



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse  
Discipline ou spécialité : Systèmes Industriels

---

Présentée et soutenue par Samieh MIRDAMADI

Le 17 Juin 2009

Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel  
à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution

### JURY

---

Jean Pierre CAMPAGNE  
André THOMAS  
Pierre CASTAGNA  
Lionel DUPONT  
Franck FONTANILI

Professeur, INSA, Lyon  
Professeur, CRAN, Nancy  
Professeur, IRCCyN, Nantes  
Professeur, École des Mines d'ALBI  
Enseignant chercheur, École des Mines d'ALBI

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

---

École doctorale : École doctorale systèmes (EDSYS)  
Unité de recherche : Centre Génie Industriel - École des mines d'Albi  
Directeurs de Thèse : Lionel DUPONT  
Co directeur de thèse : Franck FONTANILI



## *Remerciements*

*Je souhaite remercier tout d'abord mon directeur de thèse M. Lionel DUPONT, professeur de laboratoire génie industriel de l'École des Mines d'Albi pour m'avoir accueillie dans ce laboratoire et m'avoir accompagnée et soutenue. Ainsi que mon encadrant M. Franck FONTANILI, enseignant chercheur à l'École des Mines d'Albi, pour m'avoir encadrée tout au long de cette période de thèse.*

*Je remercie plus particulièrement le professeur Pierre CASTAGNA à IRCCyN de Nantes de m'avoir fait l'honneur de présider le jury. J'adresse également mes remerciements aux autres membres du jury, pour avoir accepté de juger nos travaux en qualité de rapporteurs : Professeur Jean-Pierre CAMPAGNE à INSA de Lyon, Professeur André THOMAS à CRAN de Nancy.*

*Je remercie aussi l'ensemble du département Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi, de m'avoir acceptée durant cette période, particulièrement Isabelle FOURNIER pour son soutien durant cette période et la relecture du manuscrit. Je ne peux pas citer tous les doctorants et enseignants chercheurs du centre mais ils ont tous participé à la réussite finale de cette thèse. Il ne m'est pas possible d'oublier les soutiens incondtionnels et silencieux des professeurs Hervé PINGAUD et Didier GOURC pour m'avoir occasionnellement aidée dans mon travail durant cette période et pour leurs sympathies et leurs prédispositions pour aider les autres.*

*Je tiens à remercier toutes les personnes du site expérimental de Rascol pour m'avoir permis de travailler sur la plateforme expérimentale technologique pour mettre en place la démonstration de ces travaux. J'adresse particulièrement mes remerciements à M. Daniel BLACHE, M. Jean-Claude GRISENTI, M. Frédérique DUBOSC pour leurs soutiens matériels et leurs conseils pratiques.*

*Je ne saurai jamais assez remercier ma mère et mon père qui, dans des conditions difficiles et loin de moi, participent à la réalisation de mes projets. Je n'oublie évidemment pas mes sœurs, Sara et Shirin, qui m'ont rassurée en me remplaçant auprès d'eux pendant tout ce temps.*

*Une pensée particulière va enfin et bien sûr à Olivier pour son amour, sa patience et son soutien qui m'a supportée avant d'être docteur et me supportera encore, enfin je l'espère.*

*Merci encore à tous*



# Sommaire général de la thèse

<b>Introduction et problématique.....</b>	<b>1</b>
<b>I. Pilotage des systèmes de production .....</b>	<b>7</b>
I.1. Introduction .....	9
I.2. Pilotage d'un système.....	9
I.3. Pilotage des systèmes industriels.....	11
I.4. Fonctions génériques du pilotage de la production .....	14
I.5. Finalités des systèmes de pilotage de la production .....	18
I.6. Évolution des systèmes de production et de leurs objectifs .....	19
I.7. Flexibilité et réactivité.....	22
I.8. Typologie des structures de pilotage .....	24
I.9. Structure retenue par la suite .....	26
I.10. Typologie du pilotage selon l'origine de perturbation et selon la période de lancement.....	28
I.11. Conclusion.....	31
<b>II. Les outils d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier .....</b>	<b>35</b>
II.1. Introduction.....	37
II.2. Les progiciels existants pour le pilotage d'une unité de production « supervision, ordonnancement » .....	37
II.3. Choix des outils pour le pilotage en temps réel d'atelier « MES et SED ».....	44
II.4. Optimisation en couplant les méthodes simulateur/analytique dans un atelier de fabrication intermittente .....	58
II.5. Conclusion de cette optimisation .....	70
<b>III. Simulation en ligne couplée à l'exécution.....</b>	<b>77</b>
III.1. Introduction.....	79
III.2. Simulation en ligne .....	79
III.3. Proposition de modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide de la simulation en ligne .....	87
III.4. Chronogramme d'utilisation de la simulation en ligne pour le pilotage en temps réel.....	109
III.5. Couplage entre Simulation et MES pour l'aide à la décision dans le pilotage .....	116
III.6. Conclusion .....	122
<b>IV. Démonstration de la faisabilité technique .....</b>	<b>129</b>
IV.1. Introduction .....	131
IV.2. Présentation de la plateforme expérimentale.....	131
IV.3. Construction du modèle de simulation hors ligne de la plateforme expérimentale.....	141
IV.4. Étude de la faisabilité technique pour réaliser des simulations en ligne.....	150
IV.5. Conclusion.....	153
<b>Conclusions et perspective.....</b>	<b>157</b>



# Introduction et problématique

---

Dans un monde en perpétuel changement, les industriels ont besoin d'être réactifs pour rester compétitifs et pour conquérir de nouveaux marchés. Pour y arriver, ils sont contraints d'améliorer leur façon de piloter la production, tant au niveau stratégique, pour s'adapter aux progrès de la technologie ou suivre les évolutions du marché, qu'au niveau opérationnel, pour réagir face aux aléas. Au niveau stratégique, ceci les conduit à modifier et adapter leurs moyens de production pour faire face à l'arrivée de nouveaux produits et de nouveaux concurrents, pour réduire notamment leurs délais de fabrication. L'objectif de la réactivité en production est de pouvoir adapter régulièrement le système de production à la demande. Les industriels doivent aussi maîtriser leur système de production au niveau opérationnel. Ils doivent être capables de réagir sur le très court terme aux événements imprévus tels qu'une modification ou une annulation d'un ordre de fabrication, l'arrivée d'une commande urgente, des perturbations aléatoires du système de production et ce, de façon la moins perturbante et la plus rapide possible.

Pour y parvenir au mieux, les entreprises manufacturières ont besoin de réagir au moment opportun pendant la fabrication. Parmi les solutions possibles, elles peuvent adapter leurs systèmes de production face à l'apparition d'aléas via le système de pilotage d'atelier. Le pilotage concerne l'organisation des relations entre le sous-système physique et le sous-système de décision et l'organisation liée à la prise de décision [Le Moigne, 1974]. Le pilotage a pour but d'assurer la cohérence des décisions entre des ordres issus de la gestion prévisionnelle à court terme et les actions exécutées au niveau du système de production. Il doit faire face aux contraintes de décision et d'objectif et aux aléas du système physique comme les pannes machines, les retards, etc. Le pilotage d'atelier doit s'appliquer notamment d'une manière précise et rapide en comparant l'état réel du système de production en exploitation et l'état attendu. Il existe de nombreux outils pour assurer le pilotage d'un atelier et de nombreux travaux [Hanisch *et al.*, 2003], [Kouiss et Pierreval, 1999], etc. apportent leur contribution en particulier dans le domaine de l'ordonnancement d'atelier en temps réel « réactif », de la maintenance et de la fiabilité des équipements, de la supervision, des MES « *Manufacturing Execution System* », etc. L'originalité de ce travail de recherche repose sur l'utilisation de la simulation de flux à événements discrets, qui n'est généralement pas un outil destiné au pilotage mais plutôt à la conception et à l'amélioration de processus.

Le potentiel de la simulation est très vaste, car elle est applicable à tous les flux de l'industrie et même des services, à tous les niveaux hiérarchiques et à toutes les phases du cycle de vie d'un système de production [Berchet, 2000]. Le plus souvent, le logiciel de simulation est utilisé en phase de conception ou d'amélioration des ateliers pour dimensionner les capacités des stocks et files d'attente, pour tester des règles de fonctionnement, pour identifier les goulots d'étranglement, pour mesurer l'influence des perturbations, etc. La simulation de flux peut également être utilisée en phase d'exploitation, en complément d'outils de planification ou d'ordonnancement pour, par exemple, estimer des délais. Elle permet aussi de déterminer les valeurs optimales des paramètres de pilotage à appliquer au système de production avant de lancer l'exécution en couplant au modèle de simulation un algorithme d'optimisation [Fontanili, 1999].

Dans ce travail de recherche, la simulation sera appliquée *en ligne*, c'est-à-dire connectée au système réel. L'intérêt est d'avoir un outil d'aide à la décision centré sur le pilotage d'atelier par rapport à des événements se produisant en temps réel et pour un horizon à très court terme. Cette simulation *en ligne* permet d'analyser et de comparer plusieurs scénarii du système de production, notamment à partir d'événements comme l'apparition d'une panne, l'arrivée d'une commande urgente, etc. On s'intéressera essentiellement aux systèmes de production de type manufacturier à flux discontinu en nous appuyant sur un simulateur de flux à événements discrets, c'est-à-dire dans lequel les variables d'état changent seulement lors d'événements tels le début ou à la fin d'une opération, la libération d'un poste de travail, l'occurrence d'une panne, la mise en attente des pièces dans une file, etc. [Bel et Kieffer, 2002].

La prise de décision au sein du pilotage d'atelier de production est appliquée sur les différents niveaux hiérarchiques. Généralement, cette décision aux niveaux stratégique et tactique s'applique périodiquement, comme par exemple toutes les semaines ou tous les jours. Au niveau opérationnel, la décision est basée sur les événements pouvant survenir à tout instant avec une fréquence d'apparition parfois inférieure à la seconde. Cette prise de décision à très court terme et en temps réel permet de piloter au mieux l'atelier de production pour obtenir le résultat prévisionnel.

L'un des intérêts majeur d'utiliser la simulation pour le pilotage est de disposer d'un outil permettant de se projeter dans le futur sur le très court terme pour mesurer les conséquences d'un événement venant d'apparaître. C'est ce que nous pouvons appeler la simulation *Look-ahead*, que nous pouvons traduire en français par *Pré-vision*. Un autre intérêt qui sera aussi développé dans cette thèse est d'aider à la prise de décision en simulant en accéléré plusieurs scénarii de correction, afin de limiter les conséquences d'un événement critique. Cela pourrait permettre aussi d'avoir un retour d'expérience sur la décision de l'exploitation vers la conception. En conclusion, la simulation en ligne nous paraît être l'un des outils les plus intéressants d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier, alors qu'il n'existe que très peu d'applications industrielles dans les systèmes manufacturiers.

Le mémoire de cette thèse est composé de quatre parties :

Dans la première partie, nous ferons un état de l'art sur le pilotage d'atelier du point de vue de la littérature scientifique et notamment nous examinerons le rôle de la prise de décision dans le pilotage d'atelier. Ensuite, en nous basant sur des interviews réalisées auprès d'un groupe d'industriels, nous comparerons les problématiques du pilotage présentées dans la littérature avec le ressenti sur le terrain. L'objectif de cette comparaison est non seulement de mieux connaître les besoins du terrain, mais aussi de faire évoluer les pratiques et d'amener des solutions pour améliorer le pilotage de la production à court terme.

Pour atteindre les objectifs de production à court terme, nous avons besoin d'utiliser des outils d'aide au pilotage. Actuellement, l'évolution considérable de l'informatique permet de disposer d'outils logiciels à toutes les étapes du cycle de vie d'un système de production. Dans la seconde partie de cette thèse, nous étudierons les outils logiciels existants et utilisés par l'industrie. Nous nous focaliserons plus spécifiquement sur la phase d'exploitation de la production et nous retiendrons les outils d'aide au pilotage qui permettent le meilleur respect des objectifs fixés. Nous aborderons l'outil de simulation de flux à événements discrets (SED) et puis décrirons le fonctionnement de la SED et ses applications dans les différents domaines de pilotage. L'usage le plus courant est la simulation *hors ligne*, sans aucun lien

direct avec le système réel. Cette utilisation déconnectée du système réel ne nous permet pas de prendre en compte les informations remontant du terrain. Elle ne permet pas de prendre une décision exploitable dans le système réel. Un autre usage consiste à faire de la simulation en ligne, comme évoqué précédemment. Ceci nécessite de pouvoir suivre l'évolution du système réel et d'alimenter le simulateur avec les informations caractérisant cette évolution. Dans ce travail, nous proposons de coupler un outil de simulation en ligne avec un outil d'exécution d'atelier de type MES afin de piloter un processus de production en temps réel. Ces deux outils nous semblent en effet complémentaires pour mieux piloter l'atelier de production. Un MES permet d'être informé des états actuel et passé d'un système de production et donc d'événements imprévus. Par contre, aucune fonction de simulation n'est prévue, même dans le cadre de la norme ISA S95 (*Enterprise Control System Integration*). Cette norme s'attache à la formalisation des échanges autour du système de production vers les autres domaines de l'entreprise. Notre idée est donc de coupler ces deux outils, voire même d'intégrer un simulateur dans un MES.

Comme montré dans la partie précédente, pour optimiser les règles de pilotage, le système de décision doit posséder des informations fiables sur le système de production. La simulation permet de modéliser des systèmes en utilisant des ressources, des postes de travail, des stocks, etc. Ces éléments sont caractérisés par des états, par exemple disponible, occupé, en panne, etc. La dynamique du système est simulée grâce à une horloge et à des événements qui modifient les états de ces éléments. L'utilisation directe de la simulation va nous fournir des résultats qui seront analysés pour permettre une optimisation. Cette optimisation nécessite de réaliser un grand nombre de simulations, ce qui est fastidieux et donne donc un temps de résolution très long. Dans la partie II de cette thèse, nous proposons une démarche de modélisation faisant appel de façon complémentaire à deux approches : analytique et simulateur. En premier lieu, la résolution analytique permet de cibler très rapidement des populations de solutions proches de l'optimum. Les difficultés majeures de la modélisation analytique se situent dans la phase de modélisation, puisque le problème doit être décrit par un système d'équations. Ensuite, l'utilisation de la simulation permet non seulement de vérifier les résultats fournis par la résolution analytique, mais aussi d'apporter des informations complémentaires en tenant compte non seulement de la dynamique des flux mais aussi des capacités statiques. Par ailleurs, la simulation peut prendre en compte des phénomènes aléatoires afin de démontrer la robustesse du modèle, ce qui est beaucoup plus difficile avec la modélisation analytique.

Dans la troisième partie de cette thèse, nous détaillerons d'abord les caractéristiques et les conditions d'utilisation d'un simulateur en ligne, puis nous nous intéresserons à son couplage ou son intégration avec un MES pour le pilotage et l'aide à la décision. Nous proposerons d'utiliser la simulation en ligne en nous appuyant sur un modèle alimenté par des données provenant d'un système réel en cours de fonctionnement. Nous identifierons les besoins et les problèmes posés par la réalisation d'une telle simulation comme la nécessité d'avoir, en temps réel, des informations concernant l'état courant du système réel, la synchronisation entre le système réel et le modèle dans le cas où l'état du modèle ne correspondrait pas à l'état du système réel, la détection et l'identification des événements qui ont un impact sur les objectifs planifiés, la mesure des conséquences de certains événements sur l'objectif, etc. Nous étudierons ensuite les apports de la simulation en ligne couplée à un MES sur le processus de pilotage de la production et la prise de décision. Nous présenterons donc les spécifications attendues pour la réalisation de ce couplage et les conditions de mise en œuvre. Concernant le pilotage et l'aide à la décision, nous nous appuierons sur quelques

situations représentatives (panne d'une machine, ordre de fabrication annulé, dérive d'un temps de cycle, etc.) pour mettre en évidence notre contribution.

Malgré l'intérêt de la simulation en ligne pour le pilotage, les outils de simulation du marché ne comportent pas de fonctionnalités répondant aux besoins énoncés dans la troisième partie. En conséquence, à notre connaissance, il n'existe pas d'applications industrielles de couplage entre simulation en ligne et MES pour le pilotage d'un atelier. Pour mieux convaincre les industriels de l'intérêt de ce travail, dans la dernière partie de cette thèse nous présenterons des solutions pratiques aux besoins et spécifications énoncés précédemment en nous appuyant sur une plateforme expérimentale. Nous détaillerons et analyserons des expérimentations afin de valider en pratique le concept de simulation en ligne comme une aide au pilotage et aussi de faire ressortir les difficultés de développement.

## Références bibliographiques de l'introduction

---

**[Bel et Kieffer, 2002]** G. Bel, J. P. Kieffer, "Pilotage assisté par la simulation discrète", Hermès Science Europe Ltd (Ed.) : Méthodes du pilotage des systèmes de production, pp. 99-127, 2002.

**[Berchet, 2000]** Claire Berchet, "Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel", 2000, Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble.

**[Fontanili, 1999]** Franck Fontanili, "Intégration d'outils de simulation et d'optimisation pour le pilotage d'une ligne d'assemblage multiproduit à transfert asynchrone", Thèse de doctorat, Université Paris XIII, 1999.

**[Hanisch *et al.*, 2003]** André Hanisch, Juri Tolujew, Klaus Richter et Thomas Schulze, "Modeling people flow : Online simulation of pedestrian flow in public buildings", 35th Conference on Winter Simulation : driving innovation. New Orleans : Winter Simulation Conference, 2003, pp. 1635-1641.

**[Kouiss et Pierreval, 1999]** Khalid Kouiss et Henri Pierreval, "Implementating an on-line simulation in a flexible manufacturing system.", ESS'99 Conference, Nurenberg, 1999, pp. 484-488.

**[Le Moigne, 1974]** Jean-Louis Le Moigne, "Les systèmes de décision dans les organisations", Presses Universitaires de France, Paris, 1974.



# Partie I

## I. Pilotage des systèmes de production

---

### Sommaire détaillé de la partie I

<b>I. Pilotage des systèmes de production .....</b>	<b>7</b>
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2. Pilotage d'un système.....</b>	<b>9</b>
<b>I.3. Pilotage des systèmes industriels.....</b>	<b>11</b>
<b>I.4. Fonctions génériques du pilotage de la production .....</b>	<b>14</b>
I.4.1. Planification .....	15
I.4.2. Programmation.....	15
I.4.3. Ordonnancement ou séquençement .....	15
I.4.4. Conduite .....	16
I.4.5. Commande .....	16
<b>I.5. Finalités des systèmes de pilotage de la production .....</b>	<b>18</b>
I.5.1. Répondre à la demande client .....	18
I.5.2. Fournir aux ateliers des conditions de travail satisfaisantes .....	18
I.5.3. Donner à l'entreprise les moyens financiers qui lui sont nécessaires .....	19
<b>I.6. Évolution des systèmes de production et de leurs objectifs .....</b>	<b>19</b>
I.6.1. Modèle de « production de masse ».....	19
I.6.2. Modèle de « production au plus juste » .....	20
I.6.3. Modèle de « production personnalisée » .....	21
<b>I.7. Flexibilité et réactivité.....</b>	<b>22</b>
<b>I.8. Une typologie des structures de pilotage .....</b>	<b>24</b>
I.8.1. Structure centralisée.....	24
I.8.2. Structure hiérarchisée.....	25
I.8.3. Structure coordonnée .....	25
I.8.4. Structure distribuée .....	26
I.8.5. Structure distribuée supervisée .....	26
I.8.6. Structure décentralisée .....	26
<b>I.9. Structure retenue par la suite .....</b>	<b>26</b>
<b>I.10. Typologie du pilotage selon l'origine de perturbation et selon la période de lancement.....</b>	<b>28</b>
I.10.1. Pilotage prédictif .....	28
I.10.2. Pilotage proactif .....	28
I.10.3. Pilotage réactif ou pilotage en temps réel .....	29
I.10.4. Pilotage correctif .....	30
<b>I.11. Conclusion.....</b>	<b>31</b>



## I.1. Introduction

Pour rester compétitives sur des marchés de plus en plus incertains, les entreprises ont besoin d'être réactives. Elles doivent souvent faire face à des événements imprévus tels qu'une annulation ou une modification de commande, la prise en compte d'une commande urgente, des aléas du système de production, etc. Ceci nécessite d'avoir des outils de pilotage de la production capables de réagir face aux événements critiques. Parmi tous les outils utilisés dans l'industrie pour le pilotage et l'aide à la décision, nous nous intéressons en particulier à l'utilisation couplée d'un logiciel de type système d'exécution des fabrications « *Manufacturing Execution System* » et d'un logiciel de simulation à événement discret. L'objectif de cette première partie est de présenter le contexte général dans lequel s'inscrit notre travail : celui du pilotage des systèmes de production. Nous commencerons par parler du pilotage d'un système en général avant de faire un rapide historique sur le pilotage des systèmes de production. Dans la partie trois, nous détaillerons les différentes fonctions génériques du pilotage de la production. Ces fonctions sont à décliner selon les objectifs propres aux entreprises et au type d'atelier géré. C'est pourquoi, dans les parties suivantes, nous nous intéresserons d'une part aux évolutions des systèmes de production et des modes de pilotage et d'autre part aux évolutions des ateliers de production et de leur architectures. Enfin, nous distinguerons les différents types de pilotage selon leur capacité à réagir et à faire face aux différents événements.

## I.2. Pilotage d'un système

Le pilotage des systèmes de production a fait l'objet de nombreux travaux et de publications depuis deux ou trois décennies, que ce soit dans le milieu industriel ou dans le milieu académique. Force est de constater qu'il n'y a pas d'accord complet sur la définition de ce vocable, ni même sur ce qu'il recouvre, selon que l'on a à faire à des automaticiens, des gestionnaires, des chercheurs en génie industriel ou des éditeurs de logiciel. L'objet de ce premier chapitre est de délimiter le champ de notre étude et de préciser les termes employés.

Pour les dictionnaires, piloter c'est tout à la fois conduire, diriger, gouverner. Implicitement, le pilotage fait référence à un système complexe. Ceci se retrouve dans le langage commun : on conduit sa voiture, mais on pilote une formule 1 ou un avion. Piloter un engin revient en premier lieu à :

- fixer la cible à atteindre,
- déterminer la meilleure trajectoire de référence pour atteindre cette cible.

Une fois l'engin lancé, il s'agit par ordre de priorité de (voir la Figure I.1) :

- (i) *surveiller la trajectoire réelle,*
- (ii) *corriger les écarts observés* avec la trajectoire de référence pour ramener l'engin sur cette trajectoire,
- (iii) *modifier éventuellement la trajectoire de référence* si des informations sur le comportement de l'engin et/ou sur l'univers extérieur montrent soit qu'elle n'est plus maintenable, soit qu'elle n'est plus la meilleure à suivre pour atteindre la cible fixée,
- (iv) *changer de cible* si ces mêmes informations montrent que la cible initiale ne peut être atteinte ou si des impératifs d'ordre supérieur la remettent en cause.

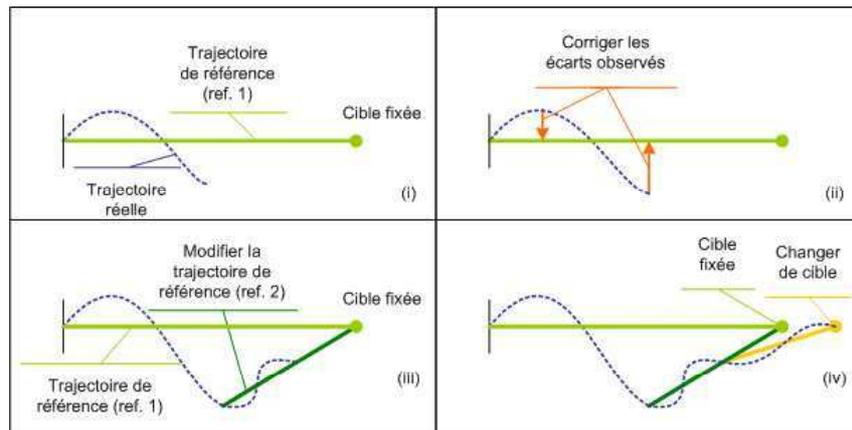


Figure I.1 : cible et trajectoire

Ceci peut se généraliser à tout système complexe, quelle que soit sa nature (physique, sociale, organisationnelle, etc.). On voit se dégager deux éléments principaux d'un pilotage : « la cible » et « la trajectoire ».

- La cible est liée aux finalités et attentes du système étudié. Pour mesurer l'adéquation de la cible visée avec les attentes du système, on doit disposer d'indicateurs de performance propres au système,
- Le suivi de la trajectoire est lié aux capacités de l'engin et aux turbulences de l'environnement externe. Techniquement, la surveillance et le contrôle de la trajectoire sont conditionnés par les caractéristiques physiques de l'engin et par la nature des informations venant à la fois de l'engin et de l'environnement externe.

Dans cette thèse, les systèmes étudiés sont les systèmes de production manufacturière. La cible, ici la production à réaliser, dépend des orientations prises par l'entreprise pour répondre au marché. Les indicateurs de performance d'atteinte de la cible porteront sur les résultats financiers, la satisfaction client, etc. La trajectoire, ici l'enchaînement des activités de fabrication sur les postes de travail, va elle dépendre des caractéristiques du système de production et des ateliers. Les indicateurs de performance porteront sur le respect des délais planifiés, le taux de charge des machines, etc.

En considérant la diversité des orientations et des caractéristiques du système, on comprend la difficulté à avoir une définition unique du pilotage des systèmes de production. Dans la littérature, on peut en trouver de nombreuses. Nous les étudierons dans la partie deux.

De plus, les organisations industrielles ont subi de nombreuses mutations ces dernières décennies. Comme tout autre système, les organisations industrielles sont contraintes d'évoluer sous la pression de leur environnement. Or, on est obligé de constater que le monde, sous l'influence de l'homme, a connu plus de changements ces dernières décennies qu'il n'en avait connu au cours des millénaires précédents. Ceci est tout aussi valable pour l'environnement industriel. Si l'on se restreint aux entreprises, leur évolution est principalement due :

- (i) au renversement du rapport entre l'offre et la demande,
- (ii) à la mondialisation et la globalisation de l'économie,
- (iii) aux mutations techniques et technologiques.

Les entreprises ont du se remettre en question et modifier leur appréhension de l'environnement. Ces évolutions vont aussi impacter les modes de pilotage des systèmes industriels.

- (i) D'une part, prises dans une économie de marché de plus en plus contraignante, les entreprises de production sont confrontées à des demandes clients de plus en plus volatiles, mais aussi à une concurrence de plus en plus forte au fur et à mesure que disparaissent les barrières douanières (marché commun ou accords commerciaux internationaux). Face à cette double contrainte, elles ont été conduites à adapter leur finalité. Par la suite, les priorités sur les attendus du système de production ont été changées. On parle ainsi de pilotages par les coûts, les délais, la qualité, etc. Ceci sera traité dans la partie quatre.
- (ii) D'autre part, les appareils de production ont fortement évolué, tant au niveau matériel qu'au niveau organisationnel. L'utilisation de machines-outils à commande numérique (MOCN), de lignes flexibles et l'automatisation permettent par exemple de réaliser un compromis entre la productivité des lignes de production fordienne et la flexibilité/réactivité des machines servies par l'opérateur humain. Les nouvelles formes d'organisation du travail, la polyvalence permettent de reporter sur les opérateurs une partie des décisions. Les équipements et les machines sont de plus en plus automatisés et les ressources productives sont devenues ainsi de plus en plus coûteuses. L'arrivée des systèmes informatiques permet de remonter plus facilement les informations sur l'état réel du système et de fournir des systèmes d'aide à la décision plus performants. On peut ainsi beaucoup plus facilement et rapidement suivre la « trajectoire » suivie. Ceci sera traité plus avant dans les parties six et sept.

Le petit exemple de l'engin à piloter nous permet aussi de faire ressortir les trois composantes essentielles d'un système à piloter :

- (i) *le système physique*, qui comprend tout à la fois l'engin à piloter, les équipements (capteurs) permettant de surveiller la trajectoire et les gouvernes (actionneurs) permettant de la modifier,
- (ii) *le système d'information*, qui assure la collecte et la mémorisation des informations provenant de l'engin et de l'environnement,
- (iii) *le système de décision*, qui, en fonction des informations reçues et des indicateurs de performance retenus, décide des actions à mener pour atteindre les objectifs.

### **I.3. Pilotage des systèmes industriels**

Parmi les nombreuses définitions du pilotage industriel, la première que nous retiendrons est celle de [Mélèze, 1972], qui fait ressortir le concept de « module de pilotage ». Cette entité, base de l'analyse modulaire des systèmes, constitue le premier formalisme spécifique dédié à la compréhension du mécanisme de prise de décision, en particulier dans les systèmes de production. Pour lui, ce module de pilotage comprend un décideur ainsi que des sous-systèmes décisionnels et d'évolution.

[Le Moigne, 1974] introduit la séparation entre système physique, système d'information et système de décision. Pour lui, le pilotage concerne la définition et l'organisation des relations entre sous-système physique et sous-système de décision, ainsi que l'organisation des activités liées à la prise de décision. Dans les systèmes de production, ceci induit une notion de boucle fermée : une activité n'est réellement décisionnelle que s'il existe une boucle de rétroaction entre le système physique et le système décisionnel. Ceci va permettre au système décisionnel de contrôler que les résultats obtenus sur le système physique sont conformes à l'attendu et dans le cas contraire, va lui permettre de rectifier les ordres.

Le schéma désormais classique de Le Moigne fait ressortir le rôle du système d'information, qui fait l'intermédiaire entre les sous-systèmes physique et de décision (voir la Figure I.2). Ceci met en exergue le fait que, la plupart du temps, les décisions sont prises non pas en se basant sur la réalité du terrain, mais en se basant sur les informations que l'on a de ce terrain.

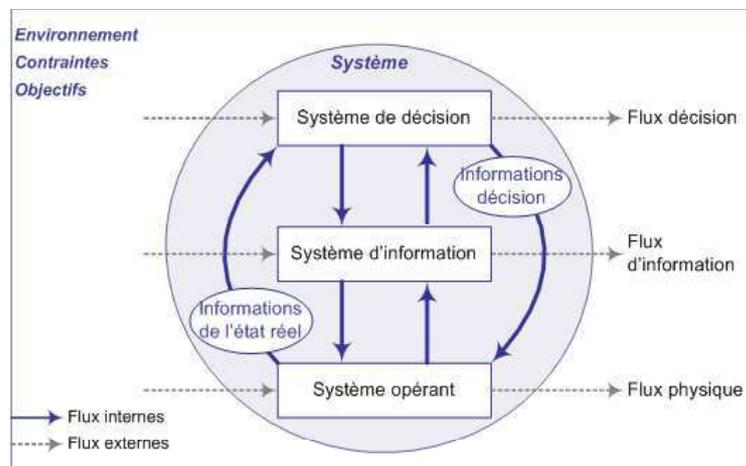


Figure I.2 : décomposition classique d'un système en trois sous-systèmes

Ceci implique deux niveaux de risques dans la prise de décision. Une décision peut s'avérer inadaptée :

- soit parce que le système de décision est mal conçu et/ou mauvais,
- soit parce que les informations sur lesquelles il se fonde sont erronées.

Considérons un exemple très simple. Dans une gestion de stock à point de commande, on passe une nouvelle commande lorsque le stock restant atteint un seuil  $s$  donné. Si on tombe quand même dans une situation de pénurie :

- (i) soit la valeur du seuil  $s$  a été mal calculée (erreur du système de décision),
- (ii) soit l'information que le stock réel a atteint le seuil  $s$  n'a pas été transmise au moment opportun et la commande a été déclenchée trop tard par le système de décision.

Avec l'arrivée de l'automatique, des technologies informatiques et des logiciels industriels à tous les niveaux des systèmes de production, on dispose actuellement de moyens de plus en plus performants pour remonter les informations du terrain vers les systèmes d'informations. Paradoxalement, les risques d'erreurs croissent aussi. Arriver à faire

coïncider système réel et système d'information est d'autant plus crucial que l'on travaille en temps réel. Dans le chapitre trois, nous traiterons ces aspects dans le cas particulier d'un atelier de production et des bases de données gérées par un logiciel de type MES.

Selon l'approche automatique [Breuil, 1984], on retrouve derrière le concept de pilotage un « système physique » ou partie opérative, qui effectue les opérations réelles et un « système de commande ». La partie opérative effectue les opérations ordonnées par la partie commande. La partie commande élabore les ordres à partir des informations et des retours venant de la partie opérative et des objectifs assignés.

Pour [Doumeingts, 1984], piloter un système c'est « assigner à chaque partie du système un ou plusieurs objectifs à atteindre ». Par nature, le système est donc finalisé. Les activités de pilotage ont pour rôle de guider chacune des parties du système vers ses objectifs. Le système doit, là aussi, posséder des dispositifs de retour d'information et de « feed back » pour assurer la concordance entre les objectifs assignés et les résultats obtenus. Cette définition laisse ouvert le problème de la cohérence entre les objectifs des sous-systèmes et du système complet.

[Lorino, 1992] place l'objectif global de l'entreprise au centre du processus de pilotage. Pour lui, piloter, c'est définir des règles de comportement cohérentes avec cet objectif global. En termes actuels, on retrouve la notion de processus. L'objectif global de l'entreprise est l'aboutissement d'un ensemble d'activités liées, autrement dit d'un processus. Piloter c'est donc :

- déterminer le processus supérieur de l'entreprise,
- décliner ce processus en sous processus,
- assurer que chaque activité participe en cohérence avec les autres à l'atteinte de l'objectif global.

