and Communications, Operations Research Society of Japan, Tokyo, Japan, 1994, pp. 1-3.
- [Lehaney *et al.* 1998] B. Lehaney, H. Kogetsidis, A. Platt, S. Clarke, « *Windows-based simulation software as an aid to learning* », *Journal of European Industrial Training*, Vol. 22, No. 1, 1998, pp. 12-17.
- [Lehtonen *et al.* 1997] J.M. Lehtonen, U. Seppälä, « *A methodology for data gathering and analysis in a logistics simulation project* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8, No. 6, 1997, pp. 351-358.
- [Leu *et al.* 1995] B.Y. Leu, J.W. Nazemetz, « *Comparative analysis of group scheduling heuristics in a flow shop cellular system* », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 9, 1995, pp. 143-157.
- [Marin *et al.* 1998] R.M. Marin, J. Garrido, J.L. Trillo, J. Saez, J. Armesto, « *Design and simulation of an industrial automated overhead warehouse* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 9, No. 5, 1998, pp. 308-313.
- [Mitrani 1982] I. Mitrani, « *Simulation techniques for discrete event systems* », Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- [Muller *et al.* 1990] D.J. Muller, J.K. Jackman, C. Fitzwater, « *A simulation-based work order release mechanism for a flexible manufacturing system* », Winter Simulation Conference, 1990, pp. 599-602.
- [Musselman 1993] K.J. Musselman, « *Guidelines for simulation project success* », Winter Simulation Conference, IEEE, New York, NY, USA, 1993, pp. 58-64.
- [Paul 1991] R.J. Paul, « *Recent developments in simulation modelling* », *Journal of Operations Research Society*, Vol. 56, No. 2, 1991, pp. 91-103.
- [Pelagagge *et al.* 1998] P.M. Pelagagge, G. Cardarelli, A. Santalucia, « *Comparison of conventional and dynamic FMS periodic loading rules* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 9, No. 1, 1998, pp. 15-22.
- [Pierreval *et al.* 1990] H. Pierreval, H. Ralambondrainy, « *A simulation and technique for generating knowledge about manufacturing systems behaviour* », *Journal of Operational Research Society*, Vol. 41, 1990, pp. 461-474.
- [Polajnar *et al.* 1995] A. Polajnar, B. Buchmeister, M. Leber, « *Analysis of different transport solutions in the flexible manufacturing cell by using computer simulation* », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 6, 1995, pp. 51-58.
- [Rachamadugu *et al.* 1994] R. Rachamadugu, K.E. Stecke, « *Classification and review of FMS scheduling procedures* », *Production Planning and Control*, Vol. 5, No. 1, 1994, pp. 2-20.
- [Robinson 1994] S. Robinson, « *Simulation projects: building the right conceptual model* », *Industrial Engineering*, September 1994, pp. 34-36.

- [**Rogers et al. 1991**] P. Rogers, M.T. Flanagan, « *Online simulation for real-time scheduling of manufacturing systems* », *Industrial Engineering*, Vol. 37, 1991, pp. 37-40.
- [**Rooks 2000**] B. Rooks, « *Winning ways for manufacturing* », *Assembly Automation*, Vol. 20, No. 1, 2000, pp. 35-39.
- [**Saad et al. 1998**] S.M. Saad, M.D. Byrne, « *Comprehensive simulation analysis of a flexible hybrid assembly system* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 9, No. 3, 1998, pp. 156-167.
- [**Spedding et al. 1997**] T.A. Spedding, W.L. Lee, R. de Souza, S.S.G. Lee, « *Adaptive simulation of a keyboard assembly cell* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8, No. 1, 1997, pp. 50-58.
- [**Spedding et al. 2001**] T.A. Spedding, K.K. Chan, « *System level improvement using discrete event simulation* », *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 18, No. 1, 2001, pp. 84-103.
- [**Soon et al. 1997**] T.H. Soon, R. de Souza, « *Intelligent simulation-based scheduling of workcells : an approach* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8, No. 1, 1997, pp. 6-23.
- [**Tabucanon et al. 1998**] M.T. Tabucanon, D.N. Batanov, S. Basu, « *Using simulation to evaluate the batching approach to part type selection in flexible manufacturing systems* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 9, No. 1, 1998, pp. 5-14.
- [**Taylor 1999**] L.J. Taylor III, « *A simulation study of WIP inventory drive systems and their effect on financial measurements* », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 5, 1999, pp. 306-315.
- [**Trego 1997**] L. Trego, « *Factory layout and manufacturing simulation* », *Automotive Engineering*, Vol. 105, No. 5, 1997, pp. 113-115.
- [**Welgama et al. 1995**] P.S. Welgama, R.G.J. Mills, « *Use of simulation in the design of a JIT system* », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 9, 1995, pp. 245-260.
- [**Yucesan et al. 1992**] E. Yucesan, S.H. Jacobson, « *Building correct simulation models is difficult* », *Winter Simulation Conference*, IEEE, New York, NY, USA, 1992, pp. 783-789.