Par la suite, [Lorino, 1997] assimile la performance de l'entreprise au surplus que dégage l'entreprise (différence entre la valeur fournie et les ressources consommées). En termes de processus on parlerait maintenant de création de valeur ajoutée monétaire. Nous verrons par la suite que, dans le contexte actuel, la valeur créée par une activité doit s'estimer en termes plus larges que le simple flux financier (qualité, réactivité, délais). *In fine*, au niveau de l'entreprise, la performance se traduira par des rentrées monétaires. Dans ce cadre, le pilotage tente de répondre à la question suivante : quelles sont les règles d'actions et de décisions à mettre en œuvre au niveau de chaque activité pour assurer à l'entreprise une création de valeur suffisante.

Le fait que le pilotage doive se décliner au niveau de l'activité pose de nombreux problèmes, en particulier :

- (i) comment assurer que les objectifs particuliers et parfois contradictoires de chaque activité convergent vers l'objectif global,
- (ii) comment gérer les interdépendances entre les activités : une action menée sur une activité peut influencer en cascade la performance des activités qui la suivent,
- (iii) comment synchroniser des activités en parallèle qui concourent à une même réalisation et gérer les décalages temporels entre activité en série.

De nombreux auteurs restreignent le pilotage de la production au pilotage de l'atelier proprement dit et au temps réel. [Trentesaux, 1996] définit le pilotage comme « la structure de décision et d'information associée à la gestion en temps réel ». Ce pilotage en temps réel comprend deux sous-fonctions liées par une boucle de rétro action :

- (i) la conduite, qui est la fonction décisionnelle qui donne les ordres,
- (ii) la commande, qui exécute les ordres décidés par la conduite et lui retourne les données de suivi.

Pour [Grabot et Huguet, 1996], le pilotage permet la production court terme de l'atelier en accord avec les objectifs établis par la gestion de production et en adaptant la production aux perturbations pouvant survenir au niveau de l'atelier et de son environnement.

Pour terminer ce tour volontairement restreint de la littérature, nous présentons la définition de l'APICS. Ce terme de pilotage d'atelier au sens général, ou « Production Activity Control » [Apics, 2005], est la fonction qui consiste à faire cheminer et à répartir le travail à exécuter dans les unités de production ainsi qu'à piloter les fournisseurs. Le pilotage d'atelier recouvre les principes, méthodes et techniques nécessaires pour ordonnancer, piloter, mesurer et évaluer l'efficacité des opérations de production. Dans le cas particulier d'un atelier manufacturier ou « Shop Floor », la gestion et le pilotage utilisent les données en provenance du terrain pour mettre à jour et communiquer la situation des ordres de fabrication et des centres de charge, ainsi que pour contrôler les mouvements de matières dans l'usine. Les sous-fonctions principales de la gestion d'atelier sont les suivantes : affecter une priorité à chaque ordre de fabrication, gérer le niveau des en-cours, donner la situation des ordres de fabrication, communiquer les sorties réelles pour gérer la capacité, fournir la quantité par emplacement et par ordre de fabrication pour gérer et comptabiliser les en-cours et mesurer l'efficacité, l'utilisation et la productivité de la main-d'œuvre et des machines. Les sous-fonctions principales du pilotage des flux sont basées d'abord sur les cadences de production et sur un chargement d'atelier correspondant, puis sur le contrôle et la gestion de la production.

#### **I.4. Fonctions génériques du pilotage de la production**

D'après [le Moigne, 1974], « décider » c'est identifier et résoudre les problèmes que rencontre toute organisation. La conduite des systèmes de production peut se décrire selon les trois niveaux hiérarchiques de décision : stratégique, tactique et opérationnel qui correspondent respectivement à des décisions à long terme, moyen terme et court terme.

- (i) Les décisions stratégiques sont les décisions qui introduisent des orientations durables de l'entreprise sur un horizon long terme. On rangera dans cette catégorie, par exemple, les décisions concernant l'implantation de nouvelles unités de production, la conception d'une nouvelle ligne de production, les décisions portant sur de nouvelles orientations en termes de produits ou de marchés. Si une réflexion stratégique est nécessaire tout au long de la vie de l'entreprise, les questions stratégiques se posent plus particulièrement quand l'entreprise affronte des changements importants tels qu'une hausse ou une baisse significative des demandes ou encore une fusion ou une cession d'une partie de l'activité.

- (ii) Les décisions tactiques concernent la mise en œuvre et l'adaptation des décisions prises au niveau stratégique sur une période plus courte. Elles concernent particulièrement la planification mensuelle de la production afin de répondre à la demande, des flux matières tout au long de la chaîne logistique (approvisionnements, production, stockage, distribution) et la gestion des ressources en hommes et équipements.
- (iii) Les décisions opérationnelles nous intéressent plus particulièrement. La décision à ce niveau met en application le plan d'actions prévu par le niveau tactique. Ce sont les décisions qui concernent les actions à court terme, comme par exemple l'ordonnancement de la production. La procédure de prise de décision intervient durant la production de deux façons : de façon périodique ou événementielle. Dans le premier cas, le déclenchement de la procédure de prise de décision est régulier et il est fait à des intervalles de temps réguliers. Dans l'autre cas, le déclenchement repose sur l'apparition d'événements dans le système. Par la suite, nous détaillerons ces deux cas en les appliquant sur une ligne expérimentale.

Si l'on s'intéresse plus spécifiquement aux activités de gestion de production manufacturière, on va retrouver classiquement cinq fonctions essentielles présentées dans la Figure I.3.

#### **I.4.1. Planification**

La planification de la production se décline sur les trois niveaux de décision. Elle part d'une vision à long terme sur les évolutions du marché, en prenant en considération les risques et opportunités de l'environnement (concurrence, fournisseurs, évolution des législations et des technologies...). Cette vision long terme est concrétisée sous forme d'un business plan (ou plan d'entreprise). Au niveau tactique, le plan industriel et commercial ou PIC va définir un compromis entre les objectifs marketing, financiers et la production. Enfin la planification sur un plus court terme va établir le plan directeur de production (PDP). Ce plan intègre les commandes fermes et/ou prévisionnelles et les retards de livraison. Ce PDP constitue l'entrée du système de pilotage d'atelier.

#### **I.4.2. Programmation**

Elle est chargée, à partir du plan directeur de production, d'établir un programme prévisionnel de production atelier par atelier, à capacité infinie ou suivant une charge globale admissible par l'atelier. Ce programme prend en compte les besoins dépendants et indépendants et calcule des besoins nets en fonction des stocks, des en-cours, des tailles des lots de fabrication, des taux de rebut... La programmation consiste essentiellement à décliner les objectifs de la planification en ordre de fabrication (OF) sur les différents ateliers et postes de travail et reste dans une logique de définition du « quoi produire ».

#### **I.4.3. Ordonnancement ou séquençement**

Ordonnancer, c'est programmer dans le temps l'exécution des tâches à réaliser sur une ressource particulière (comme une machine) ou groupe de ressources (comme un atelier). L'ordonnancement fournit donc un calendrier d'organisation du travail pour l'atelier fixant les dates de début et de fin de chaque tâche. Séquencer consiste plus simplement à déterminer l'ordre dans lequel les différentes tâches ou les différents produits passeront sur une ressource

ou un groupe de ressources. Les dates de début et de fin de chaque tâche ne sont donc pas explicitement fixés. Dans les deux cas, l'objectif est de réaliser les OF du programme prévisionnel (délais, quantité, qualité, etc.) tout en cherchant à optimiser l'utilisation des moyens de production en termes de charge, d'en-cours etc.

L'ordonnancement doit respecter les contraintes de succession dues aux gammes de fabrication et les contraintes technologiques. Il est basé sur des calculs de charge, de temps moyen de fabrication et de respect du délai. Un ordonnancement, aussi bon soit-il, ne peut atteindre tous les objectifs, généralement contradictoires. Généralement, il retient comme critère essentiel le respect des délais (minimisation des retards ou des retards pondérés). On se rapproche ici de la définition du « comment produire ».

#### **I.4.4. Conduite**

La phase de conduite est chargée de réaliser la production prévue par l'ordonnancement. Comme on l'a vu, ce dernier fournit une solution réalisable à son niveau, solution qui n'est pas toujours une solution « réalisable » au niveau de la conduite. Une des raisons de cet écart réside dans le caractère rigide des données et contraintes prises en compte pour établir l'ordonnancement prévisionnel.

Cette phase doit régler tous les problèmes non résolus par le niveau prévisionnel (charges ou contraintes locales). Elle doit aussi prendre en compte l'ensemble des contraintes de fabrication (contrôles de la qualité, arrêts liés à la maintenance), les problèmes posés par les opérateurs (niveau de qualification, compétences, etc.), toutes présentes à ce niveau, et réagir aux aléas pour que la production prévue soit possible. De fait, l'état réel du système productif n'est parfaitement connu qu'à l'instant du lancement réel d'une opération.

Nous sommes ici dans l'opérationnel. Dans cette phase, les problèmes d'affectation de ressources doivent être résolus en temps réel (réponses aux questions quand et avec quoi produire). Il n'est pas étonnant que les performances réellement obtenues au sein d'un atelier soient souvent éloignées de celles initialement prévues par les phases prévisionnelles amont.

La conduite constitue la fonction charnière entre la gestion prévisionnelle et la gestion temps réel du système de production. Le paramètre temps et la rapidité de réponse sont primordiaux dans cette phase.

#### **I.4.5. Commande**

Ce niveau, directement en relation avec le système de production, a un rôle d'interface et d'interpréteur. Sa tâche essentielle est de traduire un ordre en une séquence d'instructions compréhensibles par la partie opérative. Il est concrétisé soit par un opérateur pilotant une machine et assurant le suivi de réalisation, soit par un automatisme capable d'interpréter un ordre et de renseigner la conduite sur l'état d'avancement de celui-ci.

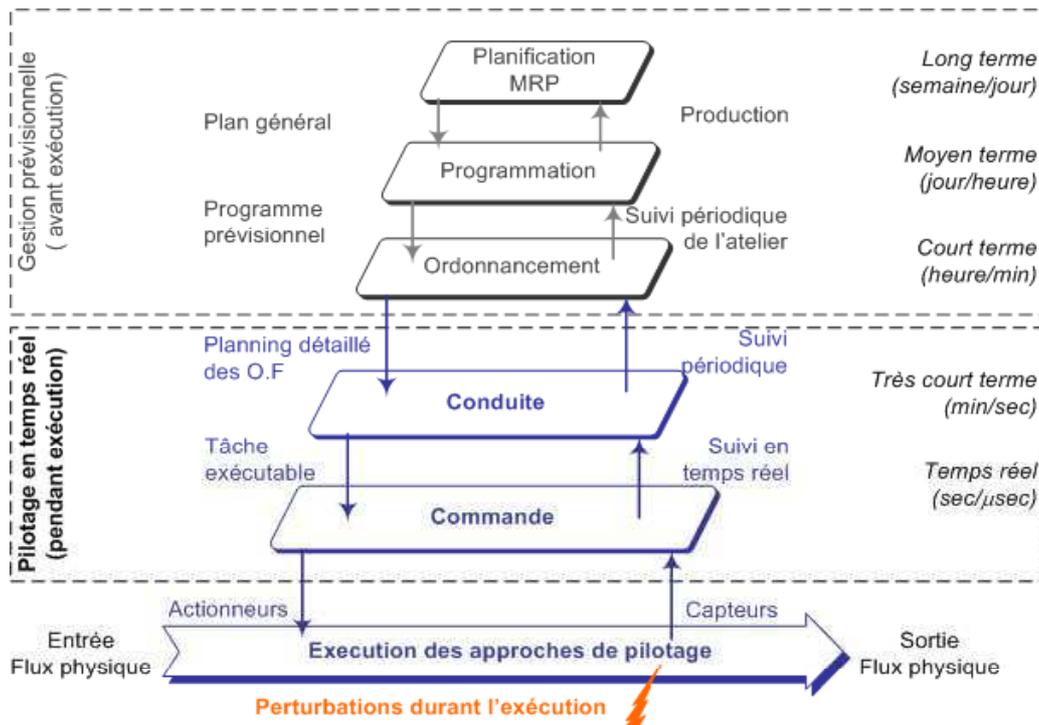


Figure I.3 : fonction générale du pilotage dans la production

Lorsque le système n'est pas perturbé, les phases s'enchaînent les unes après les autres, chacune fixant le cadre de travail de la suivante et optimisant à son niveau :

- la planification aboutit à la définition des références à produire en réponse à la demande,
- la programmation éclate la production en ordre de fabrication à réaliser sur les postes de travail,
- l'ordonnancement fournit les dates de début et de fin de chaque tâche sur la ressource considérée,
- la conduite réalise l'ordonnancement.

En cas de perturbation interne ou externe, la réponse va dépendre de l'amplitude de cette perturbation : une simple panne sur une machine peut être traitée par la conduite, l'arrêt total d'un équipement entraîne une réaction au niveau de la programmation. Certains imprévus sont plus complexes. Par exemple, une commande imprévue pourra remettre en question :

- la planification, si elle demande de mobiliser de nouvelles ressources,
- la programmation, si les ressources nécessaires sont disponibles, mais qu'elle comporte un sous-ensemble qui doit faire l'objet d'un nouvel OF,
- l'ordonnancement, si elle est réalisable, mais doit simplement s'insérer dans le flux de production,
- la conduite.

Plus la réaction se fait dans les niveaux bas, plus on sera réactif.

## **I.5. Finalités des systèmes de pilotage de la production**

Nous avons souligné que, dans un système de pilotage, la cible dépendait des finalités du système considéré. La question à laquelle nous voulons répondre dans cette partie est de déterminer ce qu'est la finalité d'un système de production. Si la littérature traite abondamment du pilotage, de manière surprenante, cet aspect est passé sous silence. Dans l'environnement actuel, fortement concurrentiel, avec des produits de plus en plus souvent personnalisés, les productions se font de moins en moins répétitives. Dans un tel environnement dynamique et fortement perturbé, les entreprises se doivent d'accroître la réactivité et la flexibilité de leur système de production. Réaliser la production demandée pour satisfaire les clients dans les délais prévus, avec la qualité requise, tout en restant financièrement en bonne santé, constitue un défi de plus en plus difficile.

Dans ce cadre, la finalité des systèmes de production manufacturière est donc d'assurer qu'à tout moment la production réalisée satisfasse les trois impératifs suivants [Dupont, 1998] :

- (i) répondre à la demande client,
- (ii) fournir à la production proprement dite (ateliers, opérateurs) les conditions de travail les plus satisfaisantes possibles,
- (iii) donner à l'entreprise les moyens financiers nécessaires pour assurer sa pérennité.

Nous allons détailler ces trois impératifs et voir, en particulier, les indicateurs de performance qui s'y rattachent. Ces indicateurs sont de diverses natures selon le type d'entreprises et les priorités fixées.

### **I.5.1. Répondre à la demande client**

On assiste depuis quelques décennies à un glissement d'une économie de production, dans laquelle les clients achètent ce que les entreprises produisent de manière standard, à une économie de marché où les entreprises doivent répondre à des demandes clients personnalisées et de moins en moins prévisibles. Cette évolution a contraint les entreprises à considérer « le besoin client » comme base de toute réflexion et à organiser leurs processus internes (la production) et externes (la logistique) sur cette base. Pour mesurer la satisfaction client dans le processus de production, les entreprises, en prise directe avec le marché, se sont focalisées essentiellement sur le triptyque « Coût, Qualité, Délai ». On trouvera ainsi des indicateurs sur le coût en sortie d'usine, le pourcentage de clients livrés à temps, le pourcentage de produits retouchés, rebutés ou retournés par le SAV. Pour des entreprises livrant à la commande ou produisant des biens de consommation courante, les indicateurs porteront sur les volumes de production ou sur les stocks de sortie.

### **I.5.2. Fournir aux ateliers des conditions de travail satisfaisantes**

Le second rôle essentiel d'un système de production, rôle qu'on oublie parfois tellement il est implicite, est de permettre sur le terrain que la production s'effectue dans les « meilleures conditions possibles ». Là aussi, ceci va se décliner de manière différente selon les entreprises. Dans un premier temps, ceci implique au moins que les ressources nécessaires à la production soient présentes. Ces ressources sont tout aussi bien les ressources humaines (en nombre et en qualifications), les équipements que les matières et composants entrant dans la composition des produits finis. Les indicateurs liés aux conditions de travail peuvent donc

porter sur la main-d'œuvre (comme lissage des charges horaires, nombre d'heures d'inactivité pour manque de matières, nombre d'heures supplémentaires), sur les équipements (taux d'activité, nombre d'heures d'utilisation) ou sur les approvisionnements (nombre de réapprovisionnement d'urgence, taux de rupture).

### **I.5.3. Donner à l'entreprise les moyens financiers qui lui sont nécessaires**

La rentabilité d'une entreprise manufacturière repose entièrement sur les ventes des produits qu'elle fabrique. La majeure partie des coûts des produits est due aux coûts matières et main-d'œuvre directe, donc aux coûts engagés par le système de production. Les indicateurs pertinents seront ici les indicateurs financiers de rentabilité de l'entreprise « *ROE, return on equity* » ou de rentabilité économique « *ROCE, return on capital employed* ». Au niveau de l'atelier, on trouve aussi la marge dégagée sur coût direct (différence entre les ventes et les coûts directement imputables à la production : main-d'œuvre, matières, stockage...).

Idéalement, les trois impératifs doivent être satisfaits. Fondamentalement, on a donc affaire à des problématiques multicritères. Bien souvent, on tourne la difficulté en gardant comme seul objectif la maximisation de la rentabilité. L'impératif de satisfaction de la demande est assuré par des contraintes de taux de service minimum et la prise en compte des conditions de travail par des contraintes de charge de travail maximum. C'est le cas des modèles bien connus de planification de la production par programmation linéaire. Les variables de décision de base correspondent au nombre  $X_{ij}$  de produits  $i$  à fabriquer sur la période  $j$  et au nombre  $S_{ij}$  de produits  $i$  en stock à la fin de la période  $j$ . Les demandes à assurer et les approvisionnements disponibles sont considérés comme des paramètres d'entrée. Les conditions de travail sont prises en compte sous forme de contraintes charges/capacité sur les équipements, la main-d'œuvre et les matières.

## **I.6. Évolution des systèmes de production et de leurs objectifs**

Soulignons aussi que l'importance donnée à chacun des impératifs a évolué au cours du temps et varie selon les entreprises. Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, la production industrielle n'a cessé de se diversifier et de devenir plus complexe. Schématiquement, on peut considérer que les systèmes de production se sont progressivement structurés afin de se mettre en parfaite adéquation avec les divers modèles économiques et sociaux de leur époque.

Nous pouvons distinguer trois phases successives dans l'évolution des modèles production/consommation. Chacune de ces phases est accompagnée d'un modèle de production particulier, entraîne pour l'appareil de production une organisation particulière afin de répondre au mieux à la demande et dicte des objectifs différents.

### **I.6.1. Modèle de « production de masse »**

Le premier modèle est celui de la « production de masse » ou « mass production ». Ce modèle, intimement lié aux noms de Ford et Taylor, représente l'avènement du phénomène de consommation de masse et de la production en grande série de produits standardisés. Techniquement, la production de masse est associée au développement des chaînes de production et à l'introduction massive de la mécanisation au sein de la fonction production. Sur le plan humain, c'est l'Organisation Scientifique du Travail (O.S.T.), développée par

Taylor dès 1903 dans son livre « Shop Management », qui prime. L'Organisation Scientifique du Travail repose sur les grands principes suivants :

- la division des tâches : les fonctions de conception, de coordination, de contrôle et d'exécution doivent être nettement distinguées et effectuées par des acteurs différents. Les responsabilités sont clairement attribuées aux cadres. On aboutit de fait à une division sociale du travail entre les ouvriers (exécutants), les chefs d'atelier (coordination, contrôle) et les ingénieurs du bureau des Études et des Méthodes (conception),
- la parcellisation des tâches : les tâches doivent être relativement simples et rapides à exécuter, d'où une parcellisation du travail global,
- la spécialisation : chaque salarié doit toujours effectuer le même travail,
- l'individualisation : le travail doit être pensé de manière à ce que les ouvriers puissent l'effectuer sans avoir à communiquer avec qui que ce soit,
- la rationalisation du travail : les gestes doivent être simplifiés au maximum. Les travailleurs font l'objet d'un entraînement et d'un chronométrage,
- la motivation se fait par la rémunération à la pièce.

Structurellement, le taylorisme est accompagné d'une organisation pyramidale de l'entreprise, ce qui entraîne un cloisonnement intensif des différentes fonctions. Dans les ateliers, on aboutit ainsi à la stricte séparation des tâches d'exécution (exécutées par les opérateurs) et les tâches de décision (dévolues à la maîtrise). Cette organisation est entièrement orientée vers la compétitivité par les prix, élément central de concurrence. Le pilotage se fait essentiellement sur des indicateurs de coûts, le plus souvent en se basant sur les coûts directs de production.

### **I.6.2. Modèle de « production au plus juste »**

Avec la fin des trente glorieuses (1945-1975) et l'émergence du « client roi », demandeur de produits de qualité et de séries limitées, la production de masse et le taylorisme deviennent inadaptés. Les consommateurs exigent des produits différenciés et un taux de renouvellement rapide. Il faut pouvoir s'adapter aux productions en petite série ou avec une forte diversité, ce qui nécessite de fréquents changements de postes, de nouveaux réglages machines, etc. Par ailleurs, l'automatisation modifie les techniques de production et crée de nouvelles exigences professionnelles. Les Japonais, confrontés dès les années 1945-50 à ces nouvelles contraintes, vont s'appuyer sur leurs ouvriers pour augmenter la flexibilité de leurs entreprises. De nouvelles pratiques apparaissent : la polyvalence, la poly compétence, l'enrichissement des tâches. C'est l'essor du modèle japonais de Toyota et de la « lean production » ou « production au plus juste », qui va laminier la « mass production ». Les entreprises ont alors dû s'adapter aux besoins de leur clientèle, améliorer la qualité et réduire leurs délais. Elles ont ainsi cherché à élargir leurs gammes de produits afin d'exploiter commercialement les particularités des individus-clients.

Adapter la production, que ce soit en volume ou en mix, aux aléas de l'activité (variation du marché, incidents de production, problème d'approvisionnement), demande de pouvoir redéfinir de manière souple les postes de travail. Ceci peut se faire en privilégiant la flexibilité des équipements. Une autre possibilité consiste à se suréquiper et à déplacer les opérateurs sur les postes ou les machines. Par exemple, sur une ligne en U comportant quatre

machines, on mettra quatre opérateurs (un par machine) pour un rythme de production maximum, deux opérateurs s'occupant chacun de deux machines pour une production moyenne et un seul opérateur pour une production faible. La mise en œuvre de ce type d'organisation nécessite d'une part que les opérateurs puissent travailler efficacement sur les différents postes (polyvalence), mais aussi qu'ils soient capables de s'adapter rapidement. De plus, les Japonais vont déléguer peu à peu aux opérateurs une partie du contrôle qualité (juste-à-temps, TQM), des opérations de maintenance (5S, TPM). La séparation voulue par Taylor entre les diverses catégories s'estompe. Les opérateurs réalisent des tâches plus variées, qui demandent aussi des capacités d'analyse et de réflexion. Cet enrichissement des tâches suppose un personnel bien formé, polyvalent, avec de multiples compétences et surtout, qui accepte de prendre des responsabilités et de s'investir.

La concurrence entre les entreprises est axée non seulement sur les coûts, mais aussi sur la qualité, les délais et la diversité de l'offre. L'arrivée massive du management de la qualité dans les ateliers va impacter leur pilotage. La maîtrise statistique des processus permet de remédier aux causes de variabilité assignables et les cartes de contrôle utilisées en cours de production vont permettre aux opérateurs d'agir préventivement en cas de dérives de la qualité. L'auto-contrôle et le contrôle au poste suivant permettent de limiter la diffusion de la non-qualité dans le processus de fabrication, mais en contrepartie, crée de l'incertitude sur les durées de production et augmente le risque d'arrêts non prévus et de rupture de flux. La formalisation des procédures résultant de l'assurance qualité, des normes ISO 9000, va tout à la fois stabiliser les processus de production et rigidifier la prise de décision. Les diverses méthodes de l'amélioration continue (5S, SMED, Kaizen etc.), très chronophages, font évoluer elles aussi le pilotage.

### **I.6.3. Modèle de « production personnalisée »**

Depuis une vingtaine d'années, on voit l'émergence d'un troisième modèle de « production personnalisée » ou « mass customization » dans lequel le défi est de fournir de manière massive des produits totalement personnalisés. L'entreprise ne doit plus seulement fournir, au juste prix, un produit adapté à la demande du client, elle doit fournir le produit désiré par un client bien identifié.

La concurrence porte aussi sur les services connexes à la production. Ainsi, les services avals (livraison, suivi des commandes, service après vente) font l'objet d'une concurrence tenace. Il ne s'agit plus pour l'entreprise de suivre la demande de sa clientèle, mais bien de la devancer afin de fournir au client, au moment où la demande se crée, le produit adapté.

Ces transformations de l'organisation impactent fortement le rôle des opérateurs. Une des idées fortes consiste à responsabiliser et rendre autonomes les différents acteurs de la production. Plus généralement, le management et le processus de décision sont décentralisés et descendus au plus proche du terrain :

- les nouvelles formes d'organisation reposent en grande partie sur l'implication et l'initiative des opérateurs. Ceux-ci sont amenés à participer directement à l'organisation de la production et à collaborer, au moins à titre consultatif, à la prise de décision. Ceci implique un partage de l'information et une remise en question notamment du rôle de la maîtrise intermédiaire. Ainsi, les opérateurs en équipes autonomes travaillent sans la présence permanente de leur supérieur hiérarchique. Le nombre de niveaux hiérarchiques a tendance à diminuer,

- le personnel doit être polyvalent, assurer des fonctions de production, de contrôle qualité et de maintenance des machines. Il est indispensable de le former en permanence, de le sensibiliser à la politique qualité etc,
- dès lors qu'ils sont rendus autonomes, les responsables d'ateliers ont dû apprendre à intégrer, dans leur mode de fonctionnement, des perturbations plus ou moins « attendues » sans pour autant baisser les cadences ou augmenter les coûts de production.

La réduction généralisée des stocks résultant de la « *lean production* » et accentuée par la « *mass customization* » supprime l'indépendance entre les sous-systèmes. Grâce à la présence de stock, l'entreprise pouvait travailler sans se préoccuper de la gestion interne de ses fournisseurs, un atelier pouvait optimiser localement son fonctionnement sans se préoccuper des ateliers avec qui il est relation. Une entreprise sans stock devient ainsi un système plus complexe à gérer, ce qui multiplie le risque d'erreur et aussi un système beaucoup plus fragile, puisque tout incident à quelque endroit que ce soit va se propager tout au long de la chaîne. D'où la nécessité de considérer maintenant la chaîne fournisseur client dans son ensemble « *Supply Chain Management* » et de se focaliser, en interne, sur la gestion des flux pour éviter les ruptures de flux sur les postes de travail. Le pilotage par les flux se veut flexible en permettant par exemple le re-routage des flux ou en utilisant des gammes de fabrication alternatives afin de gérer au mieux l'occupation des ressources.

## I.7. Flexibilité et réactivité

Ces nouvelles tendances s'accompagnent, pour la fonction production, de contraintes extrêmement fortes en termes de qualité et délais notamment, tant au stade de la conception qu'au stade de l'usage :

- (i) alors que les modèles précédents s'accompagnaient d'une certaine pérennité de l'appareil de production, le renouvellement rapide s'accompagne d'une remise en cause perpétuelle de l'outil de production, réduisant d'autant le délai dévolu à sa conception,
- (ii) les produits sont de plus en plus élaborés et doivent respecter des cahiers des charges de plus en plus stricts et exigeant en termes de qualité, de fiabilité, de tolérance. De plus, la production est souvent soumise à des normes renforcées : ISO 9000, ISO 14000, audits fournisseurs, AFAQ,
- (iii) la décentralisation des processus de décision a conduit à généraliser la recherche d'une flexibilité et d'une réactivité maximale.

Les appareils productifs doivent devenir flexibles et être capables de se reconfigurer en fonction de la demande. Dans sa définition générale, la flexibilité traduit l'aptitude d'un système à changer facilement et à moindre coût pour pouvoir s'adapter aux circonstances. Pour beaucoup, la flexibilité constitue le mode privilégié de réponse à l'instabilité et à l'imprévisibilité de l'environnement. Mais s'il y a accord sur le terme, il n'y a pas toujours accord sur le contenu. Dans les faits, on constate que la flexibilité est multiforme et peut porter aussi bien sur les équipements (ateliers flexibles), sur les hommes (polyvalence), l'organisation etc. La racine latine du terme flexibilité est le mot : *flexere* (fléchir), verbe d'action exprimant une transformation d'un état vers un autre. La flexibilité d'un système est relative à sa capacité à changer d'état. Comme le roseau, l'entreprise flexible « plie mais ne rompt pas ». Au sens très large du terme, la flexibilité permet à l'entreprise de changer pour

survivre aux transformations de son environnement. Grossièrement, une entreprise a trois manières de rester en adéquation avec son environnement :

- (i) réagir aux aléas (tels que : pannes machines, absence d'un composant) et utiliser ses mécanismes de régulation pour les absorber.
- (ii) s'adapter aux variations de l'environnement (par exemple : variation de la demande, action commerciale des concurrents). Cette flexibilité exige une capacité à agir rapidement sur les trois éléments de base de l'entreprise :
  - ses produits (conception modulaire, différenciation retardée),
  - ses processus et ressources (ateliers flexibles, polyvalence des opérateurs),
  - son organisation (choix des fournisseurs, réseau logistique),
- (iii) agir sur l'environnement afin d'engendrer des modifications favorables à l'entreprise (ex : créer de nouveaux besoins, imposer de nouvelles normes).

Appliquée aux systèmes de production, cette définition nous conduit à considérer la flexibilité comme : la capacité d'un système de production à gérer la variabilité de la production et à s'adapter à son environnement de façon économique et continue. La flexibilité dans les ateliers a donné lieu à de nombreux travaux. En général, on distingue principalement la flexibilité en volume et la flexibilité en variété d'un même produit (mix produit).

Si la flexibilité est la capacité à gérer des productions différentes, la réactivité concerne, elle, la capacité à réagir de manière prompte aux aléas qu'ils soient d'origines interne (bris d'outil, panne de machine, accident...) ou externe (rupture d'approvisionnement, modification de commande).

La flexibilité et la réactivité, au niveau des ateliers, peuvent s'obtenir en jouant essentiellement sur les ressources humaines et sur les équipements. En ce qui concerne les ressources humaines, deux voies sont offertes :

- (i) jouer sur l'organisation du travail : le chemin allant de l'Organisation Scientifique du Travail au groupe autonome est fondamentalement une recherche de flexibilité et la réactivité,
- (ii) jouer sur l'aménagement du temps de travail :
  - en faisant varier le nombre d'opérateurs (adaptation quantitative),
  - en utilisant la compétence des opérateurs (adaptation qualitative),
  - en modulant le nombre d'heures effectuées par chacun (aménagement du temps de travail),
  - en modifiant la durée d'ouverture de l'entreprise (aménagement du mode de travail).

En ce qui concerne les équipements et les moyens de production, la flexibilité est créée essentiellement en jouant sur la surcapacité (donc sur le quantitatif) et sur l'automatisation (le qualitatif). La surcapacité consiste à se suréquiper et à dupliquer certains équipements. Très souvent, ceci est couplé à la polyvalence des opérateurs. Avec le développement de l'automatisation, des nouvelles technologies et de l'informatique, on a vu apparaître dans les ateliers des équipements polyvalents en interaction plus ou moins complète. Du plus simple au plus complexe, on peut distinguer :

- (i) les machines outils à commandes numériques (MOCN) :
  - initialement à bandes perforées,
  - actuellement électroniques et programmables,
- (ii) les MOCN avec magasins porte-outils,
- (iii) les robots d'usinage (robots soudeurs, etc.),
- (iv) les cellules flexibles constituées autour d'un groupe de MOCN desservies par des robots de transferts,
- (v) les centres d'usinage constitués autour d'un groupe de MOCN desservies par un système de palettisation,
- (vi) la ligne flexible automatique qui est un atelier de production constitué de cellules flexibles ou de centres d'usinages, de systèmes automatiques de chargement et déchargement, d'un système de transfert (convoyage par chaîne, palettes, chariots filoguidés). De plus, la production est contrôlée par un système informatique, ce qui demande l'ajout :
  - de capteurs sur la ligne,
  - d'automates ou d'ordinateurs de contrôle,
  - d'un ordinateur central,
- (vii) l'atelier flexible (ou Flexible Manufacturing System, FMS) est constitué [GIA 94] « d'un ensemble de machines reliées par un système de manutention automatique, le tout contrôlé par un système central informatisé ». L'atelier flexible doit permettre des cycles de fabrication complexes, variables, passant par des machines différentes ou dans un ordre différent. Ces caractéristiques le distinguent de la ligne flexible (un cycle de fabrication, plusieurs usinages possibles) et de la cellule flexible qui n'effectue généralement qu'un nombre restreint d'opérations sur une même pièce.

## I.8. Typologie des structures de pilotage

Enfin, les systèmes de pilotage peuvent s'organiser selon diverses architectures. Nous établissons une description et une comparaison de chacune d'entre elles.

### I.8.1. Structure centralisée

Il s'agit de l'approche la plus classique et la plus ancienne. Ici, toutes les ressources sont pilotées par un centre de décision unique, qui supervise la production, synchronise et coordonne les différentes ressources et gère en temps réel les imprévus qui surviennent. Le pilotage se fait essentiellement sur la base d'un ordonnancement prévisionnel des différentes tâches (intégrant donc l'ensemble des ressources et des entités). Cet ordonnancement est calculé sur des valeurs moyennes des charges machines et des durées d'exécution. Ceci permet de conserver une certaine souplesse d'exécution (maintenance, réparation...) et de garder une petite marge de sécurité. Les perturbations limitées peuvent être absorbées. Les perturbations trop importantes entraînent le recalcul d'un nouvel ordonnancement. Cette approche est adaptée aux petits systèmes de production. Elle se rencontre fréquemment dans les petites entreprises où l'essentiel du pilotage consiste bien souvent à réordonner manuellement les tâches.

### **I.8.2. Structure hiérarchisée**

Dans le cas de systèmes de production plus complexes, on est amené à décomposer le système en sous-systèmes. Cette décomposition est effectuée :

- par fonctions (approvisionnement, ateliers, logistique aval),
- par horizons (court, moyen et long termes).

Dans un schéma de décision hiérarchisée, un centre de niveau supérieur coordonne et fixe un cadre de décision pour les niveaux inférieurs. Ce cadre de décision va leur fixer les objectifs et les contraintes à respecter. Les niveaux inférieurs se voient ainsi déléguer un certain degré d'autonomie de décision (dans le cadre fixé). En retour, ils doivent remonter au niveau supérieur des informations sur les résultats atteints. Chacune des structures est donc dotée de deux fonctions principales :

- une fonction de planification : les ordres reçus des niveaux supérieurs sont traités et décomposés en sous-ordres transmis au niveau inférieur,
- une fonction d'observation : chaque structure de niveau inférieur envoie un compte rendu à la structure de niveau supérieur. Celle-ci collecte les différents comptes rendus, les traite et émet à son tour un compte-rendu global vers le niveau supérieur.

Chaque structure va donc pouvoir gérer un certain nombre d'aléas à son niveau. L'apparition de perturbations de plus grande ampleur entraîne cependant la remise en cause des décisions des niveaux supérieurs. Par rapport au modèle centralisé, ce modèle permet de limiter l'impact des perturbations. Mais nous constatons l'absence de liaisons transversales entre les différents sous-systèmes.

### **I.8.3. Structure coordonnée**

Les liaisons entre les différents sous-systèmes de pilotage d'un même niveau (ex : production, maintenance) sont ajoutées dans la structure dite « coordonnée ». Cette architecture augmente la capacité de décision dans chacun de ces niveaux pour avoir une résolution locale des problèmes. La coopération entre les différents sous-systèmes de pilotage cherche à optimiser la réponse et à mieux réagir localement en cas d'apparition de perturbations.

De nombreux travaux de recherche s'intéressent à l'application de cette approche comme par exemple CODECO [Pellet, 1985], qui peut être considéré comme une extension, par l'intégration de la coopération intra niveau du modèle ORABAID. Chaque sous-système de pilotage du niveau inférieur organise ses fonctions localement selon ses contraintes et en collaboration avec les autres sous-systèmes de même niveau. La difficulté se situe dans la détermination du degré de liberté de décision pour chaque poste de conduite locale. Indiquons également le modèle de conduite PCS [Archimède, 1991], qui considère le développement d'une fonction de réactivité basée sur la définition et l'exploitation d'une typologie de perturbation.

#### **I.8.4. Structure distribuée**

Cette structure résout la difficulté rencontrée dans la structure coordonnée pour la communication et la circulation d'information entre différents niveaux. Elle est basée sur une répartition des capacités de décisions sur un ensemble de centres de pilotage. Cette approche est particulièrement adaptée dans les productions avec des flux simples, des demandes stables ou à faible variation et l'apparition d'aléas réguliers ou connus.

#### **I.8.5. Structure distribuée supervisée**

En général, cette structure offre des possibilités d'intercommunication des systèmes de pilotage de différents niveaux permettant l'échange d'informations et la transmission des décisions prises. Cette structure est caractérisée par la coopération entre les sous-systèmes dépendant d'un même système supérieur. Ce système supérieur sert à commander ou corriger une décision prise afin de satisfaire les objectifs plus globaux, car il a une vision plus large du processus de production dans l'entreprise. Nous pouvons citer certaines expériences, comme par exemple les travaux de [Brennan, 2000], [Tacquard *et al.*, 1995], [Trentesaux, 1996], qui présentent une structure avec une performance plus élevée au niveau de la réactivité et de la flexibilité. En effet, chaque élément a pour fonction de planifier sur ses sous-objectifs propres, de réagir face à des aléas et d'analyser les résultats. Un système superviseur contrôle le processus de production de façon plus générale pour établir les ratios de production sur plusieurs périodes, proposer différents choix lorsque les objectifs risquent de ne pas être atteints et synthétiser les résultats.

#### **I.8.6. Structure décentralisée**

Dans cette structure, tous les centres de pilotage sont au même niveau fonctionnel, ce qui la différencie de la structure distribuée. Il n'existe pas de centre de pilotage de niveau hiérarchique supérieur. Les centres de décision doivent s'auto-organiser pour assurer une gestion cohérente. Ces systèmes de pilotage totalement décentralisés sont restés marginaux, principalement en raison des problèmes de synchronisation entre les contrôleurs locaux.

La plupart du temps, on conserve une certaine structure hiérarchique. Les tâches de suivi de la production ou de lancement des opérations apparaissent comme des entités de haut niveau distribuant le travail aux autres modules. Les centres des différents niveaux sont interconnectés via des bus de communication permettant l'échange d'informations et la transmission des décisions. Ceci n'est rendu possible que par l'arrivée des nouvelles techniques informatiques (système d'information, bases de données partagées, logiciel de type MES) dans les ateliers de production.

### **I.9. Structure retenue par la suite**

Parmi les structures exposées précédemment, c'est la structure hiérarchisée qui a été adoptée le plus couramment dans les systèmes de taille importante. L'application quasiment automatique de cette structure hiérarchisée dans l'industrie présente des avantages importants, notamment au niveau de la maintenance du système de décision, de l'accessibilité plus aisée au système d'information, du traitement des informations, etc. Par sa nature hiérarchique, cette structure est particulièrement adaptée pour la mise en place d'une planification hiérarchique déclinant les décisions sur les trois niveaux long, moyen et court

termes. De plus chacun des niveaux peut décider sur les données agrégées les plus pertinentes pour son horizon de décision.

D'un autre côté, du fait du grand nombre de niveaux hiérarchiques, cette structure nécessite plus de circulation et d'échange d'informations entre les centres de décision, ce qui peut réduire la fiabilité des informations échangées et en conséquence réduire la qualité des décisions prises. La mise en place de cette structure dans l'industrie ne favorise pas la réactivité dans la prise de décision. En particulier, elle limite la coordination et la collaboration entre entités de même niveau, car il faut systématiquement transiter par le niveau supérieur. Cela signifie aussi accroître les difficultés lorsque l'on demande une modification dans le système de production.

Pour améliorer la réactivité, on a essayé de coupler structure coordonnée et structure hiérarchisée. L'utilisation d'un pilotage basé sur une telle structure coordonnée-hiérarchisée permet de prendre en compte premièrement les objectifs locaux grâce à l'aspect coopératif entre les différents centres de pilotage d'un même niveau, mais aussi les objectifs globaux de la production.

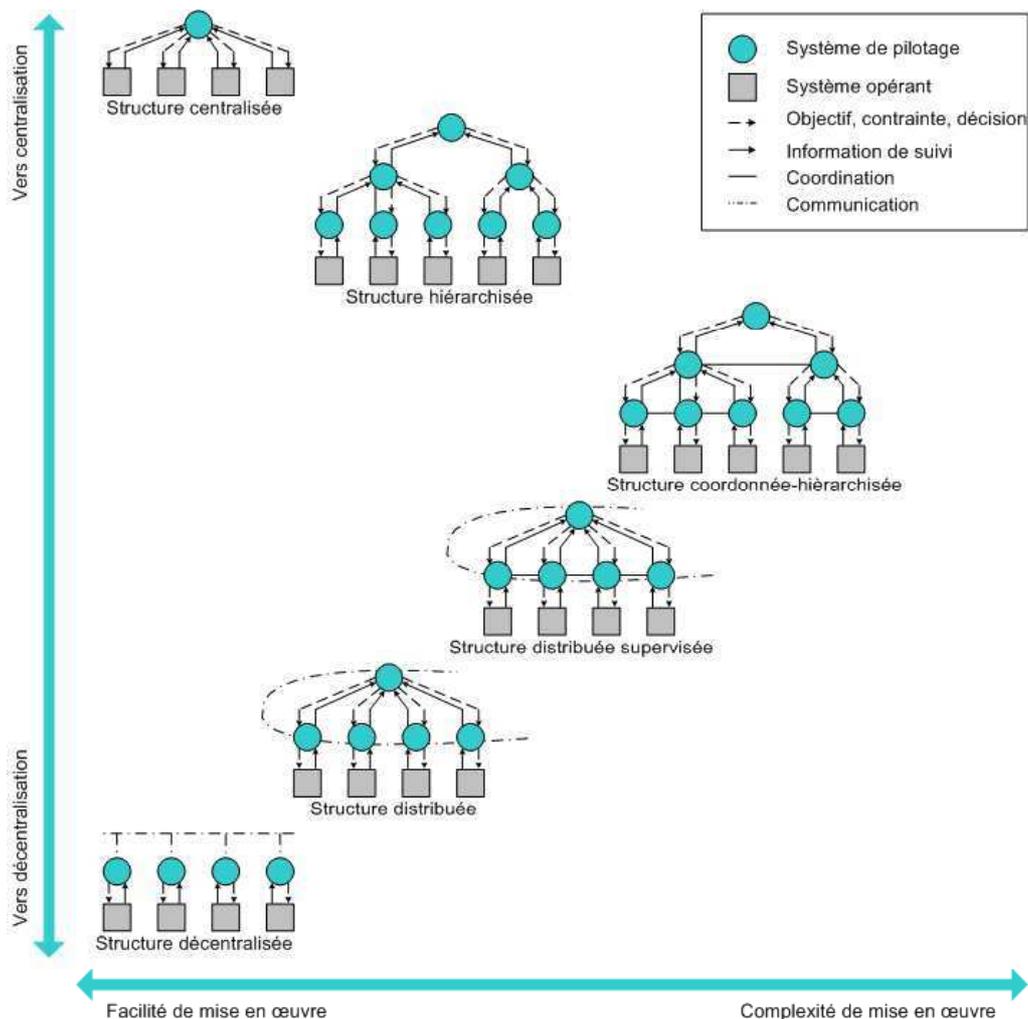


Figure I.4 : le positionnement des structures de pilotage

La Figure I.4 présente les différentes structures de pilotage expliquées ci-dessus. L'axe vertical de ce schéma représente l'aspect centralisation versus décentralisation de ces structures. L'axe horizontal les positionne selon leur facilité de mise en œuvre dans différents contextes industriels. Certaines structures s'appliquent plus facilement aux systèmes caractérisés par des flux produits linéaires, des demandes stables et avec des perturbations prévisibles. Les structures composites (distribuée supervisée, coordonnée hiérarchisée) se rencontrent plus dans les systèmes nécessitant de la flexibilité et de la réactivité face aux aléas.

Dans nos travaux, nous voulons montrer l'intérêt de coupler un logiciel de type MES et un logiciel de simulation pour en faire un outil de pilotage de la production. Le MES fournit en particulier la capacité de remonter et d'analyser les informations de suivi remontant du système opérant. La simulation, de son côté, offre un potentiel d'analyse des différentes phases du cycle de vie d'un système, et ce, pour tous les flux industriels et à tous les niveaux hiérarchiques. Pour que cet outil puisse donner toute sa mesure, nous nous plaçons dans le cadre d'une structure coordonnée-hiérarchisée.

## **I.10. Typologie du pilotage selon l'origine de perturbation et selon la période de lancement**

L'industrie manufacturière est contrainte d'améliorer son pilotage d'atelier au niveau opérationnel pour réagir face aux aléas. Nous proposons de distinguer quatre types de pilotage selon que la décision est prise avant le lancement de la production ou en cours d'exécution et selon la nature des perturbations prises en compte (perturbation prévisionnelle ou réelle).

### **I.10.1. Pilotage prédictif**

Le pilotage prédictif est destiné à préparer le lancement d'un système existant. Il se fait donc *a priori*. Il permet de définir l'objectif de la production et la meilleure trajectoire pour y parvenir et de prendre des décisions pour assurer le fonctionnement courant. Ce pilotage est basé sur des paramètres (comme le temps opératoire d'une machine, le taux d'arrivée, le taux de panne etc.) estimés de manière déterministe (ex : le temps opératoire moyen est de 15 minutes) ou probabiliste (ex : le temps opératoire suit une loi uniforme entre deux valeurs minimum et maximum). Les paramètres de pilotage sont déterminés avant l'exécution sur le système réel. Un expert ou un outil est chargé de trouver la meilleure décision (ex. règle de priorité). Le pilotage prédictif fournit en quelque sorte le scénario optimal dans un environnement non perturbé.

Les outils utilisés sont l'ordonnancement prévisionnel, les méthodes de modélisation, la GPAO, les ERP mais aussi les outils de simulation hors ligne. Les meilleurs paramètres trouvés vont souvent être directement implantés dans des automates programmables pour permettre l'exécution de la production. Mais ce pilotage pose généralement des difficultés après le lancement de la production, car ces paramètres choisis sont obtenus à partir d'un modèle et ne correspondent pas toujours à la réalité du terrain.

### **I.10.2. Pilotage proactif**

Le pilotage proactif est utilisé également dans la phase de préparation avant que le processus de production ne soit lancé. L'objectif ici est d'anticiper un certain nombre d'aléas

et de déterminer *a priori* la meilleure réponse possible à apporter si l'aléa survient. On va donc ainsi pouvoir répondre très vite et être beaucoup plus réactif. Ce pilotage est basé sur les mêmes principes que le pilotage prédictif, mais :

- il consiste d'abord à anticiper les perturbations les plus certaines et le plus grand nombre possible de perturbations éventuelles. Ces données peuvent être remontées grâce aux indicateurs de performance d'un système déjà existant ou bien extraites d'une base de données mémorisant les événements passés,
- ensuite, il cherche à identifier les risques de ne pas atteindre les objectifs initialement fixés, notamment de ne pas respecter le délai prévisionnel face aux perturbations.

La simulation hors ligne est aussi un des outils utilisés pour ce pilotage afin d'anticiper les perturbations et calculer les risques éventuels de ne pas respecter l'objectif visé.

### **I.10.3. Pilotage réactif ou pilotage en temps réel**

Le pilotage réactif intervient pendant l'exécution de la production, une fois le lancement effectué. Il a pour but de corriger les valeurs des variables de décision lors de l'apparition d'un événement imprévu. Ce pilotage doit réagir en temps réel. C'est la raison pour laquelle on l'appelle aussi pilotage en temps réel. Dans le meilleur des cas, l'événement a été anticipé dans la phase de pilotage proactif et la réponse est connue. Souvent, l'événement n'a pu être anticipé. On peut distinguer deux situations nécessitant une réaction :

- des événements imprévisibles peuvent survenir, sans que l'on puisse les anticiper par un pilotage prédictif ou proactif. Il peut s'agir par exemple de l'arrivée d'une commande urgente, de la modification d'une commande ou encore d'une panne sur une machine. Le pilotage réactif devient nécessaire pour analyser les conséquences de cet événement imprévu par rapport à l'objectif de production et, le cas échéant, pour déterminer les paramètres de pilotage à corriger pour minimiser l'impact de cette perturbation [Berchet, 2000],
- des dérives sont détectées (par exemple, le temps de cycle d'une machine augmente dans le temps). Ces dérives peuvent avoir pour conséquence le non-respect des objectifs ou la survenue ultérieure d'événements plus perturbants. Par exemple, l'augmentation de la durée d'une opération peut entraîner un retard généralisé ou l'impossibilité de maintenir l'ordonnancement prévisionnel. Ceci permet au décideur d'appliquer de façon préventive des modifications aux paramètres de pilotage. La réactivité de ce pilotage dépend donc de l'évolution de l'état du système par rapport à ce qui avait été prévu par le pilotage prédictif.

Le pilotage réactif utilise des outils tels que les algorithmes en ligne, la maintenance préventive, et pour ce qui nous intéresse plus particulièrement dans cette thèse, la simulation en ligne en phase d'exploitation du système de production. Le pilotage réactif dépend donc de l'évolution de l'état du système et des événements arrivés en cours de fonctionnement par rapport à ce qui avait été prévu par le pilotage prédictif ou proactif. Il est donc nécessaire d'analyser les conséquences d'un événement imprévu sur l'objectif de production et de déterminer les paramètres de pilotage à corriger pour minimiser l'écart par rapport à la trajectoire prévue et éventuellement par rapport à l'objectif. L'historique de ces événements

et des corrections effectuées par le pilotage réactif peut être archivé afin d'être utilisé pour les prochaines modélisations en étant intégré à la base de cas des pilotages prédictif et proactif.

Dans le cas de surveillance de dérives, le décideur doit être capable de déterminer si les paramètres surveillés sont encore ou non, dans des plages de valeurs acceptables. A cet effet, on peut utiliser l'équivalent d'une carte de contrôle (cf. MSP - Maîtrise Statistique des Processus). Prenons le cas de la durée opératoire d'une opération d'usinage (voir la Figure I.5 et la Figure I.6). Cette durée a une **valeur attendue (valeur idéale)**, par exemple 10 mn. Compte tenu des variations inhérentes au processus de production, on sait que la durée réelle est comprise entre 8 et 12 mn. Ces valeurs correspondront aux **valeurs limites de surveillance** inférieure (LSI) et supérieure (LSS) d'une MSP. Si la durée constatée sort de ces limites, on doit déclencher une action préventive afin de ramener cette durée vers des valeurs attendues (un usinage trop rapide induisant des problèmes de qualité, un usinage trop lent risquant de perturber l'ordonnancement prévisionnel). On peut de même établir des **valeurs de limites de contrôle** inférieure (LCI) et supérieure (LCS). Le franchissement de ces valeurs amènera lui à la mise en place d'actions correctives ou à la remise en question de l'objectif.

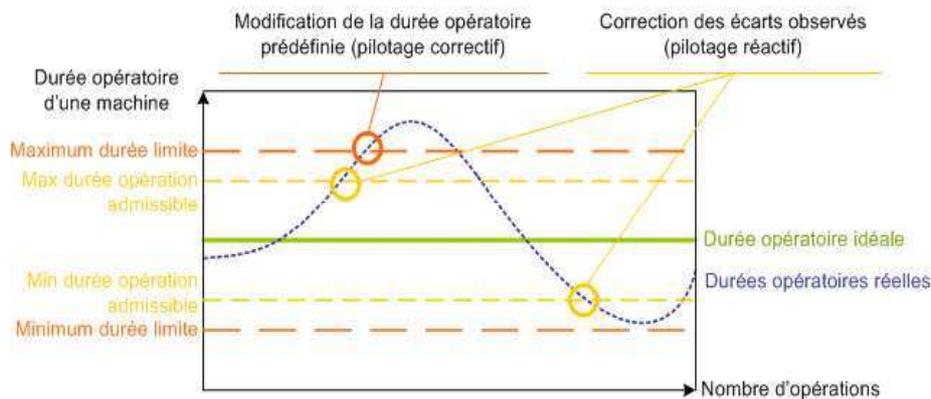


Figure I.5 : exemple de carte de contrôle pour la durée opératoire d'une machine

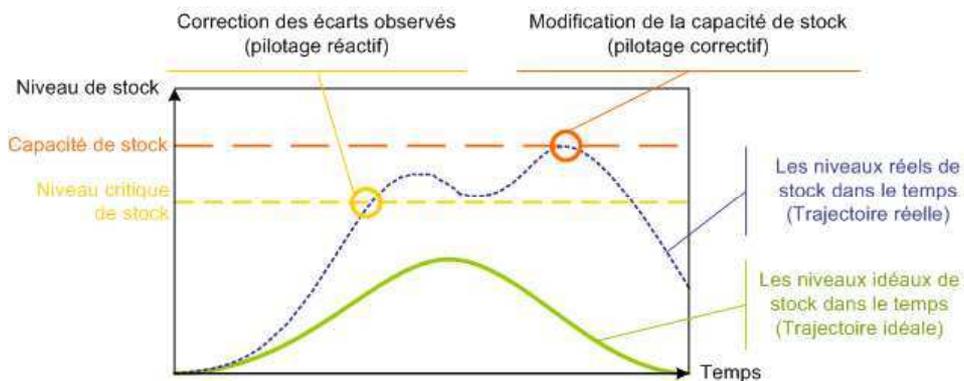


Figure I.6 : exemple de carte de contrôle pour un stock

#### I.10.4. Pilotage correctif

Dans le cas où l'on ne peut pas maîtriser une dérive et ramener un paramètre dans les valeurs attendues, il est possible qu'il soit trop tard pour appliquer une démarche préventive. Il faut alors une démarche **qui modifie la trajectoire de référence ou même l'objectif** de production. Là aussi, il est nécessaire de mémoriser les faits dans une base de données pour une utilisation ultérieure. En effet, ce niveau est effectué **à la suite d'une valeur limite**, qui

signifie l'apparition réelle d'un aléa comme une panne machine. L'atteinte de cette limite **déclare le déclenchement d'une démarche corrective**, en réalisant par exemple une maintenance corrective. Le résultat du pilotage correctif et les causes de dysfonctionnements survenus peuvent argumenter les pilotages prédictif et proactif en enregistrant l'historique dans une base de données qui pourra servir dans la prochaine modélisation. Dans la Figure I.7, nous comparons la périodicité d'application et le positionnement de ces différents types de pilotages expliqués selon la période temporelle dans la production.

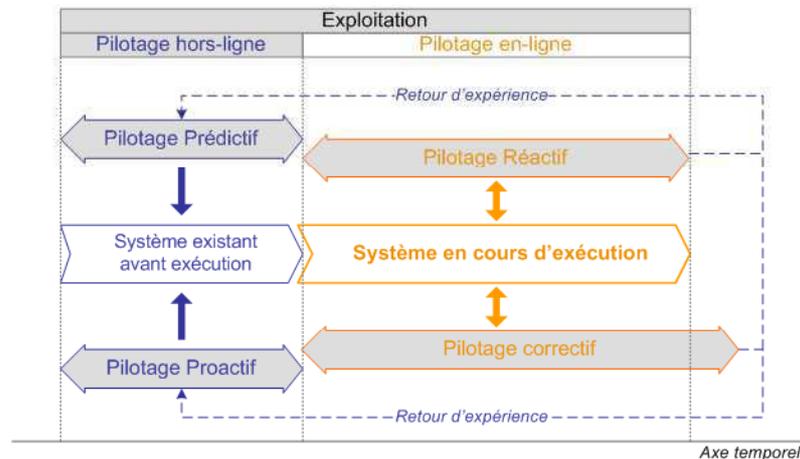


Figure I.7 : différents pilotages selon la période de lancement en exploitation

## I.11. Conclusion

Cette partie de la thèse avait pour objectif de présenter le contexte général du pilotage des systèmes de production. Nous avons expliqué les différentes fonctions génériques du pilotage de la production selon le type d'atelier de production et selon les objectifs des entreprises. Nous avons aussi expliqué d'une part les évolutions des systèmes de production et des modes de pilotage et d'autre part, les évolutions des ateliers de production en comparant leur architecture. Et enfin, nous avons distingué les différents types de pilotage selon l'origine des perturbations survenues et la période temporelle dans la production. Nous avons expliqué notamment un pilotage en temps réel ou pilotage réactif durant la fabrication afin de pouvoir réagir face aux événements critiques. Parmi tous les outils utilisés dans l'industrie pour le pilotage et l'aide à la décision, nous nous intéressons en particulier à l'utilisation couplée d'un système d'exécution des fabrications et d'une simulation à événement discret pour le pilotage d'atelier de production. La partie suivante de cette thèse permet de présenter la raison pour laquelle nous avons choisi ces outils pour le pilotage en temps réel en analysant les avantages et les difficultés d'intégration de ces deux outils.

# Références bibliographiques partie I

---

[**Apics, 2005**] Apics Dictionary, The American Production and Inventory Control Society, Inc., 2005, Edition No. 11.

[**Archimède, 1991**] B. Archimède, “Conception d'une architecture réactive distribuée et hiérarchisée pour le pilotage des systèmes de production”, Thèse de doctorat, université de Bordeaux I, 1991.

[**Berchet, 2000**] Claire Berchet, “Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel”, 2000, Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble.

[**Brennan, 2000**] R. Brennan, “Performance comparison and analysis of reactive and planning based control architectures for manufacturing”, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 16, pp. 191-200, 2000.

[**Breuil, 1984**] Alain Dominique Breuil, “Outil de conception et de décision dans les organisations de gestion de production”, Doctorat d'Etat es Sciences, Université de Bordeaux I, soutenue le 13 novembre 1984.

[**Doumeingts, 1984**] Guy Doumeingts, “Méthode GRAI : Méthode de conception en productique”, Doctorat d'Etat es Sciences, Université de Bordeaux I, soutenue le 13 novembre 1984.

[**Dupont, 1998**] Lionel Dupont, “La gestion industrielle”, Edition Hermès, ISBN : 2-86601-708-0, 1998.

[**Giard, 2003**] Vincent Giard, “Gestion de la production et des flux”, 3ème édition Edition Economica, ISBN : 2-7178-4498-8, 2003.

[**Grabot et Huguet, 1996**] Bernard Grabot, Pierre Huguet “Reference models and object-oriented method for reuse in production activity control system design”, Computer in Industry, 1996, No. 32, pp. 17-31.

[**Le Moigne, 1974**] Jean-Louis Le Moigne, “Les systèmes de décision dans les organisations”, Presses Universitaires de France, Paris, 1974.

[**Lorino, 1992**] Philippe Lorino, “La gestion par les activités”, dans « Évaluer pour évoluer » du Séminaire AFGI du 15 octobre 1992.

[**Lorino, 1997**] Philippe Lorino, “Méthodes et pratiques de la performance – Le guide du pilotage”, Les Editions d'Organisation, 512 pages, 1997.

[**Mélèze, 1972**] Jacques Mélèze, “L'analyse modulaire des systèmes de gestion”, A.M.S., Paris, Éditions Hommes et Techniques, 1972.

**[Pellet, 1985]** X. Pellet, “Sur la hiérarchisation des décisions- Application à la conduite d’ateliers”, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 1985.

**[Tacquard *et al.*, 1995]** C. Tacquard, P. Baptiste et H. Manier, “A behavioral model to schedule and control a flexible manufacturing ring: application to the push and the pull flows”, International conference on Industrial Engineering and Production Management, Marrakech, Maroc, pp. 127-136, 1995.

**[Trentesaux, 1996]** Damien Trentesaux, “Conception d’un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production” , Thèse de Doctorat en Automatique - Productique, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 24 janvier 1996.



## Partie II

# II. Les outils d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier

---

### Sommaire détaillé de la partie II

<b>II. Les outils d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier</b> .....	<b>35</b>
<b>II.1. Introduction</b> .....	<b>37</b>
<b>II.2. Les progiciels existants pour le pilotage d'une unité de production</b> .....	<b>37</b>
II.2.1. Supervision .....	38
II.2.1.1. Quelques définitions de la supervision.....	39
II.2.1.2. Positionnement de la supervision dans le pilotage.....	39
II.2.1.3. Outils de supervision dans l'industrie .....	41
II.2.1.4. Principales fonctionnalités des outils de supervision.....	41
II.2.2. Ordonnancement « Scheduling » en temps réel .....	43
<b>II.3. Choix des outils pour le pilotage en temps réel d'atelier</b> .....	<b>44</b>
II.3.1. MES « Manufacturing Execution System » .....	44
II.3.1.1. Définition et positionnement dans l'entreprise .....	45
II.3.1.2. Norme S95 et fonctions du MES.....	47
II.3.1.3. Contrainte du MES pour le pilotage.....	49
II.3.2. Simulation de flux à événements discret (SED).....	49
II.3.2.1. Évolution des outils de simulation pour l'ingénierie .....	50
II.3.2.2. Classification de la simulation selon différents critères.....	52
II.3.2.3. « SED » dans le cycle de vie d'un système de production.....	53
II.3.2.4. Contraintes d'utilisation des outils de simulation .....	55
II.3.2.5. Simulation hors ligne, usage le plus courant pour le pilotage.....	57
<b>II.4. Optimisation en couplant les méthodes simulateur/analytique dans un atelier de fabrication intermittente</b> .....	<b>58</b>
II.4.1. Optimisation en théorie .....	58
II.4.1.1. Les méthodes analytiques.....	58
II.4.1.2. Les méthodes simulateurs .....	59
II.4.1.3. La combinaison des deux approches dans la théorie.....	61
II.4.2. Application pratique .....	61
II.4.2.1. Description du job shop.....	62
II.4.3. Résolution par couplage des deux approches .....	63
II.4.3.1. Modélisation analytique .....	64
II.4.3.2. Séquencement.....	67
II.4.3.3. Modélisation simulateur.....	68
II.4.3.3.1. Simulation déterministe à horizon fini .....	68
II.4.3.3.2. Simulation déterministe à horizon infini.....	69
II.4.3.3.3. Simulation stochastique à horizon infini .....	70
<b>II.5. Conclusion de cette optimisation</b> .....	<b>70</b>



## II.1. Introduction

Pour être compétitives, les entreprises ont de plus en plus recours aux technologies de production avancées. Ces technologies concourent simultanément à l'automatisation des ateliers de fabrication et à l'informatisation des fonctions connexes à la production (conception, de gestion de production, logistique). Dans ce chapitre, nous nous focaliserons sur les outils logiciels propres à la gestion et à la conception des ateliers.

Nous commencerons par les outils supportant les fonctions de supervision et nous détaillerons plus spécifiquement les logiciels de type MES (Manufacturing Execution System). Nous poursuivrons avec les logiciels de type simulation de flux à événements discrets (SED), utilisés le plus souvent dans la phase de conception des ateliers. La simulation utilisée seule peut conduire l'utilisateur à multiplier les simulations en jouant avec les différents paramètres (par exemple : dimension des aires de stockage, règle de priorité sur les postes...) pour trouver une bonne solution. Une approche consisterait à coupler simulation et optimisation par des méthodes analytiques. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous montrerons sur un exemple académique l'intérêt de ce couplage.

## II.2. Les progiciels existants pour le pilotage d'une unité de production

Depuis les années 1980, l'accroissement de la diversité et de la complexité des produits a progressivement conduit les entreprises à utiliser des progiciels informatiques dans le processus de production. Avec le développement considérable de l'informatique, ces progiciels sont maintenant disponibles dans toutes les étapes du cycle de vie d'un système de production. On peut cependant noter le faible nombre d'outils informatiques existant dans le domaine de l'ingénierie de processus comparativement à ceux qui existent en conception de produit ou en exploitation. La Figure II.1 tirée des travaux de [Klingstam, 1999] le met en évidence.

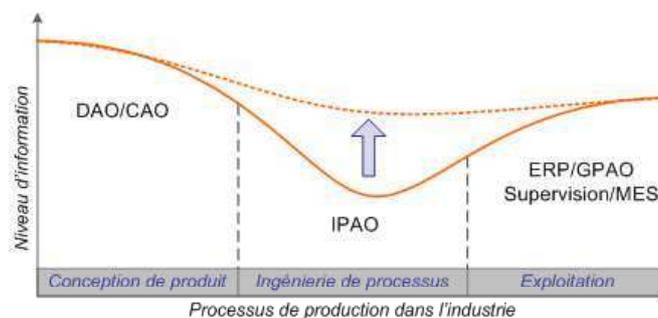


Figure II.1 : comparaison des outils informatiques utilisés pour établir le lien entre la conception de produits et l'exploitation dans l'industrie d'après [Klingstam, 1999]

Pour la phase de conception, il existe des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) généraux (Catia, AutoCad, SolidWorks, ProEngineer...) et des outils d'Ingénierie de Processus Assistée par Ordinateur (IPAO) plus spécifiques aux systèmes de production (Delmia, Tecnomatix...) ou encore des outils de simulation de flux (Witness, Arena, Promodel, Automod, eM-Plant, Quest...). Ces outils de simulation de flux sont utilisés essentiellement en phase de conception, pour le dimensionnement d'une nouvelle ligne ou d'un nouvel atelier.

En phase d'amélioration, il est possible d'utiliser les mêmes outils que ceux appliqués en phase de conception, comme par exemple les logiciels de simulation de flux. On dispose également d'outils de maintenance et de re-engineering comme les logiciels de DMS (Design Maintenance System).

Pour la phase d'exploitation, on dispose de plusieurs outils adaptés aux divers niveaux de décision : APS et ERP pour les moyen et long termes en décisions stratégique et tactique, outils opérationnels d'atelier pour l'ordonnancement à court terme. Il y a une dizaine d'années sont apparus les outils de MES (Manufacturing Execution System), qui disposent de plusieurs fonctions ou services plus évolués que la simple supervision (la norme ISA S95). Ils permettent de lancer et de suivre les ordres de fabrication sur le très court terme et se situent de fait entre les outils de contrôle/commande en temps réel des automates et les outils de planification à moyen et long termes. Un MES permet donc d'aider à la prise de décision grâce à des tableaux de bord informant de l'état du système en temps réel et à des historiques sur les événements passés, mais ne permet pas de garantir la qualité ou l'optimalité de la décision. On constate souvent que les outils informatiques de conception et d'exploitation sont utilisés séparément et qu'il n'y a donc pas de retour d'expérience de l'exploitation vers la conception. C'est notamment le cas de la simulation de flux et du MES. Comme nous l'avons présenté dans la Figure II.2, l'application de ces deux outils en cours d'exécution pourra optimiser la décision prise pour le pilotage.

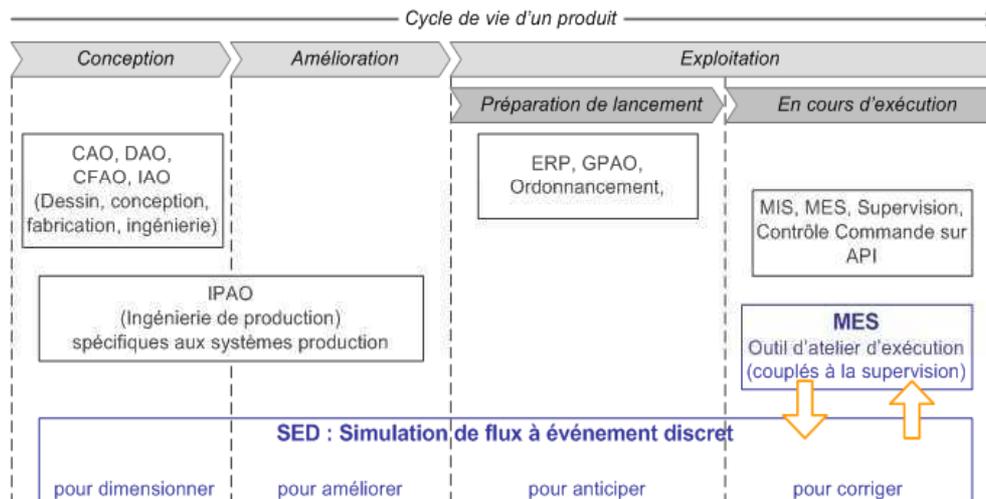


Figure II.2 : positionnement des outils de gestion industrielle

L'objectif général de ce travail de recherche est donc d'établir un lien entre un outil de simulation de flux en phase d'exécution et un outil de MES tout en affinant progressivement la cohérence du modèle de simulation par rapport au système réel grâce à la mise à jour dynamique des données utilisées. Par la suite nous détaillerons des nouvelles technologies de Supervision et les outils opérationnels d'atelier pour l'ordonnancement à court terme.

### II.2.1. Supervision

L'objectif est de présenter la situation de la supervision dans l'industrie, le rôle de la supervision, son positionnement dans le pilotage atelier et la mise en œuvre de différents superviseurs industriels proposés depuis plusieurs années sur le marché. Les chercheurs américains utilisent le terme SCADA « Supervisory Control And Data Acquisition ». Ce terme est équivalent au terme français « Supervision ». Il distingue les deux fonctions de

« *Supervisory Control* » équivalent à « Conduite » et « *Data Acquisition* » équivalent à « Collecte de données du terrain ». Nous avons retenu quelques définitions de la supervision qui nous semblent proches des fonctions de base des logiciels utilisés dans l'industrie.

### II.2.1.1. Quelques définitions de la supervision

La supervision doit contrôler l'exécution d'une opération ou d'un travail effectué par d'autres entités sans rentrer dans les détails de cette exécution. Elle joue des rôles différents selon que l'on est en fonctionnement normal ou anormal de l'exécution [Combacau *et al.*, 2000] :

- dans le cas de fonctionnement normal, elle prend les dernières décisions en temps réel correspondant aux degrés de liberté exigés par la flexibilité décisionnelle. Dans ce cas, il est nécessaire de faire de l'ordonnancement en temps réel, de l'optimisation, de modifier en ligne les algorithmes de commande et de surveillance ;
- dans le cas de fonctionnement anormal, comme l'apparition d'une défaillance, elle prend les décisions nécessaires pour assurer le retour vers un fonctionnement normal. Elle va choisir une solution curative, effectuer des ré-ordonnements, déclencher les procédures d'urgence, etc.

D'après [Cimax, 1998] et [Exera, 1996], la supervision permet de visualiser en temps réel l'état d'évolution d'une installation automatisée, afin que l'opérateur puisse prendre, le plus vite possible, les décisions permettant d'atteindre les objectifs de production. Et d'après [CETIM, 1994], les principaux objectifs de la supervision, dans le cas des processus de fabrication, consistent : à modifier les caractéristiques de coupe en fonction de l'état de l'outil, réagir en temps réel, participer au maintien des cadences de production à leur niveau optimal, permettre la reconfiguration des paramètres de fonctionnement, assurer un certain niveau de disponibilité, faciliter le diagnostic de pannes pour optimiser les tâches de maintenance.

De ces définitions de la supervision, nous pouvons conclure que la fonction supervision dans la production a un rôle décisionnel d'optimisation. Elle s'appuie sur la collecte de données issues du système physique et traite en temps réel les données collectées pour qu'elles soient utilisables pour la procédure de prise de décision.

### II.2.1.2. Positionnement de la supervision dans le pilotage

Il existe diverses interprétations des deux termes « supervision » et « pilotage ». Ceci nous amène à préciser rapidement leurs fonctionnements et leur positionnement dans la production. La supervision et le pilotage sont deux fonctions du système de décisionnel dans un système de production dont les rôles sont inverses mais complémentaires, ce qui apparaît d'après des travaux de [Aléonard *et al.*, 1994] et ce qu'illustre la Figure II.3 tirée des travaux de [Pujo et Kieffer, 2002].

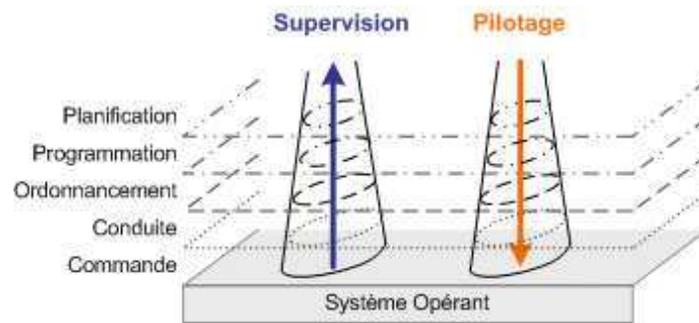


Figure II.3 : positionnement de la supervision et du pilotage par rapport aux principales fonctions

Le rôle de la supervision consiste à construire des informations représentant l'état du système opérant à l'aide d'agrégations successives d'informations et ceci en adéquation avec chacun des niveaux de décision. Les deux fonctions du pilotage et de la supervision sont souvent utilisées de manière intégrée, notamment si l'une des deux apparaît moins complexe.

Le rôle du pilotage est de mettre en œuvre les fonctions qui permettront d'atteindre les objectifs de production et qui permettront le contrôle-commande sûr et réactif d'un système de production. Nous avons déjà distingué les différents niveaux de pilotage dans la partie précédente. Nous rappelons ici la nécessité d'avoir défini les fonctions temps réel pour la mise en œuvre du pilotage au moment de l'exécution comme la surveillance et la maintenance. Ces fonctions appliqueront le plan de production prévisionnel tout en contrôlant le bon fonctionnement. Comme nous avons expliqué que le pilotage et la supervision sont complémentaires, nous regardons donc le positionnement de la supervision par rapport à la surveillance et à la maintenance :

- la fonction « surveillance » est constituée d'un ensemble de fonctions s'exécutant en temps réel et ayant pour but de reconstituer l'état réel du procédé au sein de modèles utilisés par le système de conduite de l'atelier [Toguyeni *et al.*, 2002]. La fonction surveillance fournit donc des indicateurs pertinents à la supervision et maintient l'état de différents modèles au plus près de la réalité, pour qu'ils servent de support aux prises de décision pour la conduite réactive d'un atelier,
- la fonction « maintenance » se charge de conserver au parc de ressources un niveau de performance compatible avec les objectifs de production [Ly *et al.*, 2000]. Dans tous les types de maintenance, le déclenchement d'une opération de maintenance est un processus décisionnel qui se base sur l'état mesuré ou estimé des ressources. Ces décisions doivent être prises de manière cohérente avec celles de la supervision, au même titre que les décisions de reconfiguration de l'outil de production.

Dans un système complexe, la supervision doit être hiérarchisée comme les fonctions de pilotage. La hiérarchisation de la supervision d'un système de production du point de vue de [CETIM, 1994] est réalisé à trois niveaux :

- (i) au premier niveau, constitué de la machine et de sa commande, la supervision valide en temps réel les signaux acquis à partir d'une détection comme une panne. Les informations de panne seront envoyées à la commande et ensuite seront envoyées vers le niveau supérieur pour un diagnostic plus profond ;

- (ii) au second niveau, la supervision considère l'ensemble des machines d'un atelier. Les informations issues du premier niveau sont interprétées et un diagnostic plus poussé est élaboré. Les résultats sont présentés à l'opérateur qui entreprend des actions en conséquence. À ce niveau, la supervision peut être en interaction avec la planification, ce qui permet de générer des actions vers le premier niveau ;
- (iii) au troisième niveau, enfin, la supervision alimentée par la gestion de production rend compte des informations nécessaires à la gestion, l'ordonnancement de la production, la maintenance, etc.

### II.2.1.3. Outils de supervision dans l'industrie

L'intégration des superviseurs dans les systèmes industriels a permis d'appliquer les concepts de surveillance, de diagnostic et d'optimisation assistés par ordinateur dans les ateliers de production. La supervision a d'abord été réalisée par les opérateurs humains qui prenaient connaissance des données en temps réel dans leurs secteurs. Ensuite, un responsable de niveau hiérarchique plus élevé recevait des informations agrégées sur le fonctionnement de l'atelier. Le développement de la supervision a aussi amené l'apparition des salles de contrôle avec des tableaux représentant une vue synoptique de l'atelier et des indicateurs concernant l'état des processus. Ultérieurement, cette représentation est devenue plus accessible et facile d'utilisation. A sa demande, l'opérateur peut acquérir les informations utiles en jouant avec une multitude de vues sur des écrans plus petits. Par la suite, d'autres fonctionnalités ont été intégrées dans cet outil, comme la gestion des alarmes, l'historique des données, l'enregistrement des anomalies, etc.

L'automatisation de plus en plus poussée des industries manufacturières avait pour objectif d'améliorer la productivité, d'éviter de développer un nouveau système de contrôle à chaque nouvelle application mais aussi d'améliorer la réactivité face à tous les changements. C'est la raison pour laquelle les industries se sont orientées vers les outils informatiques et les outils de supervision. En effet, ces derniers pouvaient réunir toutes les données concernant l'avancement de la fabrication dans un lieu unique. Parmi les outils de supervision du marché les plus souvent utilisés, citons : Intouch 5 (Wonderware), Monitor OCS (Schneider), Os 520M (Siemens), Panorama (Codra, Europ Supervision), Fix MMI (Intellution), PC Vue32 (Arc Informatique), Wizcon (PC Soft International), Genesis (Iconics), Factory Link (Usdata).

### II.2.1.4. Principales fonctionnalités des outils de supervision

Actuellement, les outils de supervision sont utilisés par la plupart des industries manufacturières pour leurs fonctions intégrées dont les principales sont : la gestion d'une base de données temps réel, la communication, l'archivage des données, le gestionnaire d'alarmes, la fonction vue synoptique (graphique) et la fonction de calcul.

*Gestion d'une base de données temps réel* : cette fonction est la fonction essentielle d'un superviseur. Cette base de données doit être gérée en temps réel sur toutes les données de différentes natures requises. Ces données peuvent être liées directement à des équipements physiques, aux résultats d'un module de calcul intégré dans le superviseur, liées à d'autres applications, etc. En général, ces données sont réparties en deux types de variables *externes* ou *internes* qui peuvent être enregistrées sous différentes formes [Bouazdi et Renault, 1994] : *hiérarchisée* (relation dite 1-n entre les variables), *relationnelle* (relation n-n entre les

variables) et *définie* (variables déclarées mais sans relation entre elles). Cette base de données peut réaliser le rafraîchissement des données requises de différentes manières :

- *cyclique* (ou périodique, la période peut être définie par l'utilisateur),
- *cyclique paramétrable* (le rafraîchissement porte sur une partie de la base de données),
- *flash* (rafraîchissement au moment de l'appel),
- *sélectif* (rafraîchissement lors de l'apparition à l'écran),
- *exception* (rafraîchissement uniquement des variables qui ont changé d'état).

S'il est trop fréquent, le rafraîchissement cyclique peut diminuer la caractéristique de réactivité d'un système. Le rafraîchissement sur exception permet de diminuer les temps de communication et d'appel, mais il nécessite d'utiliser un élément pour détecter les changements d'état (exemple : un serveur de communication OPC) afin d'acquérir les données non obtenues dans la supervision.

*Communication* : cette fonction est une fonction fondamentale notamment pour les industries automatisées et difficile à réaliser, car les communications sont multiples. D'après [Toguyeni *et al.*, 2002], la communication est possible sous différentes formes :

- *local au poste de supervision* : les principales techniques de liaisons utilisées pour les communications locales sont : DDE "*Dynamic Data Exchange*", DLL "*Dynamique Link Library*" et OLE "*Object Linking and Embedding*",
- *externes avec les équipements industriels* : un noyau de communication est intégré dans l'outil de supervision ; il peut utiliser différentes interfaces physiques pour atteindre les autres équipements,
- *communication avec la base de données* : avec une base de données partagée entre toutes les fonctions à laquelle le superviseur est capable d'accéder pour écrire ou lire les informations utiles. Le langage SQL est utilisé pour consulter les bases de données,
- *entre différents composants de la supervision* : les concepts les plus utilisés pour communiquer et distribuer les modules de supervision sont : COM/DCOM, CORBA et le serveur OPC [OPC, 2001]. OPC, qui signifie « *OLE for Process Control* » [OPC, 2001], est une extension particulière des techniques d'échange OLE. OPC est un logiciel interface standard qui permet au système exploitation Windows de communiquer avec les équipements industriels. L'avantage est de fournir une plateforme unique et standard d'échange entre différents équipements de fabrications. Cet outil permet aussi de filtrer des alarmes, horodater les informations et les données, etc.

*Gestionnaire d'alarmes* : certaines variables de base de données temps réel sont associées à des alarmes qui indiquent une situation anormale dans le système. A ce moment, l'opérateur est informé qu'une variable dépasse une valeur ou une plage de valeurs prédéfinies comme normales, pour prendre une valeur anormale. Les alarmes sont souvent hiérarchisées en plusieurs niveaux pour renseigner l'opérateur selon l'importance des risques et le délai.

*Archivage des données* : les changements d'état et les mesures peuvent être sauvegardés de manière cyclique ou événementielle afin de visualiser par exemple les courbes de tendance, de réutiliser les données archivées ou de faire des analyses plus fines.

*Fonction vue synoptique/traitement graphique* : les outils de dessin intégrés dans la supervision permettent de visualiser une vue synoptique évoluée. Cela facilite la réutilisation des composants graphiques d'une application à l'autre et réduit les délais de développement et les risques d'erreur.

Nous avons vu les fonctionnalités principales de la supervision. Cependant, quand la supervision se situe dans la conduite ou le pilotage d'un système complexe, elle nécessite des fonctions plus complexes. La plupart des superviseurs industriels actuels ne disposent pas de formalismes pour les traitements événementiels et réactifs. Ceci est assuré de plus en plus par les logiciels de type MES « *Manufacturing Execution System* », qui assurent différentes fonctions. Nous détaillerons ce niveau et sa décomposition en plusieurs tâches dans les chapitres suivants.

### **II.2.2. Ordonnancement « Scheduling » en temps réel**

L'ordonnancement est défini comme l'ensemble des consignes permettant la réalisation du plan de travail à court terme compte tenu des moyens disponibles. Nous pouvons évoquer les trois approches possibles [Marty, 1997] : *par activités* (en identifiant les activités entre deux changements d'état), *par processus* (en identifiant les séquences d'événements qui obéissent à une même logique), *par événements* (on suit le modèle à travers ses changements d'état).

Généralement, le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de *tâches*, compte tenu de contraintes temporelles et des contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des *ressources* requises [Esquirol et Lopez, 1999].

- une *tâche* est une activité dont l'exécution peut demander plusieurs opérations ; les tâches et opérations sont liées par des relations de précédences, selon un *ordre total* pour les fabrications linéaires ou selon un *ordre partiel* pour les cas d'assemblage.
- une *ressource* est un moyen technique, financier ou humain destiné à être utilisé pour la réalisation d'une tâche et disponible en quantité limitée. On classe les ressources en deux types : les *ressources consommables* (matières premières, budget, etc.) consommées lors de la réalisation de la tâche et les *ressources renouvelables* (les équipements, les machines, l'espace, les hommes, etc.), qui sont mobilisées pendant l'exécution d'une tâche mais redeviennent ensuite disponibles pour d'autres tâches. Dans le cas de ressources renouvelables, on distingue les *ressources cumulatives* qui peuvent être réparties sur plusieurs tâches simultanément (équipe d'ouvriers, espace de travail, etc.) et les *ressources disjonctives*, qui sont réservées pendant un temps donné à la réalisation d'une tâche (machine, robot, etc.).

Les problèmes d'ordonnancement d'atelier sont pour l'essentiel des problèmes avec ressources disjonctives, car les ressources principales sont les machines, ne pouvant réaliser qu'une seule opération à la fois et chaque opération concerne un produit ou un lot (plusieurs produits identiques sont regroupés). On distingue trois grands types de problèmes : l'ordonnancement dans un atelier à cheminement unique (flow-shop), l'ordonnancement de divers types de cellules flexibles, l'ordonnancement dans un atelier à cheminements multiples (job-shop).

Les algorithmes les plus utilisés, notamment dans les logiciels du marché, reposent sur des règles de priorité. Lorsqu'une machine devient disponible et qu'il existe plusieurs opérations en attente d'exécution sur cette machine, on doit choisir l'opération à effectuer. Ce choix se fait selon une règle dite de priorité. Parmi les règles de priorité les plus courantes en ordonnancement, on trouve les règles basées sur des critères portant sur les délais, les durées opératoires, les dates d'arrivées, la taille des files d'attentes, le nombre d'opérations restant, etc. Une règle appliquée en ordonnancement peut être constante (règle statique) ou évoluer en fonction de l'environnement (règle dynamique). Si l'on s'intéresse aux méthodes d'ordonnancement, nous pouvons retrouver toutes les méthodes de recherche opérationnelle : la décomposition, la programmation dynamique, les méthodes heuristiques et méta-heuristiques : le recuit simulé, les tabous, les algorithmes génétiques.

Dans le contexte dynamique d'un atelier de production, la durée d'exécution des opérations peut varier et les machines ne sont pas constamment disponibles pour raison de maintenance, pannes ou réparations. Ces informations peuvent être modélisées par des distributions de probabilités ou par une loi aléatoire. Pour répondre à ces problèmes d'ordonnancement *stochastique*, deux approches sont possibles : l'approche analytique et la simulation. L'intérêt des méthodes analytiques est très limité pour aborder des problèmes d'atelier *job-shop*, *open-shop* et *flow-shop*. Pour ces types d'atelier, l'approche par la simulation est très souvent envisagée comme une manière simple et rapide de concevoir des solutions d'ordonnancement. La simulation offre aussi la possibilité de tester un nombre important de règles de priorité ou même les effets des modifications de paramètres sur les résultats obtenus dans un cadre *déterministe*. Dans les chapitres suivants, nous détaillerons cette méthode de simulation.

### II.3. Choix des outils pour le pilotage en temps réel d'atelier

Nous avons choisi d'appliquer en cours d'exécution deux outils qui peuvent optimiser la décision prise pour le pilotage. D'une part, pour pallier le manque d'une base de données en temps réel ou au manque de données réelles du terrain, on utilisera un MES « Manufacturing Execution System ». D'autre part, pour avoir la possibilité de se projeter dans le futur, on utilisera un logiciel de simulation. Par la suite nous expliquerons plus en détail les fonctions, les apports, les limites et le rôle de chacun de ces deux outils pour réaliser un pilotage d'atelier de production.

#### II.3.1. MES « Manufacturing Execution System »

La performance des entreprises est aujourd'hui liée à leur « réactivité » et leur « flexibilité » pour répondre aux demandes du marché. Cela explique que ces entreprises sont souvent conduites à changer leurs fabrications. Pour ces entreprises, la réactivité et la flexibilité doivent répondre à des questions primordiales comme :

- *peut-on fabriquer rapidement un nouveau produit ou un produit personnalisé ? (définir la recette et les procédures de travail associées, former les opérateurs, etc.)*
- *Peut-on fabriquer un produit demandé, sous quel délai et à quel prix ?*
- *Peut-on diagnostiquer rapidement une dérive et retracer son origine ?*
- *Peut-on communiquer la bonne information en temps réel, à tout moment de la fabrication ?*
- *Peut-on réordonnancer la production rapidement ? (pour faire face à une commande imprévue et urgente, pour réagir à la panne d'un appareil, etc.)*

La supervision n'est pas suffisamment armée pour faire face à ces exigences ou au pilotage d'un système complexe. Il lui manque des fonctions pour les traitements événementiels et réactifs. Le MES « *Manufacturing Execution System* » est l'évolution du système de supervision qui peut assurer le mieux ces exigences. La différence principale entre « la Supervision » et « le MES » réside dans la possibilité de remonter du terrain en temps réel les informations nécessaires à la fabrication. Ce terme de MES date du début des années 1990 aux Etats-Unis et n'est devenu populaire que quelques années plus tard en Europe. Un MES se caractérise par une certaine interpénétration entre le « logiciel » et le « matériel » [Bourrieres *et al.*, 2005]. Ce terme anglo-saxon MES est traduit en français par « Système d'exécution des fabrications ».

### II.3.1.1. Définition et positionnement dans l'entreprise

D'après [Barkmeyer *et al.*, 1999], un MES est un ensemble de composants « matériels » et « logiciels » permettant la gestion et l'optimisation des activités de production du lancement de la commande jusqu'à l'obtention des produits finis. Tout en maintenant des données précises et à jour, le MES guide, initie, répond et rapporte les événements de l'usine au moment où ils se produisent. Un MES fournit des informations critiques aux modules d'aide à la décision à travers l'entreprise.

Le MES a pour rôle principal de faire une liaison entre le niveau planification de la production et le niveau exécution, qui n'est pas considéré précisément par les logiciels comme les MRP et les ERP. En effet, pour cette liaison, deux systèmes d'information différents doivent inter-opérer : *le système d'information de gestion de l'entreprise* (composé par les automates API et la supervision) et *le système d'information de contrôle de la fabrication* (composé par les progiciels de gestion industrielle, GPAO, ERP...). Le MES joint ces deux systèmes. Le positionnement de ce logiciel entre les deux systèmes planification et exécution est illustré dans la Figure II.4.

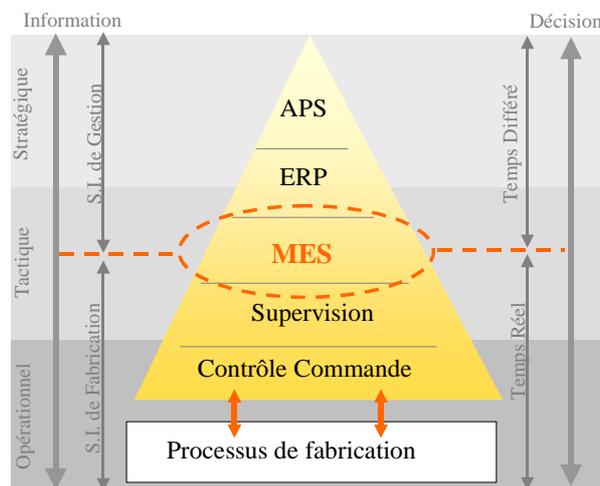


Figure II.4 : positionnement du MES dans l'entreprise

Dans l'architecture plus précise décrite dans la Figure II.5, on constate la communication et l'échange d'informations entre le MES et les différents systèmes inférieur, supérieur et le décideur dans un atelier de production. Premièrement, une communication est réalisée entre « le système opérant » et « le système contrôle-commande ».

Cette communication se réalise par des protocoles de terrain (Ethernet industriel) défini entre les actionneurs et les capteurs installés dans le système opérant et l'Automate Programmable Industriel API ou « *Programmable Logic Controller PLC* » installé au niveau système contrôle-commande.

- (i) Le système d'exécution MES a en charge la communication permettant de relier les deux niveaux inférieur et supérieur de l'atelier.
  - (a) Premièrement, le système exécution MES reçoit les valeurs acquises du processus de fabrication et l'état d'avancement des opérations en cours renvoyés par le système contrôle-commande. Ces valeurs concernent par exemple : une alarme déclenchée, un événement survenu, la durée opératoire, le temps restant, le lot en cours de fabrication, l'analyse matières premières, etc.
  - (b) Nous sommes toujours en échange d'informations entre les deux niveaux d'exécution et de contrôle-commande, mais dans l'autre direction. Le niveau d'exécution MES a aussi le rôle d'élaborer les actions qui doivent être exécutées par le système contrôle commande. Ces actions consistent par exemple à déterminer la quantité d'un produit, le planning de la maintenance préventive, une fiche de sécurité, la procédure et le mode opératoire des ressources et des personnels, etc.
- (ii) Le niveau d'exécution MES, a la charge de communiquer avec le niveau planification du « système d'informations de l'entreprise ».
  - (c) Le système d'exécution doit transférer le résultat de ce qui a été fabriqué au système d'informations de l'entreprise. Ces résultats expriment les opérations de fabrication expliquées dans le paragraphe (a), mais d'une façon plus générale et utile pour le niveau supérieur. Ces informations sont par exemple la date de mise à disposition, l'état des ordres de fabrications, l'état des ressources, l'état des matières premières, l'état du personnel, la traçabilité des produits, les dates de début et fin des opérations, etc.
  - (d) Toujours entre les deux niveaux supérieurs, le système d'exécution MES reçoit les commandes clients qui sont planifiées par le système d'information de l'entreprise afin de réaliser les actions nécessaires pour la production de ces commandes. Les informations reçues par le MES sont, par exemple, les procédures générales de production, les ressources, l'état des stocks, etc.
- (iii) Le niveau d'exécution doit aussi communiquer des informations nécessaires avec le décideur.
  - (e) Le niveau d'exécution doit transférer ce qui a été réalisé par les opérateurs au décideur pour pouvoir conduire la fabrication. Ces informations sont, par exemple, l'état de la fabrication et notamment les événements survenus ou des alarmes déclenchées.
  - (f) Le système exécution permet aussi d'envoyer aux opérateurs les fabrications à réaliser définies par le décideur. Ces fabrications peuvent être modifiées suite à un événement ou à une alarme déclenchée. Les décideurs doivent souvent s'adapter à ces changements.

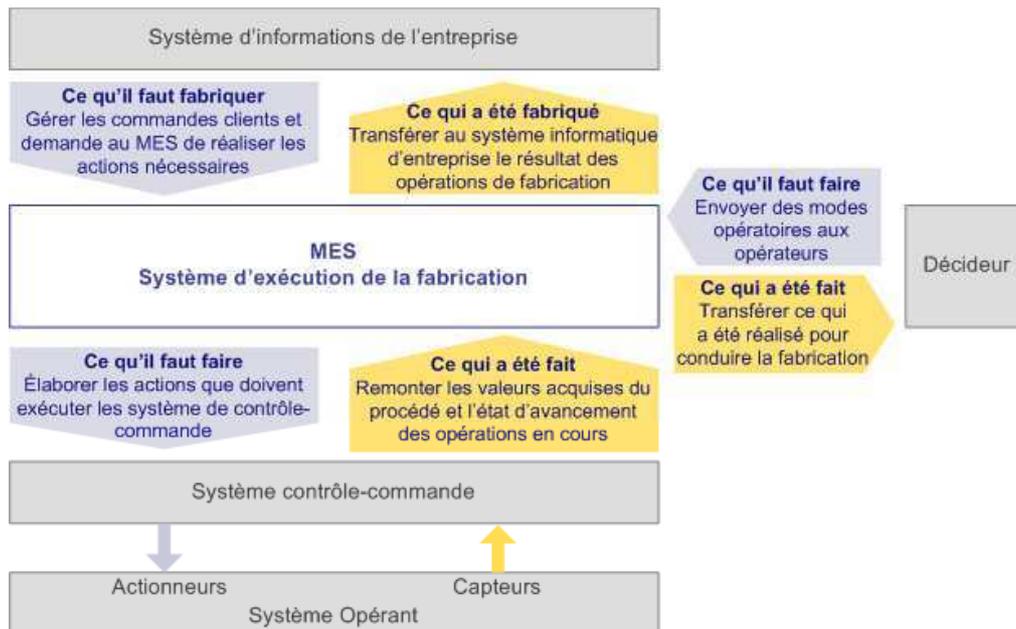


Figure II.5: échange des informations entre le système contrôle-commande, le système d'informations de l'entreprise et le décideur grâce au système d'exécution de la fabrication ou MES

### II.3.1.2. Norme S95 et fonctions du MES

La norme « S95 » est issue des travaux réalisés à l'ISA « *Instrumentation, Systems & Automation Committee* » [ANSI/ISA-S95, 2000] par le groupe SP95. Il s'agit du 95<sup>e</sup> projet traité par ce comité et la norme S95 constitue aujourd'hui une référence reconnue par l'ensemble des acteurs du domaine du MES. Cette norme s'attache à la formalisation des échanges autour du système de production vers les autres domaines de l'Entreprise. En effet, dans un projet MES, il faut penser à la structuration fonctionnelle (références articles, nomenclature, équipements...). Ces informations sont partagées par d'autres systèmes d'information. Les problématiques d'intégration sont fondamentales. L'intérêt du S95 est de structurer la réflexion pour réaliser l'intégration. La norme S95 décrit la notion d'activités dont ont besoin les applications MES pour être déployées. D'après [Peyrucat, 2003] les activités en question sont au nombre de 8 : planification, dispatching, traçabilité, acquisition/historisation, gestion des ressources, analyses et définition. Nous pouvons dire que les objectifs d'utilisation de la norme S95 en quelques mots sont :

- d'établir des vocabulaires communs pour tous les types de procédés (continus, discontinus et discrets),
- de trouver une vue commune des problèmes,
- de construire un modèle commun,
- de définir des structures de données et d'achever rapidement les spécifications.

L'analyse menée dans la S95 conduit à modéliser les fonctionnalités du MES comme indiqué dans la Figure II.6 d'après [ANSI/ISA-S95, 2000]. Grâce aux travaux de la S95 et son succès, le MES peut définir aujourd'hui ces fonctions d'analyse de performance, de traçabilité, etc.

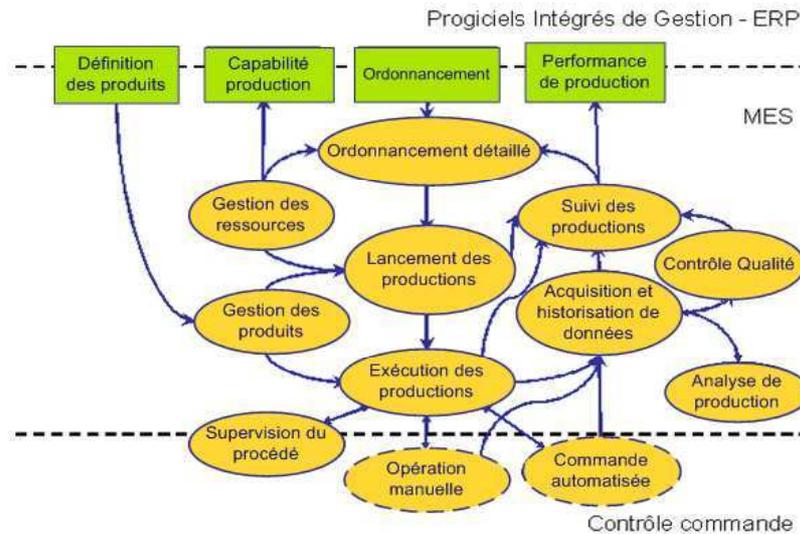


Figure II.6 : modèle opérationnel de la S95 (ORDINAL Technologies, d'après ANSI/ISA-S95)

MESA « *Manufacturing Enterprise Solutions Association* », association américaine spécialisée du MES, a défini les fonctionnalités de cet outil [MES, 2001]. Par la suite, nous expliquons ces fonctionnalités et l'avantage et le rôle de chacune pour le pilotage.

(1) *Gestion des ressources* : cette fonction du MES peut assurer la gestion de toutes les ressources de l'atelier (équipements, personnel, documents, etc.), suivre en temps réel l'évolution de leur état, prendre toutes les dispositions pour que chacune d'elles soit disponible au moment où on en a besoin, conformément au planning de fabrication, enregistrer l'historique de leur utilisation.

(2) *Ordonnancement* : le rôle est d'ordonnancer les activités et les produits pour optimiser les performances de l'atelier en tenant compte de l'état réel des équipements et des personnels disponibles.

(3) *Cheminement des produits et des lots* : l'avantage est de déterminer le cheminement des produits et des lots dans l'atelier conformément aux recettes ou gammes de fabrication utilisées et en tenant compte de l'état réel de l'atelier (pannes, retards, etc.), permettre l'exécution de tâches non prévues dans la recette (recyclages, nettoyages, mises en attente, etc.).

(4) *Gestion des documents* : son rôle est de gérer et distribuer tous les documents nécessaires à l'exploitation de l'atelier (recettes, procédures, schémas, cahier de quart, etc.).

(5) *Collecte et acquisition de données* : avec cette fonction, le MES est capable de fournir les interfaces permettant de collecter les données de production en provenance de l'atelier, que celles-ci soient saisies manuellement par les opérateurs ou acquises automatiquement par le système de contrôle-commande.

(6) *Gestion du personnel* : cette fonction, permet de gérer les acteurs de l'atelier, mettre à jour leur disponibilité, enregistrer qui a fait quoi, quand et pendant combien de temps ; la gestion du personnel peut être utilisée par la fonction de gestion des ressources pour l'attribution des tâches.

(7) *Gestion de la qualité* : le rôle est d'analyser en temps réel l'évolution de tous les indicateurs qualité d'où qu'ils viennent (procédé, laboratoire, etc.), identifier les problèmes

potentiels, signaler ces problèmes aux acteurs de l'atelier en recommandant des actions (changement de consigne, demande d'inspection, etc.).

(8) *Gestion du procédé* : cette fonction doit analyser l'évolution du procédé, identifier les problèmes potentiels, corriger automatiquement ces problèmes ou les signaler aux opérateurs en recommandant des actions.

(9) *Gestion de la maintenance* : son rôle est de planifier les tâches visant à maintenir l'outil de production dans l'état nécessaire à une production optimale (maintenances périodique, préventive et corrective) et de maintenir un historique de ces activités.

(10) *Traçabilité produit* : elle doit permettre de connaître à tout moment l'état de chaque batch, lot ou campagne de production engagée (dans quel équipement se trouve-t-il, qui travaille dessus, quels ingrédients sont utilisés, quelles sont les conditions opératoires, etc.), de maintenir un historique qui permet de retracer la généalogie de tout batch, lot ou campagne fabriqué.

(11) *Analyse des performances* : cette fonction permet de comparer les résultats obtenus aux objectifs fixés par l'entreprise, les clients ou les contraintes réglementaires et de fournir des rapports aux utilisateurs.

Même si l'apparition du MES est relativement récente, les fonctionnalités expliquées comme la traçabilité, l'ordonnancement, la gestion de procédé, la gestion des ressources, la gestion de stocks... ne sont pas nouvelles pour le monde industriel. La nouveauté vient plus précisément de l'interactivité entre les fonctionnalités.

### **II.3.1.3. Contrainte du MES pour le pilotage**

Dans le concept du pilotage d'atelier de production, nous constatons que le MES ne répond pas à toutes ces questions comme :

- *quels sont les impacts d'un aléa survenu sur le système dans le futur ?*
- *Quels sont les conséquences d'un changement des équipements de fabrication ?*
- *Quels sont les effets d'une modification des paramètres de pilotage sur le système ?*

Les utilisateurs du MES disposent d'un outil performant qui leur donne des informations sur le très court terme et leur permet de prendre des décisions. Cependant, ils ne disposent d'aucun outil permettant de garantir que la décision qu'ils prennent est la bonne, ce qui peut parfois avoir des conséquences graves dans leur fabrication. En effet, la prise de décision pour le pilotage du système de production se fait sans connaître les évolutions des nouvelles valeurs décidées dans la production. La majorité des outils d'exploitation comme le MES n'utilise pas l'expérience acquise pour optimiser les solutions proposées. Ce manque de projection dans le futur peut être comblé par l'utilisation d'un logiciel de simulation de flux. C'est la raison pour laquelle nous détaillerons ce type de logiciel dans le paragraphe suivant.

### **II.3.2. Simulation de flux à événements discrets (SED)**

La simulation est l'activation dans le temps du modèle étudié, à partir d'hypothèses que l'on veut tester. La simulation met en œuvre la description que constitue le modèle afin de connaître son comportement dynamique et de pouvoir prédire l'effet de tel paramètre ou scénario sur le système [Claver *et al.*, 1997]. [Gogg, 1993] définit la simulation comme l'art et la science de la création d'une représentation d'un processus ou d'un système dans le but

d'expérimenter et d'évaluer. [Pegden, 1995] précise que la modélisation et la simulation de flux sont le processus de conception d'un modèle d'un système réel et de conduite d'expérimentations sur ce modèle dans le but de comprendre le fonctionnement et d'évaluer différentes stratégies de pilotage. La simulation de flux permet donc de reproduire le comportement dynamique d'un processus réel sur un ordinateur, sans aucun risque et avec une grande rapidité d'exécution, puis de répondre à des questions du type « *Qu'est-ce qui se passe si... ?* ».

La « Simulation de Flux permet » :

- d'observer le comportement dynamique d'un système : simuler pour comprendre
- d'expérimenter des solutions de changement : simuler pour améliorer
- d'utiliser le modèle pour prédire son comportement : simuler pour anticiper

En « production et logistique », la simulation est principalement utilisée pour :

- analyser les flux physiques et informationnels,
- analyser les états des ressources.

De façon synthétique, on peut dire que « la simulation de flux à événements discrets » :

- est un outil adapté aux systèmes complexes,
- ne nécessite pas de modélisation mathématique,
- permet un niveau de détail pouvant être élevé,
- présente une forme proche du système réel,
- grâce à la visualisation, apporte des arguments de communication et met en confiance,
- offre la possibilité de tester différentes organisations,
- aide à prendre de meilleures décisions.

### **II.3.2.1. Évolution des outils de simulation pour l'ingénierie**

[Pidd, 2004] propose une classification mettant en évidence six catégories d'outils de simulation suivant deux critères : la polyvalence et la facilité d'utilisation. La Figure II.7 illustre cette classification.

Les premiers outils de simulation sur ordinateur destinés à l'ingénierie de production « *industrial engineering* » sont apparus dans les années 1950. L'un des pionniers est Jay W. Forrester, qui est à l'origine de la dynamique des systèmes en 1956 et de nombreuses applications sur ordinateur.

C'est dans les années 1960 que sont apparus les premiers langages informatiques destinés à la simulation à événements discrets : GPSS « *General Purpose Simulation System* », CSL « *Continuous Simulation Langage* », SimScript, Simula, etc.

Les années 1970 constituent une période d'expansion pour la simulation grâce aux progrès de l'informatique. Alors qu'auparavant, la modélisation était réalisée par programmation et la simulation proprement dite obtenue uniquement par calculs, la simulation interactive et visuelle « *Visual Interactive Simulation* » présentée par [Hurion, 1976] s'est développée et est à l'origine du premier outil « moderne », « *See-Why* ». Ces outils ont permis de s'affranchir en grande partie de la connaissance d'un langage de

modélisation et ont apporté une aide supplémentaire à l'analyse des flux grâce à des animations graphiques du processus. C'est aussi dans cette décennie qu'est apparu le langage DEVS « *Discrete Event System Specification* » et les premières applications de simulation distribuée.

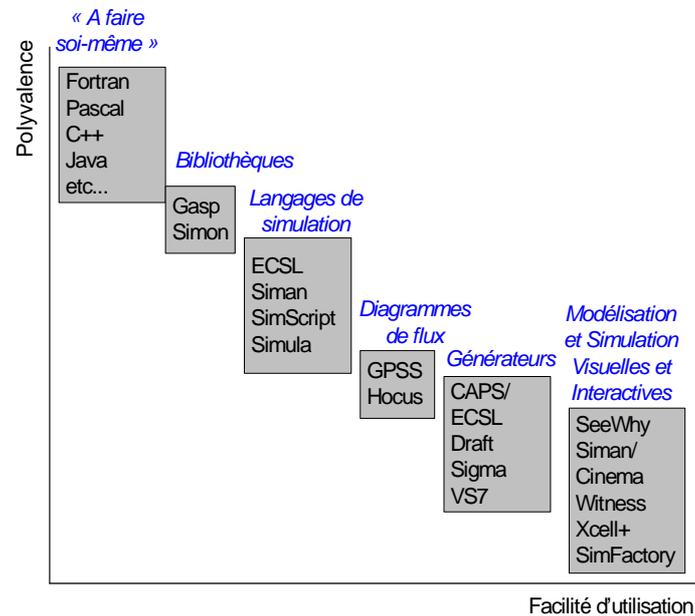


Figure II.7: classification en fonction de la polyvalence et de la facilité d'utilisation [Pidd, 2004]

Dans les années 1980, la production industrielle a subi une *profonde* mutation pour s'adapter aux évolutions des marchés. De nouveaux concepts sont apparus tels que le Juste-à-Temps (JIT), OPT, les ateliers flexibles (FMS), la logistique, etc. qui ont entraîné la disparition progressive des méthodes tayloriennes. Parallèlement, l'informatique a aussi connu une profonde évolution avec l'apparition des ordinateurs personnels, ce qui a permis un essor considérable des outils de simulation pour l'ingénierie. De nombreux logiciels ont vu le jour et la plupart existent encore aujourd'hui, sous une version plus évoluée : *Witness*, *Hocus*, *Genetik*, *Siman*, *Promodel*, etc.

A partir des années 1990 et jusqu'à nos jours, les outils de simulation n'ont pas apporté de grandes nouveautés, mais des améliorations notables sont apparues concernant la facilité de modélisation VIMS « *Visual Interactive Modelling Systems* », les possibilités d'animation et la représentation en 3D, l'ouverture ou la compatibilité avec d'autres applications informatiques (feuilles de calcul, bases de données, GPAO, ERP, MES, etc.), la distribution sur internet, le couplage avec des algorithmes d'optimisation, etc.

Avec l'arrivée du concept de SCM « *Supply Chain Management* », de nouveaux besoins sont apparus en simulation de flux, pas seulement limitée à un atelier mais plutôt à des réseaux d'ateliers et d'entrepôts, et nécessitant parfois une forte interaction avec des simulateurs de plans de production (PIC, PDP, ordonnancement). La conception et le pilotage d'une chaîne logistique entraînent en effet de nombreuses questions : *si l'on ajoute une nouvelle usine et deux nouveaux entrepôts, quel sera l'effet sur les stocks ? Les pics de demande affectent-ils la chaîne ? Quels sont les effets d'une modification des paramètres de gestion des stocks sur le niveau des stocks ? Comment réduire les stocks sans avoir d'impact sur le taux de service ?*

Le marché des outils de simulation est très concurrentiel. Nous présentons ici un aperçu des principaux outils classés suivant cinq catégories :

- généralistes : Anylogic, Arena, eM-Plant, Enterprise Dynamics, Extend, MicroSaint, Promodel, Quest, Simul8, Witness, etc.,
- spécialistes : Automod (convoyeurs, véhicules, portiques, balancelles), Demo3D (manutentions),
- spécialistes Supply Chain : Eurobios SCS, SupplyChainSIM, scMod/scSIM,
- procédés : Human (opérateurs), Jack (opérateurs), iGrip (robots),
- complémentaires : ExpertFit, StatFit (analyse statistique), OptQuest (optimisation).

### II.3.2.2. Classification de la simulation selon différents critères

Une classification des modèles de simulation est proposé par [Law et Kelton, 1991] qui distingue les modèles physiques des modèles logico-mathématiques :

- les *modèles physiques* sont ceux dans lesquels le système réel est représenté par une réplique ou une maquette, à une échelle différente et éventuellement à l'aide de matériaux différents. Ils sont utilisés à des fins d'entraînement : simulateurs de vol, de conduite, maquettes de véhicules pour des essais aérodynamiques, etc.,
- les *modèles logico-mathématiques* ou symboliques sont définis par des relations logiques et quantitatives, qui sont manipulées et changées pour voir comment le modèle du système réel réagit. Ils sont exécutés sur des ordinateurs. C'est exclusivement ce type de modèle qui sera présenté dans ce chapitre.

Une autre distinction concerne la prise en compte d'aléas ou de variations aléatoires dans le modèle :

- si le système est indépendant de l'influence de variables aléatoires ou imprévisibles, on utilise un *modèle déterministe*,
- si les aléas jouent un rôle significatif dans le comportement du système (exemple typique : les pannes), on utilise un *modèle stochastique*.

Une troisième catégorie distingue :

- les *modèles statiques*, pour lesquels le temps n'intervient pas. Par exemple un modèle comptable permettant de calculer le bénéfice en fin d'année à l'aide d'un tableur ;
- les *modèles dynamiques*, pour lesquels le comportement est une fonction du temps. Par exemple le système de manutention dans une usine. Enfin, à l'intérieur des modèles dynamiques, on distingue :
  - les *modèles à événements discrets* (ou discontinus) dans lesquels les changements d'état ne surviennent que lors d'événements tels le début ou la fin d'une opération, la mise en attente d'une pièce dans un stock, la libération d'une ressource, etc.,
  - les *modèles continus*, plus adaptés aux flux continus, qui utilisent des équations mathématiques pour prendre en compte les changements d'état qui s'effectuent

de façon continue au cours du temps. Les valeurs des variables d'état sont recalculées régulièrement selon un pas d'horloge d'après ces équations. Par exemple un réacteur chimique,

- les *modèles combinés* (ou mixtes), qui intègrent les deux aspects. Par exemple : l'industrie métallurgique ou agroalimentaire.

Dans [CER, 1988], on trouve encore une autre classification de la modélisation pour la simulation de flux en fonction de l'approche :

- *L'approche par événements* : c'est l'approche la plus générale. Elle consiste à rassembler tous les événements qui peuvent se produire et à décrire la logique des changements d'état. On peut distinguer dans la logique des changements d'état :
  - des règles liées aux modes opératoires sur le procédé de fabrication. Exemple : fin de l'usinage d'une pièce,
  - des règles liées à la conduite / gestion. Exemple : si le lot A est prêt avant le lot B, alors démarrer la fabrication du lot C sur le traitement thermique. La difficulté des règles de conduite aux postes de fabrication est une des difficultés de cette approche. Une fois le travail effectué pour la phase de modélisation, l'écriture du modèle consiste à programmer la logique des changements d'état. Le logiciel doit être en mesure de stocker la liste des événements créés. Le déroulement de la simulation consiste en la recherche, dans la liste, du prochain événement prévu. L'échéancier est le module qui gère l'avance du temps au fur et à mesure que les événements apparaissent.
- *L'approche par activités* : C'est une approche qui s'appuie sur un raisonnement naturel : un procédé est décrit comme l'enchaînement d'activités et d'attentes. On peut le regarder à travers les activités en indiquant les conditions nécessaires à leur début et à leur fin. Les attentes débutent à la fin de chaque activité. Elles se terminent lorsque les conditions nécessaires à l'activité suivante sont réunies. La modélisation consiste à programmer les conditions de déclenchement et de fin des activités. A chaque incrémentation du temps, on examine si les conditions de début et de fin des activités sont réalisées ;
- *L'approche par processus* : on parle de cette approche lorsque la modélisation consiste à rassembler des processus. Les processus sont formés de séquences d'événements et d'activités : durée d'une activité, utilisation d'une machine, stockage de pièces, etc. Ces processus peuvent être paramétrés. Dans le logiciel, ils correspondent à des sous-programmes ou à des primitives avec lesquels on peut décrire le fonctionnement d'une installation. La puissance d'un logiciel sera liée aux processus mis à la disposition de l'utilisateur (manutention par robot, par convoyeur, etc.).

### **II.3.2.3. « SED » dans le cycle de vie d'un système de production**

La simulation à événements discrets est la simulation la plus utilisée dans le domaine des flux logistiques. Par la suite de ce chapitre, nous nous limiterons donc à cette catégorie de simulation qui peut être classée en fonction de la phase du cycle de vie dans laquelle se trouve le processus simulé : conception, amélioration ou exploitation. La Figure II.8 met en évidence cette classification.

- (i) Une grande majorité des applications est réalisée dans les phases de conception d'un nouveau processus ou d'amélioration d'un processus existant. La simulation apporte une aide pour dimensionner les stocks et les équipements, vérifier les règles de gestion, mesurer les conséquences d'événements aléatoires (par exemple, rupture d'approvisionnement, annulation de commande ou commande urgente, etc.).
- (ii) Une utilisation émergente de la simulation est son utilisation comme émulateur. L'idée est d'utiliser un simulateur pour reproduire le comportement d'un système de production réel, ce simulateur étant commandé par le futur système de pilotage de l'unité de production. Cette disposition permet la mise au point du système de pilotage alors que le système réel de production n'existe pas encore, le but étant de réduire la durée de la phase de mise au point de l'unité de production. Notons par ailleurs que le développement des possibilités de couplage de la plupart des outils facilite ce type d'utilisation de la simulation.
- (iii) En phase d'exploitation opérationnelle d'un processus, la simulation peut être utilisée comme outil d'aide au pilotage afin de déterminer ou d'affiner certains paramètres avant l'exécution de la production. Elle est un complément intéressant à d'autres outils de planification tels que les ERP, plutôt destinés à gérer le moyen ou le long terme.
- (iv) Dans cette même phase d'exploitation, une possibilité encore peu rependue de la simulation consiste à la coupler en temps réel avec le processus réel « *on-line* » afin de permettre un pilotage réactif ou correctif. Les simulations sont déclenchées à partir d'événements qui se produisent sur le système réel et permettent ainsi de mesurer les dérives par rapport aux objectifs visés : dépassement du délai en cas de rupture d'approvisionnement, saturation de stocks en cas d'annulation de commande, etc. Si la dérive est jugée inacceptable et doit être minimisée, la simulation peut ensuite être utilisée pour rechercher la correction à appliquer aux variables de pilotage.

Avant d'utiliser cet outil, il est important de savoir ce que l'on peut en attendre, notamment par rapport aux outils de modélisation mathématique. Voici une liste non exhaustive des possibilités offertes par la simulation de flux à l'utilisateur dans les trois phases du cycle de vie d'un processus :

- (i) *en conception* : justifier et quantifier les investissements nécessaires, spécifier et illustrer le cahier des charges, définir les caractéristiques globales, choisir entre des projets contrastés, identifier les goulots d'étranglement, etc.,
- (ii) *en amélioration* : identifier les problèmes existants, évaluer diverses propositions de modification, choisir entre plusieurs solutions d'amélioration, garantir les résultats d'une modification, choisir les règles de pilotage des flux et de gestion des files d'attente, étudier l'influence des perturbations, déterminer les capacités des ressources, etc.,
- (iii) *en exploitation* : prévoir des délais (en complément d'un ERP et d'un ordonnancement), aider à la décision en pilotage, etc.

La Figure II.8 met en évidence le nombre d'applications de simulation dans chacune de ces phases. Même si les applications destinées à concevoir ou améliorer un processus sont aujourd'hui les plus courantes, les perspectives offertes par la simulation « on-line » pour l'aide au pilotage d'un processus sont prometteuses.

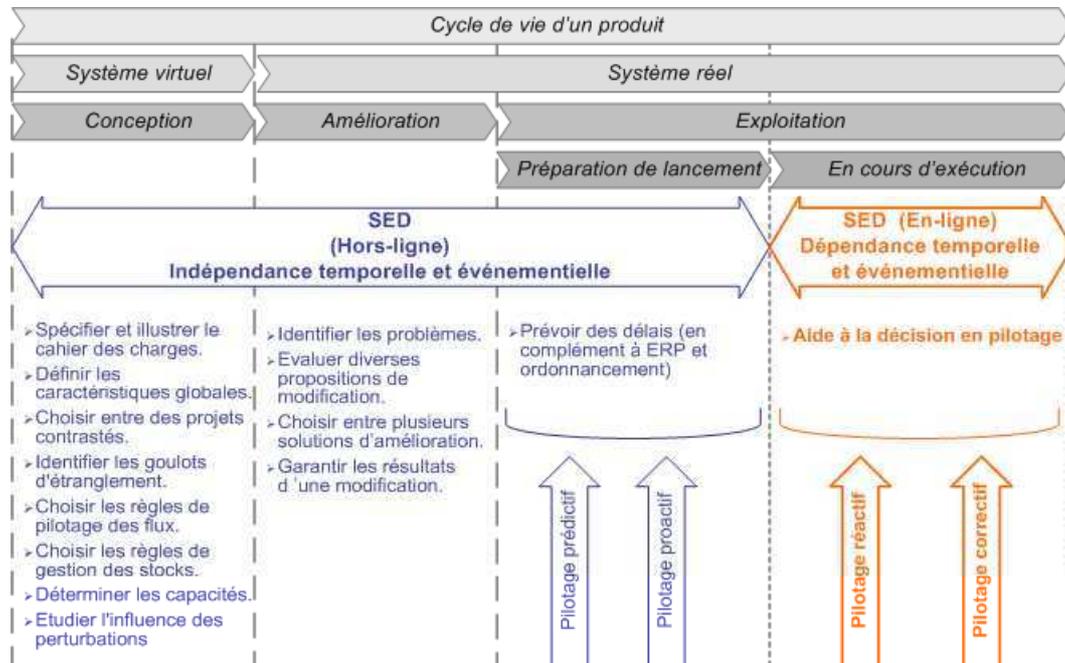


Figure II.8 : répartition des applications de simulation en fonction de la phase du cycle de vie du processus

#### II.3.2.4. Contraintes d'utilisation des outils de simulation

Nous avons vu un aperçu des avantages d'application de la simulation et ses potentiels très vastes dans les différents niveaux hiérarchiques de l'entreprise, dans tous les types de flux et dans toutes les phases du cycle de vie d'un produit. Cet outil pourrait être un outil performant et utile dans toutes les phases, si elle était utilisée pertinemment [Kosturiak et Milan, 1997]. Cependant concrètement, aujourd'hui, ce potentiel et ces possibilités ne sont pas appliqués dans leur totalité [Vernadat, 1999]. Par la suite, nous aborderons les limites des applications de la simulation.

- (i) *Le problème de qualité de données utilisées dans la simulation* : cet outil permet toujours d'obtenir un résultat, mais n'apporte rien quant à sa validité par rapport au système réel que l'on simule. Un point très important concerne la qualité des données utilisées par la simulation. Elle n'est pas capable de donner des résultats justes si les données sont imprécises. Il est indispensable de vérifier la validité de ces données sous peine d'obtenir des résultats sans commune mesure avec ceux obtenus sur le système réel. Cela est particulièrement critique quand le système simulé est d'un niveau de complexité ne permettant pas une vérification analytique des résultats fournis par la simulation.
- (ii) *La difficulté de modéliser jusqu'à un niveau de détail représentatif du système réel* : ils ne peuvent décrire les caractéristiques d'un système qui n'a pas été complètement modélisé. La phase de modélisation se déroule généralement en plusieurs étapes. On commence par construire un modèle global du système, puis on l'affine progressivement, en validant chaque étape avant de

perfectionner le modèle. Le problème qui se pose lors de la modélisation est de savoir jusqu'à quel niveau de détail il faut aller pour que le modèle soit représentatif de la réalité. Il est donc préférable de rechercher à affiner le modèle, plutôt que de se contenter d'un modèle trop général et imprécis.

- (iii) *La nécessité des échanges d'informations entre deux systèmes pilotage et système physique* : en effet, les outils de simulation actuels sont très orientés vers la modélisation des flux du système physique de l'atelier. Mais ils ne considèrent pas la gestion des échanges de ces informations entre le système physique et le système pilotage, alors qu'il est nécessaire de modifier régulièrement un modèle de simulation pour reproduire au mieux le processus physique et le processus de pilotage ou bien pour les évaluer.
- (iv) *Le problème d'optimiser la performance du système par la simulation* : l'outil de simulation est capable de répondre à des questions comme "Qu'est-ce qui se passe si...?". Il n'est pas capable d'optimiser la performance du système. Une fois que le modèle est programmé et validé, la simulation fonctionne comme une boîte noire en fonction d'un scénario de fonctionnement. Elle ne fait donc que reproduire le comportement du système modélisé.
- (v) *La difficulté de modéliser un système de pilotage en intégrant le processus de prise de décision dans la simulation* : cette difficulté est relative au problème précédent. Les activités de décision influent naturellement sur les performances de l'atelier, mais en effet, ces activités ne sont pas prises en compte dans le processus d'évaluation de l'impact des actions déclenchées sur la performance du système physique. Prises en compte, de telles activités permettent d'interpréter les données issues du modèle de simulation. Les outils de simulation du commerce comme Arena, Witness, Promodel, GPSS, Extend... ne sont pas encore adaptés pour modéliser le processus de pilotage d'un système de production en prenant en compte les décisions.
- (vi) *La difficulté d'intervenir sur le modèle de simulation* : cela est également relatif au problème d'optimisation de la performance, expliqué ci-dessus. La possibilité d'intervenir durant la simulation sur le modèle de façon automatisée, suite à l'application d'un plan d'action, résultat du processus de pilotage, est limité [Berchet, 2000]. Ces interventions peuvent être, par exemple, la modification de l'organisation physique du système, modification d'une règle de gestion, etc. Ces types d'intervention en cours de simulation sont limités et ne sont pas encore intégrés dans les outils actuels. Cette limite s'explique effectivement par le fait que la prise de décision et son impact sur le système de production ne sont pas pris en compte en temps réel, au cours de la simulation. Il faut ainsi attendre la fin du modèle de simulation pour analyser les résultats, analyser les causes, retrouver les nouvelles valeurs pour les variables, modifier ces paramètres et puis relancer la simulation avec ces nouvelles valeurs de variables.
- (vii) *Le problème de modélisation d'un modèle de simulation et la complexité des concepts utilisés* : la modélisation de la simulation est toujours réservée à des spécialistes capables de traduire les équipements du système réel sous la forme de modules de l'outil de simulation. En effet, les modules de modélisation n'ont pas toujours une correspondance avec les entités du système réel et exigent des

connaissances et une expérience en modélisation [Bakalem, 1996]. Le manque d'expérience par tous les utilisateurs rend difficile l'utilisation de l'outil et la compréhension de cette démarche. En conséquence, pour une meilleure compréhension par l'utilisateur simple de la simulation, les programmations et les concepts utilisés doivent être simplifiés sur la forme, la présentation... Par exemple en utilisant un langage générique, ce qui peut aussi résoudre le problème de réutilisation des modèles.

- (viii) *La difficulté de cohérence entre les modèles statique et dynamique* : le modèle statique présente les caractéristiques structurelles du système de production et le modèle dynamique son comportement en fonction de l'évolution du temps. La cohérence entre ces deux modèles est difficile du fait de l'utilisation de formalismes différents pour les deux modèles. Le couplage des méthodes d'analyse et les modèles de simulation ont eu une solution pour la difficulté du modélisation de système physique, du système de décision et d'information.

### **II.3.2.5. Simulation hors ligne, usage le plus courant pour le pilotage**

Aujourd'hui, la « *simulation hors ligne* » est assez répandue dans l'industrie manufacturière et les applications portant sur des ateliers de production sont nombreuses. Elle est appliquée principalement dans les phases de conception et d'amélioration d'un processus. On peut aussi l'utiliser en phase d'exploitation, en pilotages prédictif et proactif, en complément d'outils de planification ou d'ordonnancement. On peut par exemple rechercher une séquence optimale de lancement ou encore déterminer la taille optimale des files d'attente, ainsi que leurs règles de gestion, tout en prenant en compte les phénomènes aléatoires.

Le niveau de détail du modèle de simulation apporte des informations que ne fournissent pas les autres outils. Le temps de réponse de la simulation de flux, très nettement inférieur à celui du système réel, permet de tester un grand nombre de combinaisons des paramètres en couplant au modèle un algorithme d'optimisation [Fontanili et Ponsonnet, 1999]. Au moment du lancement d'une production, la meilleure solution trouvée par la simulation est « *injectée* » dans l'outil de pilotage réactif du système réel. Comme il n'y a aucun couplage direct entre le modèle de simulation et le système réel, les simulations sont lancées en initialisant le modèle soit dans un état « *vide* » et « *disponible* », soit dans un état obtenu après une période de montée en régime. Dans ce deuxième cas, l'état initial du modèle ne correspond donc pas exactement à l'état du système réel à un instant donné.

## II.4. Optimisation en couplant les méthodes simulateur/analytique dans un atelier de fabrication intermittente

Les objectifs de performance que l'on souhaite atteindre en production sont souvent contradictoires. Il est difficile de trouver une solution optimale qui satisfasse tous les critères de performance, comme par exemple un niveau de stock très faible, des coûts réduits et une réponse rapide à la demande du client. Cette complexification des systèmes de production nécessite l'utilisation de méthodes d'optimisation. Ces méthodes doivent servir d'aide à la décision pour dimensionner les nouveaux équipements et déterminer les paramètres de pilotage appropriés en fonction des critères de performance souhaités. En illustrant notre propos avec l'exemple d'un atelier de type job shop, nous proposons une démarche qui utilise la complémentarité d'une résolution analytique et simulateur.

Dans un premier temps, la résolution analytique permet de cibler très rapidement des populations de solutions proches de l'optimum et de réduire le nombre de combinaisons à tester. Elle donne des renseignements statiques sur les éléments, indépendamment les uns des autres, comme par exemple la capacité de chaque machine, la capacité des stocks d'encours, les gammes à utiliser, etc. A ce stade de l'étude, ni les phénomènes aléatoires dans le système, ni la dynamique des flux ne sont pris en compte et la solution est basée sur des données déterministes. On peut qualifier cette résolution de statique ou capacitaire. Dans un second temps, il est nécessaire d'intégrer les interactions entre les différents éléments du système pour comprendre son comportement dynamique. La simulation de flux est un des outils capables, non seulement de vérifier la solution proposée par la résolution analytique, mais aussi de fournir les informations manquantes sur la dynamique des flux en prenant en compte des données stochastiques et des événements aléatoires.

L'un des intérêts de commencer par une résolution analytique est d'obtenir certaines données utiles à la construction du modèle et d'autres données pour alimenter les simulations proprement dites. Sans résolution analytique préalable, le nombre de solutions à tester avec la simulation peut s'avérer très important et entraîner de ce fait un grand nombre de simulations et donc un temps de résolution très long. En effet, pour les systèmes de production complexes, la simulation de flux est un travail très fastidieux, qui monopolise des ressources tant pour sa modélisation que pour les nombreux essais de simulation qui s'en suivent. La réduction de l'espace de solutions par résolution analytique permet un gain de temps non négligeable, compte tenu de l'ampleur de la tâche, en sélectionnant *a priori* les solutions optimales par rapport à des critères et des contraintes prédéfinis. Dans ce chapitre, nous montrerons au travers d'un exemple tout l'intérêt du couplage ou de la complémentarité de ces deux méthodes et enfin, nous analyserons les résultats et concluons sur l'intérêt de cette démarche.

### II.4.1. Optimisation en théorie

#### II.4.1.1. Les méthodes analytiques

Les méthodes analytiques cherchent à représenter une situation réelle par un modèle mathématique, puis à identifier les meilleures décisions dans le modèle en espérant qu'elles seront aussi les meilleures dans la réalité. La situation est modélisée par des contraintes, dont le but est de séparer le possible de l'impossible. Usuellement, les décisions sont évaluées à l'aide de fonctions objectifs ou économiques. Cela revient donc à trouver le minimum (ou le maximum) d'une fonction objectif parmi les solutions qui respectent les contraintes. Il existe

de nombreuses méthodes qui dépendent fortement de la fonction objectif, de la nature des contraintes et du type des variables de décision [Minoux, 1983].

Pour les problèmes qui ne sont pas NP-complets, la résolution est faite par un algorithme polynomial, à condition que le polynôme soit de degré raisonnable. Certains problèmes ont de « bonnes » caractéristiques, qui permettent de les résoudre à l'aide d'une formule de récurrence. Les méthodes de programmation dynamique peuvent alors éventuellement permettre de résoudre le problème avec une complexité polynomiale ou pseudo-polynomiale. Les processus stochastiques concernent tous les problèmes aléatoires, en particulier des problèmes de fiabilité (de systèmes, de composants électroniques...) et des phénomènes d'attente. La programmation linéaire est très souvent utilisée pour résoudre des problèmes combinatoires. Elle permet de résoudre les problèmes dans lesquels les variables sont continues. Lorsqu'il y a des variables discrètes, programmation linéaire et méthodes arborescentes peuvent être combinées.

La programmation non linéaire peut aussi être utilisée. La possibilité de modéliser des contraintes ou des fonctions objectifs non linéaires offre une puissance de modélisation très importante, mais les algorithmes de résolution des programmes non linéaires sont significativement moins efficaces que ceux de la programmation linéaire. Les méthodes de type A\* ou branch and bound sont couramment mises en œuvre pour trouver la solution exacte d'un problème de recherche opérationnelle. Pour une résolution efficace, un soin particulier est apporté au calcul des bornes supérieures ou inférieures pour la valeur de la solution. La programmation par contraintes permet de mettre en œuvre rapidement et efficacement de telles méthodes de recherche arborescente. Plusieurs bibliothèques (logiciels) d'optimisation, commerciales ou non, reposent sur cette approche (ILOG Solver, Chip, Mozart/Oz, FaCiLe). De nombreux logiciels d'optimisation de problèmes réels utilisent ainsi cette technologie.

Lorsque la solution optimale ne peut être obtenue en un temps raisonnable, on a souvent recours à des méthodes approchées de type heuristique ou métaheuristique. De nombreux travaux ont été effectués pour étudier les algorithmes et heuristiques, en particulier pour l'optimisation de l'ordonnancement, pour des jobs shop statiques et dynamiques [Gere, 1966], [Blackstone *et al.*, 1982], [Rajendran et Holthaus, 1999], [Jain et Meeran, 1999]. Un problème d'ordonnancement peut se caractériser par une série de jobs, chacun composé d'une ou plusieurs opérations. Les opérations doivent être effectuées dans un ordre déterminé sur des machines déterminées. L'objectif de l'ordonnancement est de trouver l'ordre des jobs qui minimise (ou maximise) un critère (ou plusieurs) de performance [Rajendran et Holthaus, 1999]. A cause du nombre considérable de combinaisons possibles, les problèmes d'ordonnancement de job shop sont dits NP-difficiles [Jain et Meeran, 1999]. La résolution des problèmes NP-complets est coûteuse en termes de puissance de calcul, dans la mesure où pour garantir une solution optimale cela nécessite une recherche exhaustive où toutes les solutions possibles doivent être essayées et évaluées. Comme une telle recherche exhaustive prend un temps de calcul démesuré pour les problèmes plus complexes, il est courant de sacrifier l'optimalité de la solution à l'efficacité de la recherche en guidant par une heuristique la recherche de solutions et en évaluant seulement une fraction de toutes les combinaisons.

#### **II.4.1.2. Les méthodes simulatoires**

Le modèle analytique n'est toujours pas suffisant pour prendre les décisions qui s'imposent pour concevoir ou optimiser les performances d'un atelier de fabrication. Par

exemple pour définir les règles optimales de pilotage, le système de décision doit posséder des informations précises sur le système de production. La simulation permet de modéliser des systèmes sans utiliser un langage mathématique, mais plutôt en manipulant des éléments (machines, ressources, stocks, etc.) caractérisés par des états (disponible, occupé, etc.) qui vont nous permettre de représenter la réalité. La dynamique est simulée grâce à une horloge et des événements qui modifient les états de ces éléments. Quand aucun modèle analytique n'existe, la simulation fournit des résultats qui sont ensuite analysés pour permettre une optimisation. Une optimisation est donc possible, cependant elle peut nécessiter une grande quantité de simulations en modifiant à chaque fois un grand nombre de données, ce qui rend fastidieux le travail de simulation. En effet, la complexité croissante des systèmes de production fait que souvent, aucun modèle analytique satisfaisant n'existe. C'est pourquoi de nombreux travaux cherchent à coupler l'utilisation de la simulation à une résolution analytique pour faire de l'optimisation en utilisant des méthodes approchées, comme les métaheuristiques.

Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction, par échantillonnage d'une fonction objectif. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution [Collet et Rennard, 2006]. Les métaheuristiques les plus classiques sont celles fondées sur la notion de parcours. Dans cette optique, l'algorithme fait évoluer une seule solution sur l'espace de recherche à chaque itération. La notion de voisinage est alors primordiale. Les plus connues dans cette classe sont le recuit simulé [Prudius et Andradottir, 2005], la méthode Tabou [Glover et Laguna, 1997], [Nowicki et Smutnicki, 1996], la recherche à voisinage variable (les stratégies d'évolution) [Rechenberg, 1973], la méthode GRASP [Feo et Resende, 1988] ou encore les méthodes de bruitage.

Dans cette classification, l'autre approche utilise la notion de population. La méta heuristique manipule un ensemble de solutions en parallèle, à chaque itération. On peut citer les algorithmes génétiques [Holland, 1975], [Goldberg, 1989], [Koza, 1992], l'optimisation par essais particuliers [Chong et Yoke Hean Low, 2006], les algorithmes de colonies de fourmis. La recherche dans ce domaine étant très active, il est impossible de produire une liste exhaustive des différentes méta heuristiques d'optimisation. La littérature spécialisée montre un grand nombre de variantes et d'hybridations entre toutes ces méthodes, particulièrement dans le cas des algorithmes évolutionnaires pour faire de l'optimisation multi-objectif [Deb, 2001]. La littérature donne quelques exemples d'optimisation multi-objectif basée sur la simulation, par exemple dans [Eskandari *et al.*, 2005] et [Baesler et Sepúlveda, 2001]. Seule une petite fraction des travaux concernent les problèmes de pilotage des opérations.

[Almeida *et al.*, 2001] utilisent une approche d'optimisation multi-objectif des paramètres de pilotage via la simulation dans une raffinerie de pétrole. La méthode qu'ils proposent est basée sur un algorithme génétique. En utilisant cette technique, les auteurs ont réussi à trouver une solution pour un problème réel de production en raffinerie avec trois objectifs : maximiser la production de diesel, maximiser la production de fuel et minimiser les coûts. [Allaoui et Artiba, 2004] propose une méthode basée sur la combinaison du recuit simulé et de règles de dispatching pour l'optimisation multi-objectif d'un flow shop via simulation. L'indisponibilité stochastique et déterministe des machines est considérée dans la stratégie d'optimisation. Les auteurs ont appliqué cette méthode pour résoudre un problème d'ordonnancement NP-difficile en optimisant les encours, le makespan et l'utilisation des ressources. [Gupta et Sivakumar, 2002] présentent une méthode d'optimisation multi-objectif

pour le pilotage de la fabrication de semiconducteurs via simulation basée sur la programmation linéaire. La méthode proposée a été utilisée pour trouver une solution Pareto optimale à un problème NP-difficile d'ordonnancement de tâches indépendantes sur une machine simple. Les objectifs à optimiser étaient le temps de cycle moyen et l'utilisation des machines. Un certain nombre d'études théoriques de type job shop ont été menées avec succès en utilisant cette méthode.

#### **II.4.1.3. La combinaison des deux approches dans la théorie**

La littérature met en évidence que la simulation est le plus souvent utilisée en premier lieu pour construire le modèle analytique. La phase d'optimisation intervient ensuite pour maximiser ou minimiser la fonction objectif. Pourtant, il nous semble intéressant d'adopter la démarche inverse, qui consiste à construire le modèle de simulation de flux en s'aidant des résultats d'une résolution analytique. [Hicks, 1999] a proposé une méthodologie en quatre étapes pour utiliser la simulation et l'optimisation pour la planification stratégique d'une chaîne logistique. Elle comporte d'abord une étape d'optimisation avec un solveur mixte pour dégager une structure générale du réseau qui satisfait les besoins prévus, minimise les coûts de structure et supporte les contraintes managériales prévues. Elle permet de trouver un optimum global très rapidement. Par contre, la solution ne donne qu'une image très approximative du système réel. La deuxième étape est une étape de simulation de flux du réseau par événements discrets. L'optimisation apporte une aide dans les choix de conception, mais ne donne aucune information sur le comportement dynamique. Par contre, la simulation de flux fournit des informations sur le comportement et peut aider dans le choix des règles de pilotage. La troisième étape consiste à optimiser les règles de pilotage pour définir les meilleures. L'auteur propose ici d'utiliser l'optimisation via la simulation selon les techniques classiques que l'on trouve dans la littérature et qui ont été détaillées précédemment. Enfin, la quatrième étape consiste à vérifier la robustesse du modèle proposé en variant les cas d'utilisation.

Nous proposons par la suite une démarche qui combine les deux approches. La méthode analytique sera d'abord utilisée pour choisir, parmi plusieurs gammes possibles, celles qui permettent de satisfaire les délais. Pour alimenter la simulation, une étape intermédiaire consistera à choisir une loi de distribution d'arrivée des gammes en fonction du temps. Nous utiliserons un tableur pour générer cette séquence d'arrivée des gammes. Ensuite, la simulation prendra le relais, alimentée avec le séquençement créé dans le tableur, d'abord pour vérifier les résultats donnés par la résolution analytique en termes de capacité, puis pour vérifier le comportement dynamique en termes de flux.

#### **II.4.2. Application pratique**

Nous allons illustrer nos propos avec un modèle d'atelier de production de type job shop et nous allons montrer la complémentarité entre les deux approches analytique et simulatoire afin de déterminer les paramètres de pilotage du système étudié. Les critères de performance habituellement utilisés dans les problèmes d'ordonnancement sont l'utilisation des postes de travail, le temps de cycle, le débit de sortie et le niveau de stock, qui sont à maximiser ou à minimiser suivant les cas. Une alternative à ces critères est le makespan, qui est souvent étudié par la communauté scientifique dans les problèmes d'ordonnancement de job shop. C'est d'ailleurs l'un des critères que nous avons retenu pour notre modèle et que nous allons minimiser. Rappelons qu'il s'agit de la durée entre le début de la fabrication de la première pièce jusqu'à la fin de la fabrication de la dernière pièce.

### II.4.2.1. Description du job shop

Cette étude de cas correspond à un atelier de fabrication intermittente. Dans ce type de production, les ordres de fabrication sont traités par lots et chaque lot suit une gamme spécifique. L'atelier est composé de différents postes de travail et chaque poste comprend un stock aval géré en FIFO à chaque entrée de machine. Le poste de travail M1 est un poste d'ébauche des pièces, le poste M2 réalise la finition et le poste M3 est capable d'enchaîner les opérations d'ébauche et de finition. Il y a deux types de pièces possibles, P1 et P2 (Figure II.9). Pour chaque pièce, il faut réaliser les deux opérations d'ébauche et de finition.

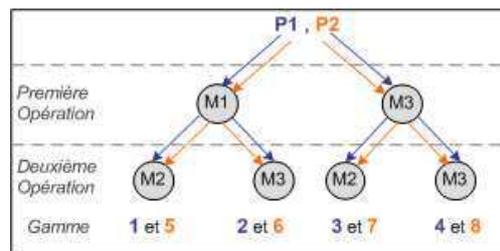


Figure II.9 : différentes gammes pour les deux pièces

Pour chaque pièce, quatre gammes sont possibles, soit au total huit gammes avec des temps de cycle différents suivant les machines et le type de pièce (Tableau II.1). Les gammes 4 et 8 réalisent les deux opérations d'ébauche et de finition sur le même poste de travail M3. Entre deux lots consécutifs d'une même pièce sur une même machine, il est nécessaire de réaliser un réglage. De la même façon, il y a un temps de setup pour passer d'un type de pièce à un autre. Les temps moyens de bon fonctionnement (MTBF) sur chaque machine et la durée moyenne de réparation (MTTR) sont aussi indiqués dans le tableau 2. (Tableau II.2).

Pièce	Gamme	Opération 1		Opération 2	
		Poste	Tcyc	Poste	Tcyc
P1	G1	M1	3	M2	4
	G2	M1	3	M3	4
	G3	M3	4	M2	4
	G4	M3	8		
P2	G5	M1	5	M2	3
	G6	M1	5	M3	6
	G7	M3	3	M2	3
	G8	M3	9		

Tableau II.1 : les temps de cycle des gammes (en 1/10 h)

	M1	M2	M3
MTBF	400	210	196
MTTR	100	40	4
SETUP (P1-P2 ou P2-P1)	15	20	25
REGLAGE (P1-P1 ou P2-P2)	5	5	10

Tableau II.2 : les lois de panne et de réglage (en 1/10 h)

Cet atelier travaille huit heures par jour, 250 jours par an, soit 2000 heures/an. Les lancements se font par lots de 100 pièces. La demande annuelle prévisionnelle est respectivement de 2500 pièces P1 et 4000 pièces P2. L'objectif principal est de satisfaire cette demande. Deux questions se posent :

- quelles gammes opératoires doit-on utiliser pour permettre une utilisation équilibrée des postes de travail ?
- quelle doit être la dimension des aires de stockage de chacun des postes ?

Pour répondre à la première question, nous allons utiliser une approche analytique basée sur des paramètres statiques moyens : demande, temps d'occupation des postes. Ceci nous permettra de déterminer un mix de gammes assurant un fonctionnement équilibré de l'atelier. Par contre, cette approche ne nous permet pas d'estimer la dynamique des flux de pièces (en particulier de connaître le nombre de réglage et de setup) ou de dimensionner les aires de stockage.

Pour répondre à la seconde question, nous devons donc simuler les flux dans l'atelier en nous basant sur le mix résultant de l'approche analytique. Bien souvent, les utilisateurs sont tentés de mettre en place la simulation sans faire d'approche analytique, puis de jouer avec le simulateur en faisant varier les paramètres jusqu'à obtenir un résultat correct. Ici, vu que les gammes opératoires sont flexibles, la combinatoire des mix de gammes est grande et il n'est pas certain que l'on trouve par essais erreurs, un mix convenable.

### II.4.3. Résolution par couplage des deux approches

La démarche que nous avons adoptée se déroule en trois étapes principales présentées dans la Figure II.10. La première étape nous permet de modéliser le problème sous la forme d'équations mathématiques. La résolution analytique de ce problème mathématique donne une solution statique correspondant aux gammes à utiliser pour satisfaire la demande en pièce dans le délai imparti. Par exemple, pour réaliser 25 lots de P1, le résultat de la résolution analytique donne une répartition en 6 gammes 1 et 19 gammes 2.

Avant de lancer la simulation, il faut générer au préalable une séquence d'ordres de lancement pour les commandes en respectant les résultats fournis par la résolution analytique. Cette séquence est obtenue en répartissant dans le temps les gammes de fabrication grâce à une loi de distribution aléatoire. Par exemple, pour une période de 150 jours ouvrables et la réalisation de 6 gammes P1, une répartition uniforme donnera un lancement des gammes P1 tous les 20 à 30 jours. Cette étape nécessite de compléter les hypothèses de départ, notamment pour déterminer la loi de distribution retenue ou encore choisir l'horizon de simulation (fini ou infini).

La dernière étape consiste à vérifier en dynamique les règles de pilotage de l'atelier. La simulation de flux permet cette vérification en tenant compte de l'évolution du temps. Si les résultats fournis par la simulation valident les résultats analytiques, il faudra réaliser d'autres simulations en mesurant l'influence de données stochastiques et non plus déterministes.

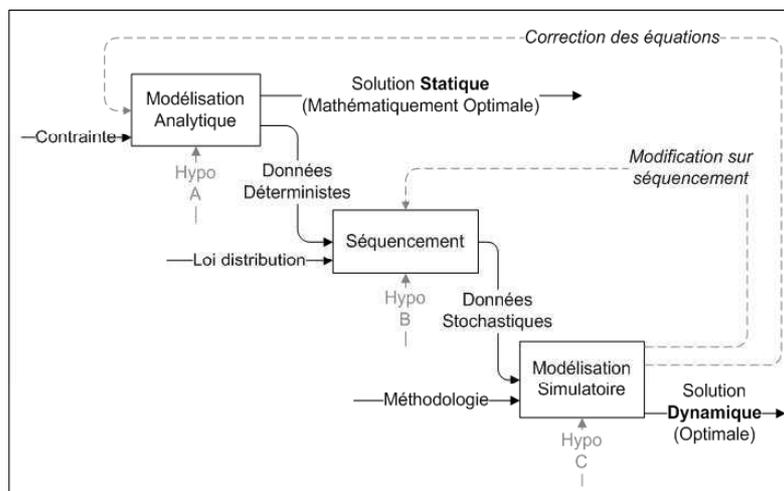


Figure II.10 : présentation de la démarche combinée

A l'issue de cette étape, nous pourrions appréhender les performances de notre modèle, ce qui nous permettra de définir les règles de pilotage à suivre. Si les résultats de la simulation ne satisfont pas les objectifs, alors il faut tester un ordonnancement différent. Le processus suivant (Figure II.11) illustre la démarche détaillée en trois étapes que nous avons adoptée pour cette étude de cas.

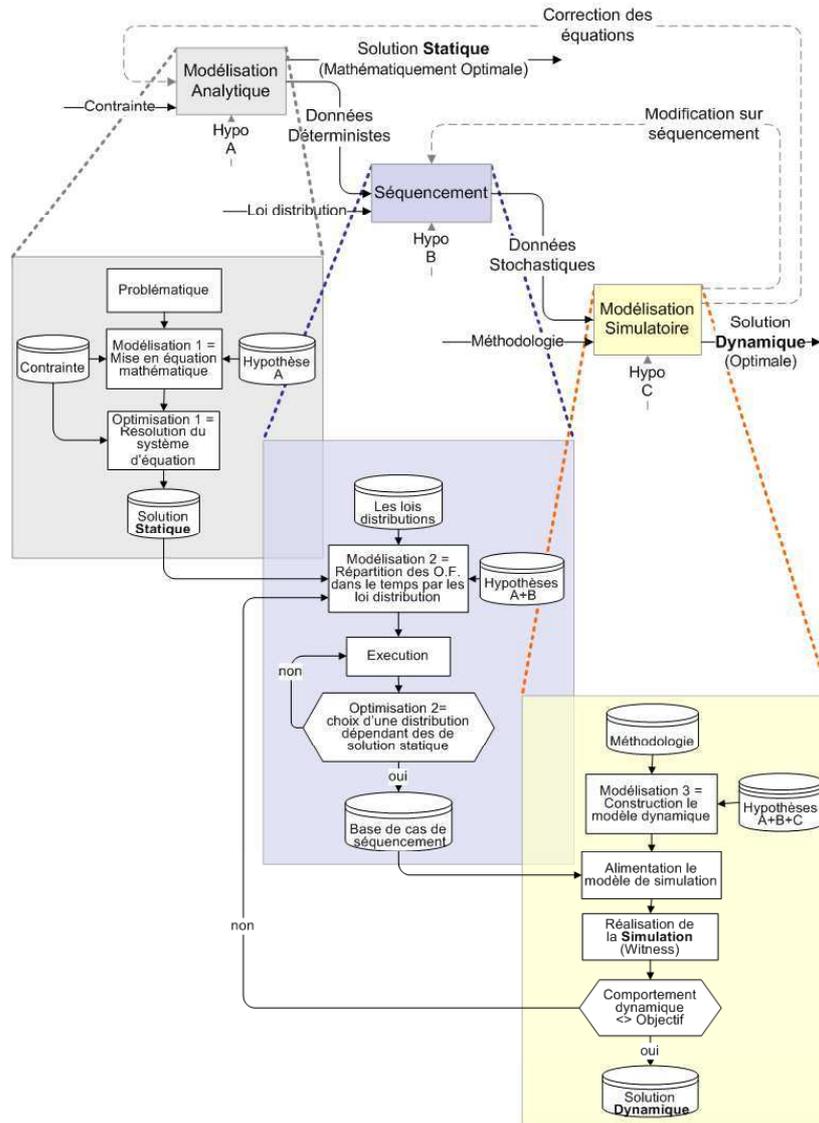


Figure II.11 : processus détaillé de complémentarité par les résolutions statiques, séquençement et dynamique

### II.4.3.1. Modélisation analytique

Dans cette étape, l'objectif et la problématique doivent être décrits sous la forme d'équations mathématiques. Les variables sont définies :

- $G_j$  : nombre de fois où un lot de pièces suit la gamme  $j$  ( $i=1..6$ )
- $C_{Pi}$  : temps copeau (usinage de pièces) du poste de travail  $i = 1..3$
- $SET_i$  : temps de setup du poste de travail  $i = 1..3$
- $REG_i$  : temps de réglage du poste de travail  $i = 1..3$
- $REP_i$  : temps de réparation du poste de travail  $i = 1..3$
- $D_i$  : temps restant disponible sur le poste de travail  $i = 1..3$

*Paramètres* : dans le modèle analytique, il est impossible de déterminer si deux lots passent successivement sur le même poste.

- correspondent à une même pièce et nécessitent un simple réglage,
- correspondent à deux pièces différentes et nécessitent un changement d'outil (setup).

Nous avons fait tourner le modèle en fixant, *a priori*, un taux  $\alpha$  de setup et  $(1 - \alpha)$  de réglage. Ce taux est identique sur tous les postes.

*Objectifs* : l'objectif est d'avoir un fonctionnement qui assure une charge minimale de l'atelier (de manière à pouvoir accepter de nouvelles commandes éventuelles) et un fonctionnement équilibré des postes de travail (pas de postes excessivement chargés). Pour cela, nous avons choisi de maximiser la somme des disponibilités  $D_j$  sur les postes. Pour avoir un temps de battement minimal sur chaque poste, nous avons ajouté des contraintes de disponibilité minimale sur chaque poste. Ce temps a été pris égal à 9 % du temps d'ouverture :  $D_i > 1800$ .

*Contraintes* : dans un premier temps, nous détaillerons les différentes tâches possibles dans un temps d'ouverture d'atelier  $T$ . Pour chaque poste de travail, le temps total d'ouverture est de  $250 \times 8$  h soit 20000 1/10 h. Ce temps comprend du temps de charge CP, du temps disponible D, du temps de réglage REG, du temps de setups SET et du temps de réparation REP. Soit  $i$  l'indice de la machine considérée, nous obtenons donc l'équation suivante :

$$\forall i, CP_i + D_i + REG_i + SET_i + REP_i = 20000$$

Il faut maintenant préciser le calcul de tous les termes de cette expression.

- Calcul du temps de charge  $CP_i$  : c'est le temps nécessaire pour produire l'ensemble des pièces sur chaque poste de travail. Pour le poste d'ébauche par exemple, le tableau 1 nous indique qu'il est utilisé par les gammes G1 et G2 des pièces P1 et par les gammes G5 et G6 des pièces P2. De même, les temps de cycle sont de 3/10h pour les pièces P1 et de 5/10h pour les pièces P2. Enfin, on sait que les lancements se font par lots de 100 pièces. Soient  $j$  l'indice de la gamme,  $G_j$  le nombre de gamme  $j$  réalisé sur la machine  $i$  et  $tc(j,i)$  le temps de cycle pour réaliser la gamme  $G_j$  sur la machine  $i$ . Ainsi, la charge totale se modélise par l'équation :

$$\forall i, CP_i = \sum_j tc(j,i) \cdot G_j$$

- Calcul du temps de setup  $SET_i$  : c'est le temps consacré au réglage de la machine quand on change de référence de pièce. Rappelons que nous avons choisi d'équilibrer le nombre de setups et de réglages, ce qui explique le coefficient 0.5. Soient  $Ts(i)$  le temps de setup pour la machine  $M(i)$ , nous obtenons :

$$\forall i, SET_i = \alpha \cdot Ts(i) \cdot \sum_j G_j$$

- Calcul du temps de réglage  $REG_i$  : soit  $tr(i)$  le temps de réglage pour la machine  $M(i)$ , nous obtenons :

$$\forall i, REG_i = (1 - \alpha) \cdot tr(i) \cdot \sum_j G_j$$

- Calcul du temps de réparation  $REP_i$  : le nombre de pannes est obtenu en divisant le temps copeau (le temps d'usinage ou de travail sur les pièces)  $Cp_i$  par le temps moyen de fonctionnement entre deux pannes  $MTBF(i)$ . Le temps de réparation est obtenu en multipliant le nombre de pannes par le temps moyen de réparation  $MTTR(i)$ .

$$\forall i, REP_i = CP_i \cdot MTTR(i) / MTBF(i)$$

- Contraintes sur le nombre de pièces à fabriquer : nous savons que les quatre premières gammes correspondent au produit P1, alors que les quatre dernières correspondent à P2. Nous pouvons donc écrire que :

$$G1+G2+G3+G4=25 \quad , \quad G5+G6+G7+G8=40$$

Résolution analytique : la résolution de notre modèle analytique a été réalisée à l'aide du solveur Lingo10.0. Ce solveur est un programme de résolution, qui combine plusieurs algorithmes. Suivant le type d'équation (linéaire ou non-linéaire), il choisit l'algorithme le plus adapté. Notre problème est de type PLNE (Programme Linéaire en Nombre Entier). LINGO le résout par des méthodes 'branch and bound'. Le Modèle sous Lingo est présenté dans la Figure II.12.

```

Max=D1+D2+D3 ;
! calcul du temps disponible;
CP1+D1+REG1+SET1+REP1=20000;
CP2+D2+REG2+SET2+REP2=20000;
CP3+D3+REG3+SET3+REP3=20000;
! calcul du temps copeau;
cp1=300*G1+300*G2+500*G5+500*G6;
cp2=400*G1+400*G3+300*G5+300*G7;
cp3=400*G2+400*G3+800*G4+600*G6+300*G7+900*G8;
! calcul temps setup;
SET1=alpha*15*(G1+G2+G5+G6);
SET2=alpha*20*(G1+G3+G5+G7);
SET3=alpha*25*(G2+G3+G4+G6+G7+G8);
! calcul temps réglage;
REG1=(1-alpha)*5*(G1+G2+G5+G6);
REG2=(1-alpha)*5*(G1+G3+G5+G7);
REG3=(1-alpha)*10*(G2+G3+G4+G6+G7+G8);
! calcul temps réparation;
REP1= 100/400*cp1;
REP2= 40/210*cp2;
REP3= 4/196*cp3;
! Respect de la demande ;
G1+G2+G3+G4=25;
G5+G6+G7+G8=40;
!! Disponibilité minimale de 9% sur chaque poste ;
D1>1800;
D2>1800;
D3>1800;
! Le nombre de gamme Gi est un entier;
@gin(G1);@gin(G2);@gin(G3);@gin(G4);@gin(G5);@gin(G6);@gin(G7);@gin(G8);
    
```

Figure II.12 : exemple de programmation du problème sous LINGO

Synthèse et critique des résultats analytiques : nous avons fait varier le taux  $\alpha$  de setup de 0 % à 100 % par pas de 20 %. Le Tableau II.3 donne le nombre de lots suivant chacune des gammes et la disponibilité de chacun des postes.

Setup	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Reglage	100%	80%	60%	40%	20%	0%
G1	7	7	7	6	6	6
G2	18	18	18	19	19	19
G3						
G4						
G5	7	7	8	9	10	10
G6						
G7	33	33	32	31	30	30
G8						
D1	6058	6026	5328	4626	3920	3850
D2	2075	2004	1863	2213	2075	1937
D3	1964	1888	2057	1805	1983	1836

Tableau II.3 : résultat de la résolution analytique

Les résultats analytiques nous indiquent que seules quatre gammes sont à retenir (G1, G2) pour les pièces P1 et (G5, G7) pour les pièces P2. Les proportions varient légèrement en fonction du paramètre  $\alpha$ . Ce taux de setup et de réglage ne peut être déterminé que par la simulation. L'important ici est d'obtenir une plage assez fine des règles de lancement en fabrication, règles sur lesquelles la simulation va pouvoir jouer de manière plus fine.

### II.4.3.2. Séquencement

Grâce à la simulation, il est possible de vérifier la dynamique de l'atelier, mais nous ne pouvons pas directement utiliser les résultats de la résolution analytique pour alimenter la simulation. En effet, il manque des données liées à la répartition des gammes sur l'horizon de fabrication. Une étape intermédiaire de séquencement est nécessaire. Pour notre travail, nous avons choisi d'utiliser un tableur pour générer aléatoirement ce séquencement. On répartit les gammes de fabrication obtenues dans le temps, comme le montre la Figure II.13.

		Nb Lot P1	25	Nb Lot P2	40
		Taille d'un Lot P1	100	Taille d'un Lot P2	100
		P1	Nh	P2	Nh
		Gamme 1	6	Gamme 5	9
		Gamme 2	19	Gamme 6	
		Gamme 3		Gamme 7	31
		Gamme 4		Gamme 8	
		Total P1	25	Total P2	40
		% P1	38%	% P2	62%
		Délaie Prévu	250		
Temps inter-arrivée Loi Normale					
P1			P2		
Inure	Lancement	Gamme P1	Lancement	Gamme P2	
1	P1	2	P2	7	
2					
3					
4					
5					
6			P2	7	
7					
8					
9					
10	P1	2			
11					
12					
13					
14			P2	5	

Figure II.13: un tableur pour générer le séquencement

Pour notre cas d'étude, nous avons choisi de créer le séquencement des lancements des ordres de fabrication :

- dans le cas déterministe, avec une répartition constante des intervalles de temps : les gammes sont toujours espacées du même nombre de jours,
- ensuite, dans le cas stochastique, avec une répartition aléatoire des intervalles de temps : les gammes sont espacées d'un nombre de jours qui suit une loi de distribution aléatoire. Pour notre travail, nous avons choisi une distribution normale.

Quelques hypothèses préalables ont été nécessaires. Tout d'abord, nous imposons que le premier lancement soit effectué le premier jour de la simulation. De même, nous avons choisi de ne pas lancer d'ordre de fabrication durant les dix derniers jours de simulation afin que toutes les pièces soient fabriquées dans le délai. Ainsi, la répartition des ordres de fabrication ne se fait en réalité que sur 240 jours, la simulation durant au total 250 jours. Indépendamment pour P1 et P2, on génère une première séquence aléatoire pour définir le

jour de lancement en utilisant une loi normale. Il suffit de fournir la moyenne et l'écart type souhaités qui correspondent à l'intervalle de temps moyen entre deux pièces successives. Une fois les jours de lancement choisis, on sélectionne la gamme qui sera utilisée avec une loi de probabilité basée sur les résultats analytiques. En raison du caractère aléatoire de cette répartition, il est nécessaire de lancer plusieurs exécutions successives pour obtenir une répartition de gammes identique au résultat analytique. Cette séquence permet d'alimenter correctement le modèle de simulation pour évaluer le comportement dynamique du job shop intermittent étudié.

### **II.4.3.3. Modélisation simulateur**

Nous pouvons dire que le modèle de simulation de flux se compose de trois modules. Le premier module s'occupe de la gestion du temps : c'est lui qui extrait le séquençement défini pour simuler l'ordre de lancement des gammes. Le second module est un générateur de pièces. Chaque fois qu'un lancement d'ordre de fabrication est réalisé, il fournit les pièces utiles à sa réalisation aux machines concernées. Les règles de pilotage sont définies au niveau des articles pour leur indiquer quel chemin ils doivent suivre. Le troisième module concerne l'atelier physique. Il comporte les postes de travail et les stocks.

Pour vérifier le comportement dynamique de l'atelier, nous réaliserons successivement trois scénarios de simulation : avec des données déterministes sur un horizon fini, avec des données déterministes à horizon infini et avec des données stochastiques à horizon infini. Ces scénarios nous permettront de vérifier la complémentarité des résultats statiques obtenus par la modélisation analytique avec les résultats dynamiques de la modélisation simulateur.

#### **II.4.3.3.1. Simulation déterministe à horizon fini**

Nous utilisons le terme déterministe, car le modèle de simulation est alimenté par des données déterministes, et l'on ne prend pas en compte les phénomènes aléatoires dans le modèle lui-même. Le résultat obtenu analytiquement indique le choix des gammes de production. Comme le montre le Tableau II.4, pour chaque produit, seules deux des quatre gammes possibles sont utilisées. Par exemple, la fabrication des 25 O.F. du produit P1 est obtenue par 6 O.F. suivant la gamme 1 et 19 O.F. suivant la gamme 2. Sachant que la taille de lot par O.F. est de 100 pièces et que les temps de cycle sont connus, on peut déterminer par calcul la charge de chaque machine.

La simulation doit vérifier que l'atelier peut produire les gammes définies dans les délais prévus. Tout d'abord, nous allons réaliser une Simulation Déterministe à Horizon FINI, qui est censée donner des résultats proches de la modélisation analytique. Le terme d'horizon fini signifie que le modèle de simulation se terminera avec un modèle « vide » : plus aucune pièce ne sera présente dans l'atelier et les machines seront toutes disponibles.

La Figure II.14 illustre l'évolution des encours dans l'atelier sur l'horizon de simulation. Cet enregistrement fait apparaître trois parties :

- une période de montée en régime pendant laquelle le niveau des encours augmente,
- une période de régime nominal pendant laquelle le flux moyen entrant est identique au flux moyen sortant, ce qui stabilise le niveau des encours,
- une période de fin de production, pendant laquelle l'atelier se vide. La simulation continue jusqu'à l'obtention d'un modèle vide à l'état final.

	Nb. Lot	Gamme	Nb. Gamme	Nb. Pièces	Nb. Op.M1	Nb. Op.M2	Nb. Op.M3
P1	25	1	6	600	6 [3]	6 [4]	
		2	19	1900	19 [3]		19 [4]
		3	0			0 [4]	0 [4]
		4	0				0 [8]
P2	40	5	13	1300	13 [5]	13 [3]	
		6	0		0 [5]		0 [6]
		7	27	2700		27 [3]	27 [3]
		8	0				0 [9]
Nb. Opération					38	46	46
Tps de charge dh/100					140	144	157

Tableau II.4 : la charge et le choix des gammes



Figure II.14 : niveaux des encours dans une simulation déterministe à horizon fini

On note une légère différence de 5 % au niveau du makespan entre le modèle analytique (20000 1/10 heures) et le modèle de simulation (20984 1/10 heures). Ceci entraîne un retard de la livraison des commandes de 13 jours par rapport au délai prévu. Cette différence s'explique par le fait qu'il y a un phénomène d'enchaînement des opérations dans la simulation, qui est inexistant dans le modèle analytique où les machines fonctionnent indépendamment les unes des autres. Une notion de précedence d'ordre de réalisation a été introduite, d'où l'apparition de ce décalage. Ce phénomène peut aussi s'expliquer par le fait que la ligne est vide au début de la simulation. Il y a donc de « l'inertie » avant qu'elle n'atteigne son régime permanent. Par contre, le taux d'occupation des machines est cohérent d'un modèle à l'autre, de même que le temps de charge de chaque machine (Tableau II.5).

La simulation permet d'obtenir des données plus précises sur le nombre de réglages et de setups effectués sur chaque poste.

	Nb. Op.	Analytique (= 20000)		Simulation (=20565)	
		% Occ.	Tps Charge	% Occ.	Tps Charge
M1	38	70,00%	14000	66.72%	14000,52
M2	46	72,00%	14400	68.62%	14399,22
M3	46	78,50%	15700	74.82%	15700,22

Tableau II.5 : comparaison du taux d'occupation et du temps de charge de chaque machine

	Setup		Réglage		Tps req+setup
	Nb.Setup	Tps.Setup	Nb.Réglage	Tps.Réglage	
M1	24	[15]	13	[5]	425
M2	11	[20]	34	[5]	390
M3	25	[25]	20	[10]	825
Tps totale	1205		435		

Tableau II.6 : le temps de réglage et de setup

### II.4.3.3.2. Simulation déterministe à horizon infini

Dans ce cas, nous réalisons la simulation sur une période suffisamment longue de régime nominal. Ce qui signifie que nous excluons de l'étude les périodes de montée en régime et de fin de production.



Figure II.15 : niveaux des encours dans une simulation à horizon infini

Dans notre travail, nous avons choisi une période de régime nominal d'un an faisant suite à une période de montée en régime de 2 ans (= 40000 dh). Les statistiques de simulation

sont donc fournies sur une année de régime nominal. Le niveau des encours se stabilisent entre deux valeurs (Figure II.15). Après cette période de montée en régime, on constate que l'atelier a la capacité de réaliser les commandes de 25 produits P1 et de 40 produits P2 sur une durée de 245 jours (Figure II.15). Cette durée est donc inférieure au délai prévu, ce qui permet de dire que l'atelier est dans ce cas capable d'atteindre l'objectif. Ces résultats confirment ceux fournis par la modélisation analytique. Par contre, les résultats de cette simulation permettent d'établir que le niveau des stocks en aval de chaque poste de travail est différent de celui obtenu par la modélisation analytique. La capacité maximum de stock est indiquée d'une valeur de 3 pour la machine usinage et d'une valeur de 4 pour la machine finition et usinage-finition.

#### II.4.3.3.3. Simulation stochastique à horizon infini

Dans ce dernier scénario, on utilise des données stochastiques qui sont plus proches de la réalité. Par exemple, nous avons utilisé une loi normale pour la distribution des Temps Inter Arrivées (TIA) des pièces et des temps de réglage et setup. De la même façon, nous avons utilisé une loi Erlang pour la distribution de MTBF et une loi Gamma pour la distribution de MTTR. Après une période de montée en régime de 3 ans (= 60000dh), on constate que l'atelier réalise les commandes de 25 produits P1 et de 40 produits P2 sur une durée de 265 jours au lieu de 250 jours (Figure II.16). La simulation stochastique à horizon infini fait donc apparaître un retard de 15 jours par rapport à l'objectif.

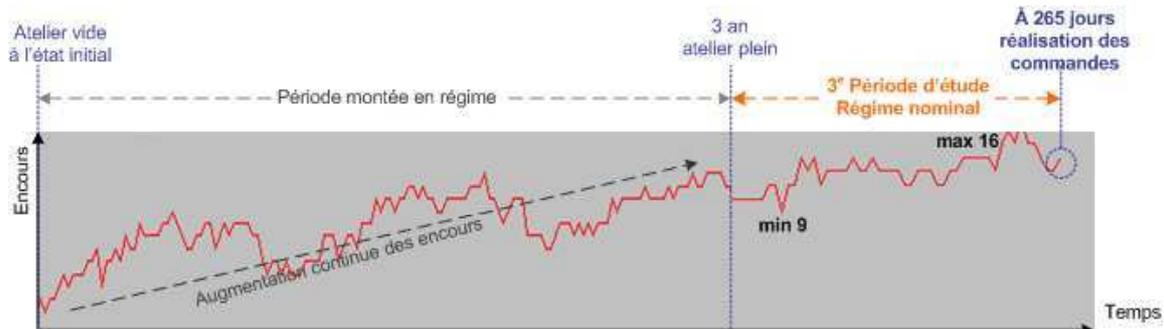


Figure II.16 : niveaux des encours dans simulation stochastique à horizon infini

Par ailleurs, comme pour les scénarios précédents, la simulation met en évidence que le niveau de stock en aval de chaque poste de travail doit être suffisant pour amortir les variations de flux. On constate une augmentation des capacités de stocks par rapport à la simulation déterministe en horizon infini. La valeur 9 pour la capacité de stock 1, la valeur 5 pour le stock 2 et la valeur 3 pour le stock 3. Les encours sont donc supérieurs au modèle déterministe.

## II.5. Conclusion de cette optimisation

Dans ce travail, nous avons proposé une démarche complémentaire de deux approches analytique et simulateur afin de dimensionner un atelier de production manufacturier. Nous nous sommes appuyés sur un cas d'étude d'un atelier de type job shop pour illustrer cette démarche.

Les résultats des différents scénarios de simulation confirment en partie les résultats obtenus par la résolution analytique, mais fournissent des résultats plus précis notamment sur la capacité minimale des stocks et le délai de réalisation.

La résolution analytique se justifie à plusieurs titres, en complément de la simulation :

- d'abord, elle permet de trouver très rapidement une solution optimale, globale ou locale,
- ensuite, elle fournit des informations très utiles pour guider les décideurs dans leurs choix, notamment pour des problèmes de dimensionnement et d'ordonnancement,
- enfin, elle facilite la construction d'un modèle de simulation de flux.

Par ailleurs, la simulation n'en reste pas moins recommandée pour appréhender le comportement dynamique du système modélisé et valider les règles de pilotage. La simulation apporte par exemple une information plus précise sur la capacité des stocks entre les machines par rapport à la résolution analytique. Pour la conception d'un système réel, cette précision peut s'avérer déterminante, à la fois sur le plan technique et sur le plan financier. Une erreur de dimensionnement de stock peut en effet avoir des conséquences fâcheuses sur les performances d'un atelier. Enfin, la littérature met clairement en évidence les limites de l'approche analytique seule pour traiter des cas complexes. Couplée à une approche simulateur, l'approche analytique reste donc attractive pour modéliser ces cas complexes.

## Références bibliographiques partie II

---

[Aléonard *et al.*, 1994] C. Aléonard, E. Dindeleux et R. Soënen, “Conduite des systèmes de production”, Techniques de l’Ingénieur, A 8 260-R 7 598, 1994.

[Allaoui et Artiba, 2004] H. Allaoui, and A. Artiba, “Integrating simulation and optimization to schedule a hybrid flow shop with maintenance constraints”, Computers & Industrial Engineering, Vol. 47, pp. 431-450, 2004.

[Almeida *et al.*, 2001] M. R. Almeida, S. Hamacher, M. A. C. Pacheco, and M. B. R. Velasco, “Applying genetic algorithms to the production scheduling of a petroleum refinery”, MIC'2001- 4<sup>th</sup> Metaheuristics International Conference, pp. 773-777, 2001.

[ANSI/ISA-S95, 2000] American National Standard, The Instrumentation, Systems, and Automation Society, “Enterprise-Control System Integration, Part I: Models and Terminology”, Approved 15 July 2000.

[Baesler et Sepúlveda, 2001] F.F. Baesler, and J. A. Sepúlveda, “Multi-Objective Simulation Optimization for a Cancer Treatment Center”, Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, 2001.

[Bakalem, 1996] Mohammed Bakalem, “Modélisation et simulation orientées objet des systèmes manufacturiers”, Thèse de Doctorat en Electronique - Electrotechnique-Automatique, Université de Savoie, soutenue le 4 juillet 1996.

[Barkmeyer *et al.*, 1999] Edward Barkmeyer , Peter Denno, Shaw Feng, Evan Wallace, et Albert Jones. “NIST Response to MES Request for Information”, NISTIR 6397, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999.

[Berchet, 2000] Claire Berchet, “Modélisation pour la simulation d’un système d’aide au pilotage industriel”, 2000, Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble.

[Blackstone *et al.*, 1982] J. Blackstone, D. Phillips et G. Hogg, “A State-of-The-Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations. International Journal of Production Research”, Vol. 20, pp. 26-45, 1982.

[Bouazdi et Renault, 1994] S. Bouazdi, D. Renault, “Supervision des procédés automatisés : guide technique et fichier produits pour une meilleure exploitation des installations automatisées”, CETIM, n°3 C59, 1994.

[BOURRIERES *et al.*, 2005] J.P. BOURRIERES, B. GRABOT, C. MERCE “Pilotage des systèmes multi-sites de production : outils industriels et méthodes avancées”, Techniques de l’Ingénieur, S 7662, 15 pages, 2005.

[**Cardin et Castagne, 2006**] O. Cardin, P. Castagne, “Utilisation de la simulation proactive : une aide au pilotage des systèmes de production”, 6<sup>e</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Simulation-MOSIM’06, Maroc, 2006.

[**CETIM, 1994**] Centre Technique des Industries Mécaniques, <http://www.cetim.fr/index.jsp>.

[**Cernaut, 1988**] CERNAUT, “La simulation des systèmes de production”, Cepadues editions, Toulouse, 1988.

[**Chong et Yoke Hean Low, 2006**] C.S. Chong and M. Yoke Hean Low, “A Bee Colony Optimization Algorithm to Job Shop Scheduling”, SIMTech, School of Computer Engineering, Nanyang Technological University, Winter Simulation Conference, 2006.

[**Cimax, 1998**], CIMAX, “Introduction à la supervision”, Edition Applicatif, n° 4, décembre 1997-janvier-février 1998.

[**Claver et al., 1997**] Jean François Claver, Jacqueline Gélinaer et Dominique Pitt, “Gestion des flux en entreprise : modélisation et simulation”, Livre, Éditions Hermès, Paris, 1997, ISBN 2-86601-575-4.

[**Collet et Rennard, 2006**] P. Collet et J.-P. Rennard, “Introduction to stochastic optimization algorithms”, Handbook of Research on Nature-Inspired Computing for Economics and Management, édité par J.-P. Rennard, IDEA Group Inc, 1100 pages, 2006.

[**Combacau et al., 2000**] M. Combacau, P. Berruet, E. Zamai, P. Charbonnaud et A. Khatab, “Supervision and monitoring of production systems”, Proceeding of the IFAC/IEEE MCPL’2000 conference, Grenoble, septembre 2000.

[**Deb, 2001**] K. Deb, “Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms”, John Wiley & Son, 2001.

[**Eskandari et al., 2005**] H. Eskandari, L. Rabelo, and M. Mollaghasemi, “Multiobjective simulation optimization using an enhanced genetic algorithm”, Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, 2005.

[**Esquirol et Lopez, 1999**] Patrick Esquirol et Pierre Lopez, Livre “L’ordonnancement”, Ed. Economica, Collection Gestion, Série : Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion.

[**Exera, 1996**] EXERA, “Guide de choix, système de supervision pour automatisme programmable”, n° EXERA : S3681F96, édition 1996.

[**Feo et Resende, 1988**] T.A. Feo and M. Resende, “A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem”, Operations Research Letters 8, pp. 67-71, 1988.

[**Fontanili et Ponsonnet, 1999**] F. Fontanili, R. Ponsonnet, “Integration of simulation and optimization tools for the control of a multiproduct assembly line with asynchronous transfer”, L’INstitut de l’Information Scientifique et Technique du CNRS, Cote INIST : T 130661, 1999.

[Gere, 1966] W. S. Gere, “Heuristics in jobshop scheduling”, *Management Science*, Vol. 13, No. 1, pp. 167-175, 1966.

[Gogg, 1993] J. Gogg, “Introduction to simulation”, proceedings of Winter Simulation Conference, pp. 9-17, 1993.

[Glover et Laguna, 1997] F. Glover and M. Laguna, “Tabu search”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.

[Goldberg, 1989] D. Goldberg, “Genetic algorithms in search, optimization & machine-learning”, Addison-Wesley, 1989.

[Gupta et Sivakumar, 2002] A. K. Gupta and A. I. Sivakumar, “Simulation based Multiobjective Schedule Optimization in Semiconductor Manufacturing”, Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, 2002.

[Hicks, 1999] D.A. Hicks, “A four step methodology for using simulation and optimization technologies in strategic supply chain planning”, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999.

[Holland, 1975] J. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, University of Michigan Press, Ann Harbor, 1975.

[Hurriion, 1976] R.D. Hurriion, “The design use and required facilities of an interactive visual computer simulation language to explore production planning problems”, PhD Thesis, University of London.

[Kosturiak et Milan, 1997] Jan Kosturiak et Milan Gregor, “FMS simulation : some experience and recommendations ”, *Revue Simulation Practice and Theory* n°6, pp. 423-442, 1997.

[Jain et Meeran, 1999] A.S. Jain and S. Meeran, “Deterministic job shop scheduling: past, present and future”, *European Journal of Operational Research*, Vol.113, pp. 390, 1999.

[Klingstam et Gullander, 1999] P. Klingstam, P. Gullander, “Overview of simulation tools for computer-aided production engineering”, *Computers in Industry* 38, pp. 173,186, 1999.

[Koza, 1992] J.R. Koza, “Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection”, The MIT Press, Cambridge, 1992.

[Law et Kelton, 1991] A.M. Law, W.D. Kelton, “Simulation modelling and analysis”, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, New York, 1991.

[Ly et al., 2000 ] F. Ly, A.K.A Toguyeni et E. Craye, “Indirect predictive monitoring flexible manufacturing system”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing systems*. Elsevier Science, Vol. 16, pp. 321-338, 2000.

[Marty, 1997] Claude Marty, Livre “Le juste-à-temps : produire autrement”, édition Hermès, Paris, 1997.

[MES, 2001] <http://www.mesa.org>, Site de l'association MESA International (Manufacturing execution System).

[Minoux, 1983] M. Minoux, "Programmation mathématique tomes I et II.", Dunod, 1983.

[Nowicki et Smutnicki, 1996] E. Nowicki and C. Smutnicki, "A fast taboo search algorithm for the job shop problem", Management Science, Vol. 42, No. 6, pp. 797-813, 1996.

[OPC, 2001] [www.opcfoundation.org](http://www.opcfoundation.org), Site de la fondation OPC (OLE for Process Control).

[Pegden, 1995] D. Pegden, "Introduction to simulation using Siman", McGraw-Hill, 1995.

[Peyrucat, 2003] Jean-François Peyrucat, "Informatique industriel, les logiciels de MES", Mesures 758, octobre 2003.

[Pidd, 2004] M. Pidd, "Computer Simulation in Management Science", John Wiley and Sons, 5<sup>th</sup> Edition, 2004.

[Prudius et Andradóttir, 2005] Andrei A. Prudius and S. Andradóttir, "Two Simulated Annealing Algorithms for Noisy Objective Functions", Georgia Institute of Technology, Winter Simulation Conference, 2005.

[Pujo et Kieffer, 2002] Patrick Pujo et Jean-Paul Kieffer, livre "Fondements du pilotage des systèmes de production", Chapitre 1, Hermes Science Publications, Paris, 2002.

[Rajendran et Holthaus, 1999] C. Rajendran et O. Holthaus, "A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops", European Journal of Operational Research Vol. 116, No. 1, pp. 156-170, 1999.

[Rechenberg, 1973] I. Rechenberg, "Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution", Frommann-Holzboog, 1973.

[Toguyeni *et al.*, 2002] Armand Toguyeni, Khalid Kouiss et Michel Combacau, Livre "Fondements du pilotage des systèmes de production", Chapitre 4 Supervision d'atelier, Hermes Science Publications, Paris, 2002.

[Vernadat, 1999] FB. Vernadat, "Requirements for simulation tools in enterprise engineering", Proc. 15<sup>th</sup> Int. Conference On CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, CARs & FOF'99, Aguas de Lindoia, SP Brazil, August 18-20, Vol.1, pp. MT5 - 19 – MT5-24, 1999.



## Partie III

### III. Simulation en ligne couplée à l'exécution

---

#### Sommaire détaillé de la partie III

<b>III. Simulation en ligne couplée à l'exécution.....</b>	<b>77</b>
<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>79</b>
<b>III.2. Simulation en ligne.....</b>	<b>79</b>
III.2.1. Les différentes formes de la simulation en exploitation .....	79
III.2.2. État de l'art sur la <i>simulation en ligne</i> .....	83
<b>III.3. Proposition de modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide de la simulation en ligne.....</b>	<b>87</b>
III.3.1. Échange de données entre les processus de pilotage et opérationnel.....	89
III.3.2. Analyse de la fonction principale niveau [A-0] du processus de pilotage en temps réel.....	92
III.3.3. Fonction [A1] - <i>Observer</i> le processus opérationnel en utilisant une <i>simulation en temps réel</i> .....	93
III.3.3.1. Caractérisation des données nécessaires .....	94
III.3.3.1.1. Disponibilité des données .....	94
III.3.3.1.2. Acquisition de données .....	94
III.3.3.1.3. Qualité et exactitude des données .....	94
III.3.3.1.4. Fréquence de synchronisation.....	95
III.3.3.2. Fonction [A11] - Calibrer le modèle.....	96
III.3.3.3. Fonction [A12] - Initialiser le modèle.....	97
III.3.3.4. Fonction [A13] - Adapter le modèle aux événements .....	97
III.3.3.4.1. Synchroniser les événements du modèle .....	98
III.3.3.4.2. Ajuster les paramètres.....	100
III.3.4. Fonction [A2] - <i>Se projeter</i> dans le court terme en utilisant une <i>simulation de projection</i> .....	101
III.3.4.1. Fonctions [A21] et [A22]- Sélectionner un critère de filtrage et Classifier les événements courants.....	102
III.3.4.2. Fonction [A23] – Filtrer les événements déclencheurs.....	103
III.3.4.3. Fonction [A24] – Simuler en accéléré .....	104
III.3.5. Fonction [A3] - Décider en utilisant une simulation de correction.....	105
III.3.5.1. Fonction [A31] – Évaluer la situation à $(t_i + \Delta t)$ .....	107
III.3.5.2. Fonction [A32] – Rechercher des solutions.....	107
III.3.5.3. Fonction [A33] – Évaluer les solutions.....	108
III.3.5.4. Fonction [A34] – Valider une solution adaptée .....	109

<b>III.4. Chronogramme d'utilisation de la simulation en ligne pour le pilotage en temps réel .....</b>	<b>109</b>
III.4.1. Processus général de pilotage à l'aide de la simulation en ligne .....	109
III.4.2. Comparaison entre différentes stratégies d'utilisation de la <i>simulation en ligne</i> .....	111
III.4.2.1. Stratégie d'utilisation de deux modèles de simulation et d'initialisation sur un état unique .....	111
III.4.2.2. Stratégie d'utilisation de deux modèles de simulation et d'initialisation sur des états successifs .....	112
III.4.2.3. Stratégie d'utilisation d'un seul modèle de simulation et d'initialisation sur un état unique .....	113
III.4.2.4. Problème de reprise de la simulation en temps réel.....	115
<b>III.5. Couplage entre Simulation et MES pour l'aide à la décision dans le pilotage ....</b>	<b>116</b>
III.5.1. État de l'art de la simulation couplée à l'exécution pour le pilotage d'atelier.....	117
III.5.2. Analyse du besoin et spécifications attendues pour le couplage.....	120
<b>III.6. Conclusion.....</b>	<b>122</b>

### III.1. Introduction

Dans cette partie, l'objectif est de mettre en avant l'utilisation de la simulation de flux en ligne pour aider au pilotage d'un processus opérationnel réel. Dans la partie II, les principaux outils informatiques utilisés pour le pilotage ont été présentés. Parmi ceux-ci, nous avons présenté tout particulièrement la simulation hors ligne utilisée le plus souvent en complément d'un outil d'ordonnancement, pour vérifier la faisabilité de la réalisation d'ordres de fabrication par exemple, tout en prenant en compte des phénomènes aléatoires (variations de temps de cycle, etc.), des interruptions prévues (changements de format, réglages, etc.) ou imprévues (pannes, etc.). Dans cette partie, nous allons mettre en avant l'idée principale de notre travail de recherche, qui consiste à utiliser la simulation pour piloter un processus en temps réel en étant connecté et synchronisé à ce processus, d'où l'appellation de simulation *en ligne*. Nous proposons en particulier une modélisation du processus de pilotage en temps réel, afin de décrire les différentes fonctions nécessaires. Nous abordons aussi différentes stratégies d'utilisation des simulateurs en ligne pour le pilotage, avec un ou deux modèles de simulation et avec plusieurs méthodes d'initialisation de ces modèles. Nous terminons cette partie par une discussion sur le couplage ou l'intégration de la fonction [Piloter un atelier en temps réel] à l'aide de la simulation en ligne dans un outil de MES. En effet, ce type d'outil répond à plusieurs fonctions de base décrites par la norme ISA S95, mais aucune fonction ne correspond à l'aide à la décision pour le pilotage, même si certaines permettent de prendre des décisions, mais sans aucune garantie du résultat. L'objectif de la simulation en ligne pour le pilotage d'un processus est d'apporter des informations objectives sur les conséquences d'un événement dans le court terme et, de la même manière, sur les différents scénarios envisagés dans le cas où cet événement entraîne un écart par rapport aux objectifs fixés.

### III.2. Simulation en ligne

Le pilotage réactif est fonction de l'évolution de l'état du système et des événements qui peuvent arriver au cours du fonctionnement par rapport à ce qui avait été prévu. Comme cela a été présenté dans la partie II, on peut utiliser des outils comme l'ordonnancement, la supervision, le MES, etc. pour assurer ce pilotage réactif. Dans cette thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement à un autre outil, très peu utilisé comme outil de pilotage réactif : la *simulation en ligne*, c'est-à-dire en phase d'exploitation du système et en temps réel par rapport à la production.

#### III.2.1. Les différentes formes de la simulation en exploitation

En plus des utilisations courantes (conception et/ou amélioration de processus), quelques travaux de recherche ont été menés pour démontrer l'intérêt de la simulation de flux comme outil de prévision à court terme, en phase d'exploitation de la production. Dans ce chapitre, nous proposons de faire un survol de la littérature concernant les différentes utilisations de la simulation en exploitation. Nous tenterons en particulier d'aborder de façon exhaustive et de définir les différents termes utilisés tels que *simulation en ligne*, *look-ahead simulation*, *hardware-in-the-loop*, *émulation*, etc.

La *simulation en ligne* signifie qu'il est possible de s'engager dans une simulation en cours et de valider immédiatement le résultat des simulations alternatives [Becker, 2005]. La simulation en ligne à événements discrets est aussi définie par [Manivannan et Banks, 1992] comme « un système automatisé capable d'effectuer des simulations déterministes et stochastiques en temps réel ou quasi en temps réel, pour la supervision, le pilotage, et

*l'ordonnancement* ». La simulation en ligne à événements discrets est donc l'un des outils pouvant être utilisé pour aider à la prise de décision en temps réel dans un atelier manufacturier.

Dans une *simulation en ligne* à événements discrets, les données courantes du système physique réel sont utilisées pour initialiser le modèle de simulation. Des simulations en ligne à événements discrets peuvent être effectuées pendant que l'atelier est en fonctionnement. Une nouvelle décision peut être prise d'après les résultats des simulations avant d'être directement transmise au système d'exécution réel [Davis, 1998].

Dans un autre domaine, celui des bâtiments publics, la simulation en ligne est un outil qui peut être particulièrement utile pour améliorer les aspects de la sécurité et de la planification à court terme dans les phases d'organisation et de fonctionnement [Hanisch *et al.*, 2003].

Le terme de simulation en mode *Look-ahead* est proposé par [Peters et Smith, 1998] et [Ramakrishnan *et al.*, 2002]. Une simulation *Look-Ahead* est lancée en temps réel et connectée au système de production pour connaître le fonctionnement du système à chaque instant. La simulation *Look-Ahead* est un outil prometteur pour prévoir les délais d'exécution et les délais de livraison.

Dans le domaine de l'électronique, on trouve le concept de simulation de type *Hardware In the Loop* ou *HILS* proposé par [Hanselmann, 1993] pour développer et simuler des systèmes de contrôle destinés à être connectés à des équipements physiques réels. Ce mode de simulation est uniquement utilisé en temps réel. Ce qui particularise ce concept est l'utilisation de vrais composants dans la boucle de pilotage, associés à des composants simulés. Les raisons qui motivent l'utilisation d'un simulateur *HILS* lors d'essais sur les systèmes de commande sont : soit le processus asservi n'est pas disponible, soit les coûts engendrés par sa construction sont très élevés, soit les essais comportent des risques importants pour la sûreté globale de l'opération, soit la nature du processus ne permet pas des tests déterministes dans son environnement naturel. Les simulateurs *HILS* intègrent un ordinateur au sein d'un environnement simulé. Cet environnement inclut une partie des composants du système physique comme par exemple les générateurs de valeurs de consigne, les capteurs, les actionneurs, ainsi que les composants servant à effectuer les diagnostics. Certains composants physiques (*hardware*) peuvent être utilisés et intégrés à la boucle (*in the loop*), d'où le nom donné à cette simulation.

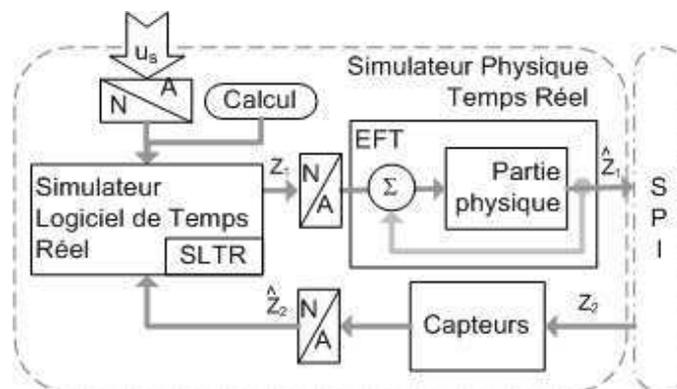


Figure III.1: principe d'utilisation de la simulation de type Hardware In the Loop d'après [Munteanu *et al.*, 2006]

La Figure III.1 illustre le principe d'un tel simulateur. Les applications sont nombreuses et de natures très différentes mais le fondement technologique des simulateurs *Hardware In the Loop* sont plus développés que leur conceptualisation. Par exemple, [Hanselmann, 1996] et [Kiffmeier, 1996] rapportent une application *HILS* dans l'industrie automobile et [Munteanu *et al.*, 2006] rapporte une application dans le domaine des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

Le terme *émulation* est aussi utilisé au sens de simulation et d'imitation, en particulier dans les domaines de l'informatique et de l'électronique. Plus précisément, ce terme décrit un principe général consistant à remplacer un système par un autre sans changement du fonctionnement d'un point de vue externe. Un émulateur est utilisé pour faciliter la correction d'un système et pour remplacer un système périmé ou inutilisable par un nouveau système. Il est donc possible de faire fonctionner l'*émulateur* comme un nouveau système, de la même manière que le système simulé [LeBaron et Hendrickson, 2000], [Brennan, 2000]. Par exemple, dans le domaine de l'électronique, un *émulateur* est un ensemble électronique conçu pour pouvoir remplacer physiquement le microprocesseur ou d'autres systèmes électroniques. L'*émulateur* est interfacé avec un ordinateur de développement pour permettre à l'ingénieur de piloter et d'observer le fonctionnement du microprocesseur émulé.

Le terme *émulation en temps réel* est aussi utilisé quand l'émulateur respecte les contraintes temporelles comme le temps de réponse, le cycle d'écriture, etc. [Davis, 1998], [McGregor, 2002]. Comme nous n'avons pas trouvé de comparaison précise dans la littérature, nous proposons dans le Tableau III.1 une synthèse des différences significatives entre *émulation* et *simulation*.

	Simulation	Emulation
1. Vitesse d'exécution	Grande vitesse	En temps réel
2. Évolution du modèle	Dépend de la vitesse du processeur de l'ordinateur	Synchronisé avec l'horloge
3. Objectif	Tester différentes solutions	Tester le système de contrôle Assurer la réaction du système de contrôle
4. Visualisation des informations d'état	Une seule image du système	Chaque sous-système a sa propre image
5. Décision	Décision instantanée dans la simulation	Temps de réponse dans les systèmes réels
6. Répétabilité	Nécessaire (pour recréer, comprendre des événements et corriger le modèle)	Incertaine (car les événements sont imprévisibles)
7. Robustesse	Pas nécessaire Car tous les événements qui influencent l'exécution sont contenus dans le modèle	Importante pour fonctionner sûrement dans des conditions variées

Tableau III.1: une synthèse de différences significatives dans l'utilisation et le fonctionnement d'une simulation et une émulation

La simulation de type *Hardware In the Loop* et l'*émulation* sont deux concepts basés sur le même principe d'utilisation en temps réel mais on peut distinguer quelques petites différences.

Dans la Figure III.2, on peut voir qu'un simulateur *Hardware In the Loop* a pour but de simuler des systèmes de pilotage connectés aux vrais équipements physiques.

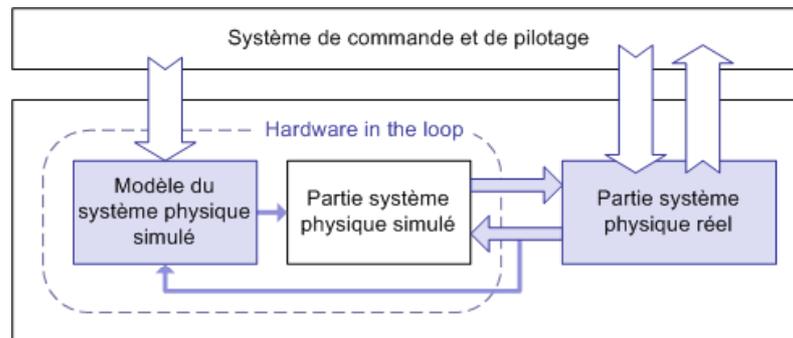


Figure III.2: principe d'utilisation d'une simulation de type « Hardware in the loop »

Par contre, la Figure III.3 illustre le principe général d'un *émulateur* pour remplacer le système physique réel. C'est la commande réelle qui est connectée à l'émulateur. Ce type d'application a pour objectif principal de mettre au point le système de commande en le testant sur un système physique *virtuel* plutôt que sur un système physique *réel*.

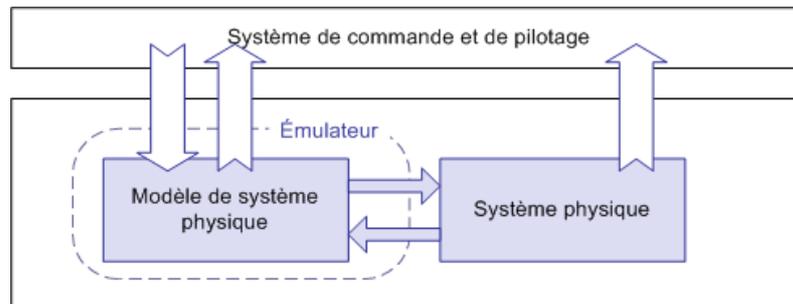


Figure III.3 : principe général d'une émulation

En conclusion, les termes précédents rencontrés dans la littérature mettent en évidence que la distinction n'est pas toujours aisée. La différence entre simulation *en ligne*, simulation *en temps réel*, simulation *Hardware In the Loop*, simulation *Look-Ahead* et enfin *émulation*, n'est pas universellement définie.

Pour cette raison, par la suite de ce manuscrit, lorsque nous parlerons de *simulation en ligne*, cela signifiera qu'il s'agit d'une simulation pour laquelle il y a :

- une utilisation de données provenant du système physique réel,
- une évolution en temps réel, synchronisée avec l'évolution du système physique réel.

La *simulation en ligne* nous semble être un outil prometteur, mais pour lequel les réalisations pratiques dans l'industrie sont peu courantes, notamment dans le domaine de l'industrie manufacturière ou de process. Par la suite de ce travail, nous allons donc faire un état de l'art des applications et des travaux basés sur la *simulation en ligne* dans le domaine de la production industrielle.

### III.2.2. État de l'art sur la *simulation en ligne*

Dans les travaux que nous avons recensés, les auteurs démontrent l'intérêt de la *simulation en ligne* dans la production en s'appuyant sur des applications réelles ou expérimentales. Pour cela, ils utilisent le plus souvent différents logiciels du commerce.

[Wu et Wysk, 1989] utilisent une simulation à intervalles de temps égaux (périodique) pour tester différentes règles locales d'ordonnancement et décider quelles sont les meilleures selon plusieurs critères. Dans leur article, ils ne parlent pas du recueil d'informations depuis l'atelier, comme par exemple l'état des machines ou le niveau des stocks. La position des pièces est uniquement connue sur les machines car les moyens de transfert ne sont pas pris en compte. Le problème de l'initialisation du modèle sur l'état du système réel n'est, lui non plus, pas évoqué par les auteurs.

L'utilisation de la *simulation en ligne* pour aider les contrôleurs aériens est proposée dans [Rogers et Flanagan, 1991]. Dans ce domaine, l'objectif est d'étudier l'impact des décisions prises par les contrôleurs. Les simulations sont initialisées par les données provenant du centre de contrôle en temps réel. Ces données renseignent sur la position très précise de chaque élément (avion) à tout instant dans le système. Elles sont archivées dans une base de données indiquant l'état actuel du système réel. De ce fait, l'initialisation du modèle se fait pratiquement en temps réel à partir de la base de données. Cet article, qui n'est pas réellement dans le domaine de la production industrielle, met en évidence le besoin en données réelles pour alimenter la simulation en ligne. Grâce aux nombreux systèmes qui collectent des données dans l'espace aérien pour garantir le contrôle et la sécurité, ce domaine d'application est donc relativement aisé pour la simulation en ligne. Il n'en est pas de même pour le domaine de la production industrielle, où il est peu fréquent de disposer de données précises et fiables sur l'état des éléments (articles en cours de fabrication).

L'intérêt d'avoir une liaison entre un modèle de *simulation en ligne* et les données du terrain afin d'obtenir des résultats exploitables à court terme et d'aider à la décision est montré par [Manivannan et Banks, 1992]. Ces auteurs présentent l'avantage d'un tel système pour l'aide à la décision à travers l'étude de différents scénarios lors de l'occurrence d'une panne dans le système. De plus, ils se sont intéressés aux difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre du système, comme par exemple le rafraîchissement des données collectées, la manière de collecter ces données, qu'elle soit automatique ou manuelle, la stabilité du système modélisé et la fréquence des simulations. Mais ils ne valident pas leur concept sur une application réelle.

[Brandin *et al.*, 1992] présentent l'idée d'un système appelé *Timed-Discrete Event System* pour superviser le comportement d'une cellule de production. Ce système présente l'intérêt d'avoir une rétroaction à partir du système réel vers la supervision mais de façon hors ligne (*off-line feedback*). Cela permet de ne pas avoir un accès direct aux équipements du système réel et de corriger certains paramètres en cours de fonctionnement.

Les travaux de [Gonzales et Davis, 1997a, b] présentent une mise en application d'un système de pilotage basé sur la simulation en utilisant une architecture distribuée de contrôle. Les auteurs utilisent une nouvelle architecture appelée *Recursive Object-Oriented Control Hierarchy* qui est destinée au pilotage en temps réel d'un système. Ils ont développé un *émulateur* physique d'un FMS et ils ont décomposé l'*émulateur* en un ensemble d'objets ordonnancés en utilisant l'architecture proposée. Ils ont utilisé l'approche de simulation

appelée *Hierarchical Object-Oriented Programmable Logic Simulator* pour étudier le pilotage à base de simulation. Cette approche modélise précisément les interactions entre les contrôleurs et elle considère explicitement les contraintes pour définir les mécanismes de transition d'état pour l'évolution d'un système distribué à événements discrets. Pour avoir une image de l'état du système, cette approche de simulation ne communique pas en direct avec le système réel, mais elle se focalise particulièrement sur la communication et l'échange des messages.

Dans [Gonzales et Davis, 1998], les auteurs présentent différentes modélisations qui prennent en compte le fonctionnement réel de l'outil de production. Les données auxquelles ils se sont le plus intéressés sont les temps machines, les temps de transfert par convoyeurs, les pannes, la maintenance préventive, etc. La difficulté se situe, d'une part, dans la relation entre le système réel et la simulation, et d'autre part, dans l'influence de la commande sur le système réel. La collecte des informations d'état peut également être difficile. Dans beaucoup de cas, les structures de données internes utilisées ne sont pas disponibles. Même si elles l'étaient, il resterait encore à déterminer la relation des données avec l'état actuel du système. Les auteurs utilisent des « dictionnaires complets de données communes » entre la commande et le modèle de simulation. Pour la plupart des outils de commande du commerce, cette information n'est pas disponible. En résumé, quand on utilise les outils de simulation et de commande du commerce, on est rarement capable de définir une représentation conforme de l'état du système pour le modèle de simulation et la commande. Par conséquent, les auteurs concluent que l'initialisation du modèle de simulation sur l'état courant de système devient extrêmement difficile, sinon impossible à réaliser.

[Peters et Smith, 1998] présentent une simulation d'un système de commande appelé *TSCS* pour *TAMCAM Simulation Control System*. Ils utilisent ce système pour étudier les avantages et inconvénients de la *simulation en ligne* dans l'architecture de commande. La simulation peut également être utilisée en mode *Look Ahead* pour évaluer des politiques alternatives de commande. La Figure III.4 présente l'implémentation qu'ils envisagent, réalisée avec Arena RT (pour Real Time), Access, Visual Basic et Visual C++. Les auteurs utilisent des lois de distribution aléatoires dans la modélisation de leur système.

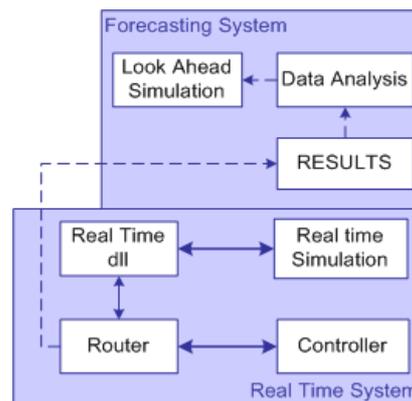


Figure III.4 : les connexions entre les différents outils d'après [Peters et Smith, 1998]

La simulation qu'ils font tourner en parallèle du système réel sert à collecter les différentes durées de production. L'historique de ces durées sert alors à évaluer les coefficients des distributions aléatoires, coefficients qui sont réutilisés pour la simulation en mode *Look-Ahead* pour connaître le fonctionnement du système en cet instant. La simulation *Look-Ahead* est également un outil prometteur pour prévoir les délais d'exécution. Alors que

la fabrication flexible et agile est de plus en plus répandue, la capacité de décrire l'exécution à court terme d'un système de fabrication est un point critique. TSCS fournit un cadre pour la conduite basée sur la simulation. La réalisation d'un prototype a démontré la faisabilité de ce principe pour améliorer l'exploitation et la commande des systèmes de fabrication.

La simulation à événements discrets a été largement répandue comme un outil d'évaluation et de validation des systèmes manufacturiers complexes. Le concept de *simulation en ligne* a été exposé dans [Davis, 1998]. L'auteur a confirmé que la modélisation et l'analyse des simulations à événements discrets est la seule alternative pour évaluer les systèmes complexes. Dans une simulation en ligne à événements discrets, les données courantes qui sont recueillies sur le système physique, sont utilisées pour initialiser le modèle de simulation. Des simulations sont effectuées pendant que le système réel continue son évolution. Une nouvelle décision est prise selon les résultats des simulations et est directement transmise au système d'exécution du système réel.

[Kouiss et Pierreval, 1999] proposent une application basée sur une *simulation en ligne*. Ils ont travaillé sur le concept de mise en relation des données de terrain avec la simulation. L'objectif est de permettre à l'utilisateur d'étudier différents ordonnancements lors d'un dysfonctionnement et d'aider l'opérateur à prendre des décisions afin d'éviter une perte de productivité. Les dysfonctionnements considérés sont par exemple des pannes, des arrêts pour maintenance machine, des ruptures de stocks, etc. Ce travail de recherche a aussi pour objectif d'aider à surveiller le système par analyse et comparaison entre les données réelles et simulées. Ils ont développé une application sur un système expérimental pour valider leur approche. La durée de production est par exemple l'une des informations du terrain nécessaire pour la mise à jour des paramètres de la simulation. Le simulateur, en lien avec le système expérimental et le modèle de simulation, se déclenche sur un état similaire au système réel. Les auteurs ne précisent pas quelles sont les difficultés possibles pour initialiser le modèle à partir du système réel.

Pour faire face à une augmentation de la production, une entreprise de l'industrie aéronautique tente de mettre en œuvre une démarche de pilotage lui permettant d'intégrer les différentes phases du pilotage d'un atelier, depuis la planification jusqu'à la commande des machines. Dans ce but, il a été décidé de développer un simulateur décrivant de manière très précise le comportement de cet atelier sur un horizon court. Les auteurs [Castagna *et al.*, 2001] répondent à ce besoin en montrant la place de la simulation dans les outils d'aide à la décision pour le pilotage de cette unité de production. Leur démarche suppose de pouvoir prendre en compte la situation courante de l'atelier en temps réel. Cela pose le problème de l'initialisation du modèle de simulation et des conditions pour résoudre ce problème. En effet, l'état initial du modèle est toujours en changement et dépend de l'évolution de la production dans l'atelier.

[Ramakrishnan *et al.*, 2002] discutent des objectifs liés à la mise en application d'une architecture de commande basée sur la simulation pour des interactions actives de chaîne logistique. Ils utilisent un modèle type *Look-Ahead RT* ( pour *Real Time*) lancé en temps réel et connecté au système de production. Ce modèle a pour but de comparer les fins de tâche programmées des opérations d'une *supply chain* avec celles définies dans la base de données. Dans le cas de dérive, une simulation *Look-Ahead* est lancée pour déterminer si la tendance va augmenter et s'il faut déclencher des actions correctives dans le système. Les modèles sont développés sur Arena 4.0 avec une base de données SQL. Il y a très peu d'informations sur l'implémentation pratique de leur solution.

La simulation est utilisée dans [Hanisch *et al.*, 2003] pour observer l'évolution du flux de personnes dans les lieux publics comme par exemple dans les gares, aéroports, etc. Leur objectif est de créer une *simulation en ligne* transparente, c'est-à-dire pour laquelle l'opérateur n'a pas besoin de paramétrer et d'analyser les résultats de la simulation pour prendre une décision. Le problème est qu'il n'existe pas d'outil de simulation pour organiser le déplacement d'un grand nombre de piétons dans les endroits publics. Le modèle doit être capable d'anticiper et de prévenir les problèmes de surpopulation dans les magasins, gares, etc. à court terme et à partir des flux existants. Un jeu de simulation est lancé périodiquement, pour une durée de cycle de 5 minutes. Le système d'information mesure le flux de personnes en plusieurs points du lieu public. Ensuite, il détermine l'évolution du public dans un horizon de 60 minutes. Les auteurs ont utilisé les lois probabilistes sur les temps de déplacement entre deux points pour déterminer la dynamique du système. Ce modèle de simulation est développé en VBA sur Excel afin d'estimer les entrées et sorties dans chaque lieu pour déterminer leur nouvelle population.

Pour la réalisation d'une *simulation en temps réel*, [Fowler et Rose, 2004] présentent l'utilisation d'un modèle de simulation qui est synchronisé de manière permanente avec l'état actuel du système de production réel. Pour cela, les auteurs détaillent les problèmes sur l'état du système qui doivent être résolus : (1) avant de démarrer la collecte des données, quels sont les types de données nécessaires pour obtenir une image fiable du système ? (2) Que faire si des données nécessaires à la simulation ne sont pas disponibles ou ne peuvent pas être générées automatiquement à partir des autres informations ? (3) Que faire si la qualité des données collectées est trop faible pour la simulation ? (4) Que faire si la fréquence de mise à jour est trop longue ? Tous les problèmes ci-dessus doivent être résolus pour simuler et reproduire le comportement du système. D'après les auteurs, pour y arriver, le modèle doit avoir des fonctionnalités similaires à celles d'un MES. Ceci peut être réalisé en utilisant un logiciel MES du marché et en développant des interfaces avec le simulateur ou en redéveloppant un MES à l'intérieur du simulateur. Dans ce dernier cas, le MES se comportera seulement approximativement par rapport à un vrai MES. En outre, le modèle doit avoir la capacité d'être synchronisé régulièrement avec l'état de système. Ce modèle est une copie *mère* pour tous les modèles de simulation exigés pour la prise de décision. Dès qu'un problème opérationnel apparaît, une copie de la copie *mère* est créée et l'analyse sera établie à partir de cette copie.

L'utilisation de modèles de simulation peut aider à la planification opérationnelle de la production. Le travail proposé par [Leo *et al.*, 2004] a pour objectif de vérifier le plan de production à partir d'une supervision et de l'intégration avec les données d'un ERP. Les auteurs décrivent comment des modèles de simulation peuvent être utilisés pour la planification de la production opérationnelle et pour la maintenance. Ils envisagent aussi l'intégration d'un outil d'intelligence artificielle pour l'aide à la décision. Ce travail ne montre pas clairement comment est réalisée l'initialisation du modèle. De plus, le temps de réponse ou le temps disponible pour tester plusieurs scénarios de simulation n'est pas évoqué.

L'application de la *simulation en ligne* est présentée dans [Gupta et Sivakumar, 2005]. La simulation est liée à un ordonnanceur dans un CSS pour « *Conjunctive Simulated Scheduling* ». La simulation est utilisée pour tester l'influence de l'ordonnancement prévu, et cet ordonnancement se sert du calendrier de la simulation comme base de temps de l'algorithme afin de diminuer les temps de calcul. Les auteurs exposent les avantages et bénéfices théoriques d'une telle méthode ainsi que les difficultés d'implantation sur un cas réel, du fait de la nécessaire liaison de la *simulation en ligne* avec le système réel.

L'approche *SRDM* pour *Simulation-based Real-time Decision Making* est présentée par [Yoon *et al.*, 2006]. Cette approche est destinée à une prise de décision par la *simulation en ligne* à événements discrets. Elle utilise la démarche classique (surveillance, collecte des données, simulation, décision et exécution). Le problème mis en avant est le manque de temps pour simuler chaque règle alternative. Une méthode à base d'intelligence artificielle est proposée pour le résoudre.

[Iassinovski *et al.*, 2007] se sont appuyés sur un système de production permettant, entre autre, l'utilisation de la simulation en ligne dans une scierie. Les auteurs ont développé un outil appelé *SDBuilder* pour *System Dynamics Builder*, qui permet d'intégrer dans un outil d'aide à la décision des techniques de parcours de graphes, de simulation en ligne, etc. Le but est de découper au mieux des troncs d'arbre en fonction du carnet de commandes actuel pour diminuer les chutes. La validation de leur approche se fait par *émulation* de la scierie et non pas sur la scierie réelle. Les auteurs ont choisi de développer cette émulation également sur *SDBuilder*. De ce fait, ils ne démontrent pas la faisabilité de leur approche au niveau du couplage avec le système réel, mais uniquement le couplage entre deux modèles de simulation/émulation. De plus, leur implémentation impose l'utilisation globale de leur solution logicielle, ce qui représente une contrainte forte pour une utilisation industrielle.

À travers les travaux étudiés concernant les applications de la *simulation en ligne*, la majorité des auteurs expose les avantages théoriques d'une telle méthode, mais il existe très peu de démonstrations pratiques ou de travaux présentant tout simplement les difficultés de réalisation ou d'intégration de différents outils. Comme le montre les articles précédents, les difficultés d'implantation sur un cas réel sont rarement mises en avant, alors que cela constitue certainement l'une des raisons majeures de l'absence d'applications industrielles.

Dans le chapitre suivant, nous proposons maintenant de modéliser le processus de pilotage à l'aide de la *simulation en ligne*.

### **III.3. Proposition de modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide de la simulation en ligne**

La modélisation et la simulation de flux sont le plus souvent utilisées pour prendre des décisions en phase de conception ou d'amélioration d'un processus de production sur un horizon de temps moyen à long. Comme cela a été présenté dans la partie II de cette thèse, la simulation a pour objectifs de choisir les équipements et les machines d'un atelier, de définir les moyens de transport, de déterminer les capacités des stocks, etc. Il est aussi possible d'utiliser la simulation avec des objectifs non pas liés au dimensionnement ou à la topologie du système physique, mais plutôt orientés sur la détermination des règles de pilotage et des valeurs optimales des variables de pilotage. Le pilotage est alors assisté par la simulation, mais il s'agit le plus souvent d'une *simulation hors ligne*, sans connexion entre le système physique réel et le modèle. Ce type de simulation a été présenté dans la partie 2 de cette thèse.

Dans cette nouvelle partie, nous présentons nos travaux de recherche sur le pilotage en temps réel d'un processus opérationnel à l'aide de la *simulation en ligne*. Nous proposons en particulier une modélisation du processus de pilotage avec un tel outil.

Par la suite, nous appelons décideur la personne physique responsable du pilotage de la production en temps réel. Sa responsabilité porte en particulier sur les décisions qu'elle doit être en mesure de prendre très rapidement, pendant le déroulement de la production, pour

corriger les valeurs des variables de pilotage afin de respecter les objectifs. Sa connaissance, son expertise et son expérience ne sont pas toujours suffisantes pour parer à toutes les situations et trouver une bonne réponse. Cela a parfois pour conséquence des écarts importants sur les résultats attendus. Dans ce contexte de prise de décision en temps réel par un décideur, nous proposons de modéliser l'ensemble du processus de pilotage afin de mettre en évidence les différentes fonctions utiles et les outils informatiques d'assistance au décideur.

La plupart des cartographies de processus distinguent les processus opérationnels, les processus de pilotage et les processus support. Notre travail se limite au processus de pilotage de niveau opérationnel. La Figure III.5 illustre la modélisation de niveau élevé à partir de laquelle nous avons basé notre recherche. La matière d'œuvre principale du processus de pilotage est informationnelle, alors que celle du processus de production est plutôt matérielle, tout du moins dans le cadre d'application qui nous intéresse le plus, celui de la production industrielle de biens (atelier manufacturier). Nous pouvons y voir, pour chaque processus, la fonction principale ainsi que les relations bidirectionnelles entre le pilotage et la production. En entrée, la fonction principale du processus de pilotage utilise les ordres de fabrication prévisionnels (mentionnant les produits et les quantités à fabriquer) et planifiés (par exemple la date de fin de fabrication). En sortie de ce processus, on obtient les **valeurs des variables de pilotage permettant le contrôle du processus opérationnel**. Le décideur doit choisir les meilleures valeurs pour ces paramètres en fonction de l'objectif prévu de la production et aussi des informations courantes du système réel. **Les informations récupérées à la sortie du processus opérationnel sont prises en compte comme données de contrôle de la fonction de pilotage**. Cet échange d'informations en cours de production permet de prendre des décisions basées sur les données réelles et d'avoir un pilotage en temps réel.

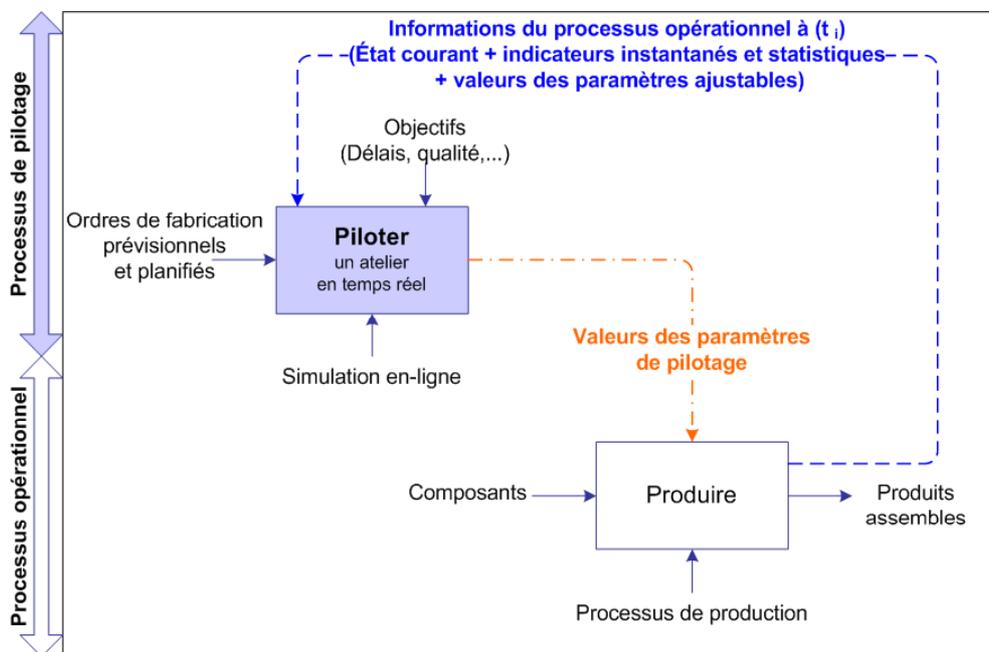


Figure III.5 : relation entre le processus de pilotage atelier en temps réel et le processus opérationnel et support de la simulation en ligne

### III.3.1. Échange de données entre les processus de pilotage et opérationnel

Afin de contrôler en temps réel les activités opérationnelles d'un atelier de production, il est nécessaire de définir les valeurs des variables de pilotage qui doivent être appliquées au fonctionnement du système réel à chaque instant.

**Les variables de pilotage** correspondent aux consignes et aux actions à appliquer au processus opérationnel à chaque instant pendant la production. Les valeurs de ces variables sont le résultat de la logique de décision située au niveau du processus de pilotage. Dans un pilotage en temps réel, le retour d'informations à tout instant ( $t_i$ ) provenant du processus opérationnel influence la prise de décision pour déterminer les valeurs des variables de pilotage. Ces données *de terrain* garantissent que les décisions seront en rapport avec les activités opérationnelles. Nous distinguons trois types de données de terrain permettant de connaître l'*état courant* des équipements, d'obtenir des *indicateurs instantanés ou statistiques* et de contrôler les valeurs des *paramètres ajustables*.

L'*état courant* à un instant ( $t_i$ ) correspond à l'état dans lequel se trouve un équipement réel suite à un événement. Par exemple, à l'instant ( $t_1$ ), une machine qui, après avoir été disponible, reçoit une pièce à traiter (événement), passe de l'état *disponible* à l'état *occupé*. Une machine peut bien sûr prendre d'autres états : bloquée, en panne, en réparation, en réglage, en attente, etc.

**Les indicateurs instantanés et statistiques** nous permettent d'observer la performance du processus opérationnel et d'identifier les éléments du système pouvant être améliorés. Parmi les indicateurs possibles, on peut citer par exemple, le taux d'occupation ou de disponibilité d'une machine, le nombre d'opérations effectuées, la liste des articles passés sur une machine, l'identification de l'article en cours de traitement dans une machine, la durée opératoire de chaque article, le temps moyen d'opération, la date de disponibilité, la date de début et de fin d'opération, la variation de la productivité, etc.

**Les paramètres ajustables** sont sélectionnés par le *décideur* parmi l'ensemble des variables de pilotage. En effet, les variables de pilotage peuvent être décomposées en deux groupes complémentaires : le premier groupe comporte les variables ayant des valeurs constantes durant la production et le deuxième groupe comporte les variables ayant des valeurs ajustables. Afin de distinguer les deux groupes sans ambiguïté, nous désignerons les variables du second groupe par *paramètres ajustables*. La répartition de chaque variable dans l'un de ces deux groupes est au choix du décideur pour chaque lancement de la production. En ce qui concerne les *paramètres ajustables*, une valeur initiale est envisagée au démarrage de chaque production, mais cette valeur peut être corrigée au cours de la production par le décideur en fonction de l'état courant du processus.

La Figure III.6 illustre l'échange des différents types de données entre les deux processus opérationnels et de pilotage en temps réel.

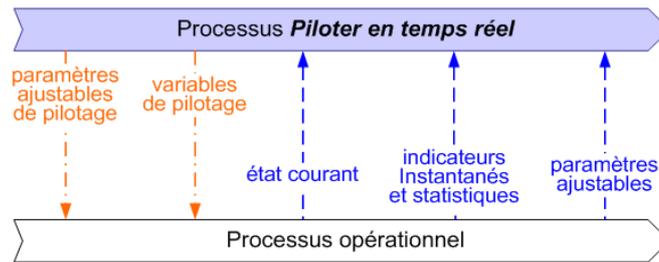


Figure III.6 : échange des données en temps réel entre le processus opérationnel et le processus de pilotage

Pour illustrer en pratique l'échange de données entre le processus de pilotage et le processus opérationnel, nous proposons de nous appuyer d'abord sur un exemple simple, celui d'une machine dans un atelier de production. La Figure III.7 met en évidence, sous la forme combinée d'un chronogramme et d'un diagramme d'état, les trois types de données présentés précédemment. L'obtention de ces informations peut être périodique suivant, par exemple, des intervalles de temps égaux comme à l'instant  $(t_1 + \Delta t)$  dans le chronogramme de la Figure III.7 ou bien événementiel à l'instant  $(t_6)$  suite à une panne sur la machine. À l'instant  $(t_1 + \Delta t)$ , ces trois types de données informent sur : (1) l'état courant de la machine (occupée), (2) les indicateurs instantanés et statistiques : le temps de cycle courant, le temps de cycle moyen, la liste des articles en cours de traitement, (3) les paramètres ajustables : la durée de l'opération prédéfinie pour cette machine, sachant que la valeur de ce paramètre peut être ajustée en fonction du résultat de l'opération courante. De la même façon, suite à l'événement (panne) qui se produit à l'instant  $(t_6)$ , les trois types d'informations doivent être disponibles et actualisés avec les valeurs courantes.

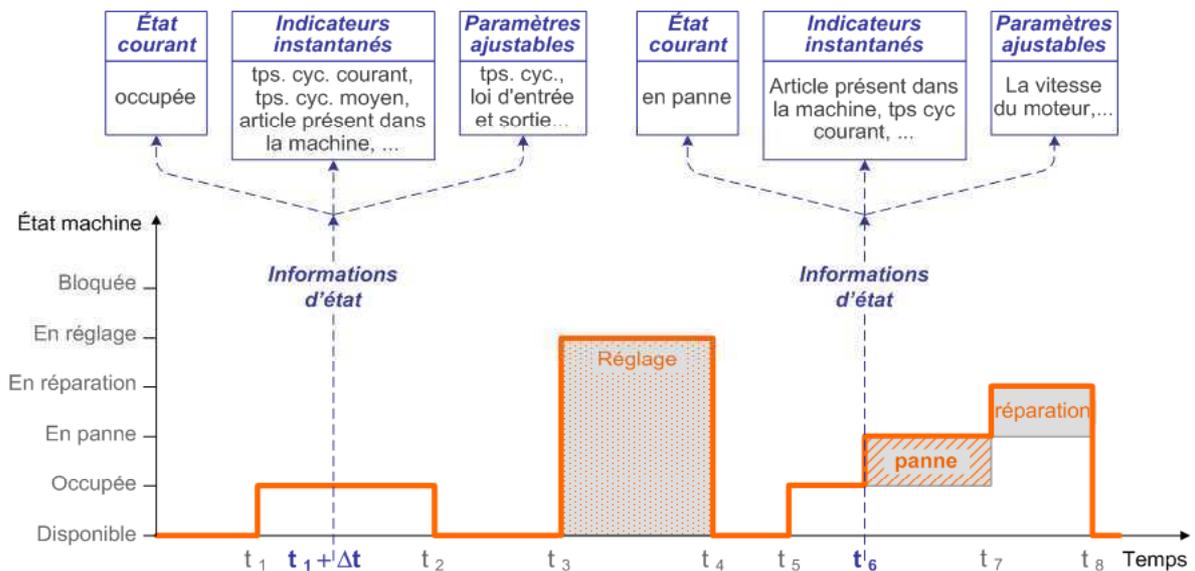


Figure III.7 : obtention de trois types de données pour présenter l'image actuelle de la production sur une demande périodique ou événementielle

Considérons maintenant un exemple un peu plus complet. Prenons un atelier de production avec trois équipements de base : un stock, un convoyeur, une machine devant produire deux pièces A et B (voir Figure III.8). Nous allons maintenant montrer la nécessité de disposer d'informations complètes provenant de tous les équipements après l'arrivée d'un événement critique.

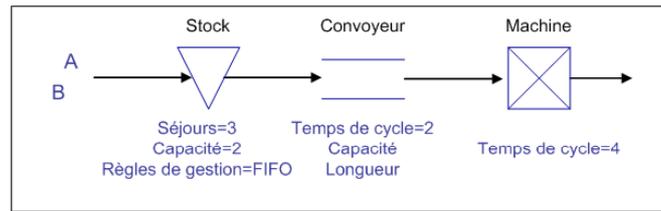
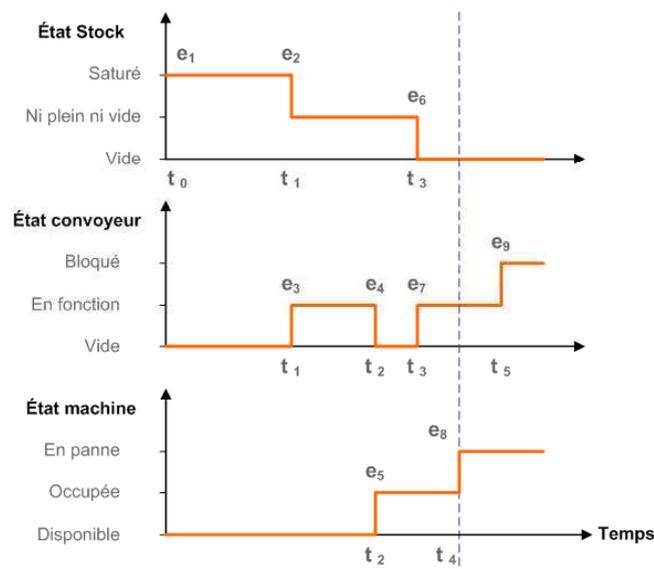


Figure III.8 : modèle d'atelier simple de production

Différents changements d'état sont possibles pour chaque équipement de ce processus correspondant à des événements normaux tels que l'entrée ou la sortie d'une pièce. La Figure III.9 fait apparaître des diagrammes de changement d'état pour les trois équipements de cet atelier. Le premier événement correspond à l'arrivée de deux pièces dans le stock au moment ( $t_0$ ). Un autre événement correspond à la sortie de la première pièce du stock ( $e_2$ ) ou à la mise en route du convoyeur ( $e_3$ ) à l'instant ( $t_1$ ). La production continue en fonction des paramètres déterminés et on peut décrire les changements d'état associés aux trois types d'informations commentés dans l'exemple précédent sur tous les équipements et à chaque instant donné. On doit également prendre en compte des événements imprévus ou des phénomènes aléatoires, comme par exemple l'arrivée d'une panne sur la machine qui correspond à l'événement ( $e_8$ ) avant la fin prévue de son opération. L'apparition de ce changement d'état survient au moment ( $t_4$ ) qui correspond à l'état « vide » du stock et à l'état « en fonction » du convoyeur. Le convoyeur, après avoir fini son temps de cycle prévu, se trouve en état bloqué. Cela peut avoir des conséquences majeures sur le système et finalement avoir un impact sur l'objectif planifié de la production. Pour réduire ou éviter les écarts par rapport à l'objectif, il peut donc être fort utile de connaître le comportement du système suite à l'arrivée d'un événement imprévu. Pour ce faire, il est indispensable de disposer d'informations complètes provenant du terrain afin de connaître l'état courant du processus opérationnel. Cet état courant conditionne en effet les résultats fournis par une projection dans le futur. Si l'on ne connaît pas précisément l'état courant du processus opérationnel, il est illusoire de se projeter dans le futur, quel que soit le moyen.

Figure III.9 : besoin d'informations complètes de tous les équipements après l'arrivée d'une panne machine à ( $t_4$ )

### III.3.2. Analyse de la fonction principale niveau [A-0] du processus de pilotage en temps réel

Dans ce chapitre, il s'agit de proposer une modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide d'un outil de simulation *en ligne*. Le processus opérationnel ne sera pas plus détaillé que ce qui a été fait sur la cartographie générale des processus de la Figure III.5. L'objectif principal est de pouvoir définir et spécifier les principales fonctions du processus. La simulation de flux *en ligne* étant l'outil choisi pour supporter tout ou partie de ces fonctions, nous détaillerons aussi les possibilités offertes par cet outil, que ce soit pour *observer en temps réel*, pour *se projeter dans le futur* ou pour *corriger les variables de pilotage*.

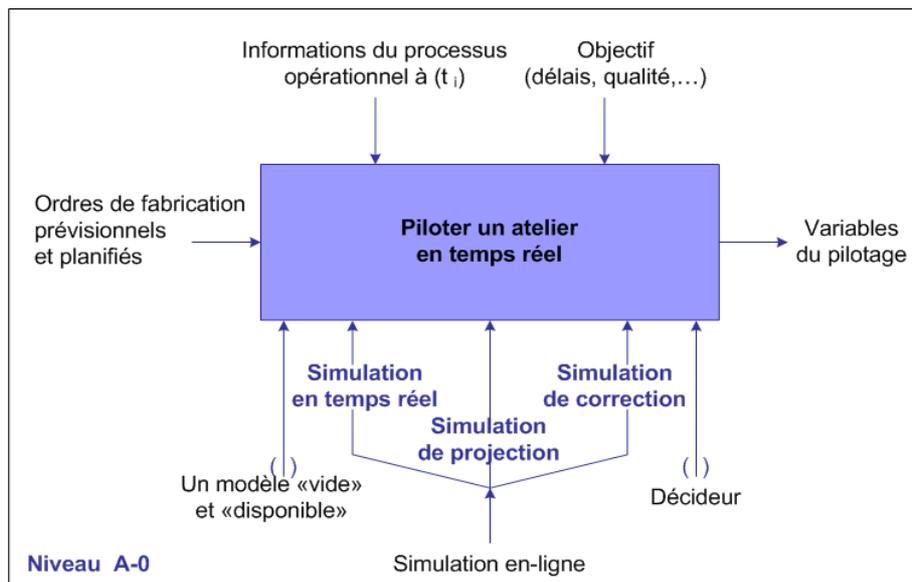


Figure III.10 : fonction principale [Piloter un atelier en temps réel]

Comme cela a été mentionné précédemment et comme le montre la Figure III.10, le *décideur* est aussi une ressource pour la réalisation de cette fonction de pilotage. Il a la responsabilité de réagir au moment de l'apparition d'événements *critiques* dans la production et doit être en mesure de prendre *une bonne* décision, dans un temps souvent très limité et sans être certain que cette décision soit la meilleure. Nous qualifions d'événements *critiques* tous les événements inattendus pouvant avoir un impact sur les objectifs de production.

En cas d'apparition d'un événement *critique*, l'outil de simulation *en ligne* peut aider le *décideur* à prendre une décision suivant un processus en trois étapes. Pendant la première étape, qui s'exécute jusqu'à l'apparition de l'événement, la simulation *en ligne* peut être utilisée sous la forme d'une simulation *en temps réel* afin d'avoir une image complète et fidèle du comportement du processus opérationnel. Elle permet donc d'*observer* le système réel au travers du modèle plutôt que le système réel directement. Pour la deuxième étape, la simulation *en ligne* est utilisée sous la forme d'une simulation *de projection* (en accélérant le temps) pour mesurer les conséquences des événements en se projetant dans le futur. Enfin, pour la dernière étape du processus de décision, la simulation *en ligne* peut aider le *décideur* à choisir une solution adaptée au système réel en étant utilisée sous la forme d'une simulation *de correction*.

La Figure III.11 représente le niveau [A0] de modélisation du processus de pilotage avec le formalisme IDEF0 ou SADT. La fonction principale du niveau [A-0] se décompose en trois fonctions de niveau A0 :

- la fonction [Observer],
- la fonction [se Projeter],
- la fonction [Décider].

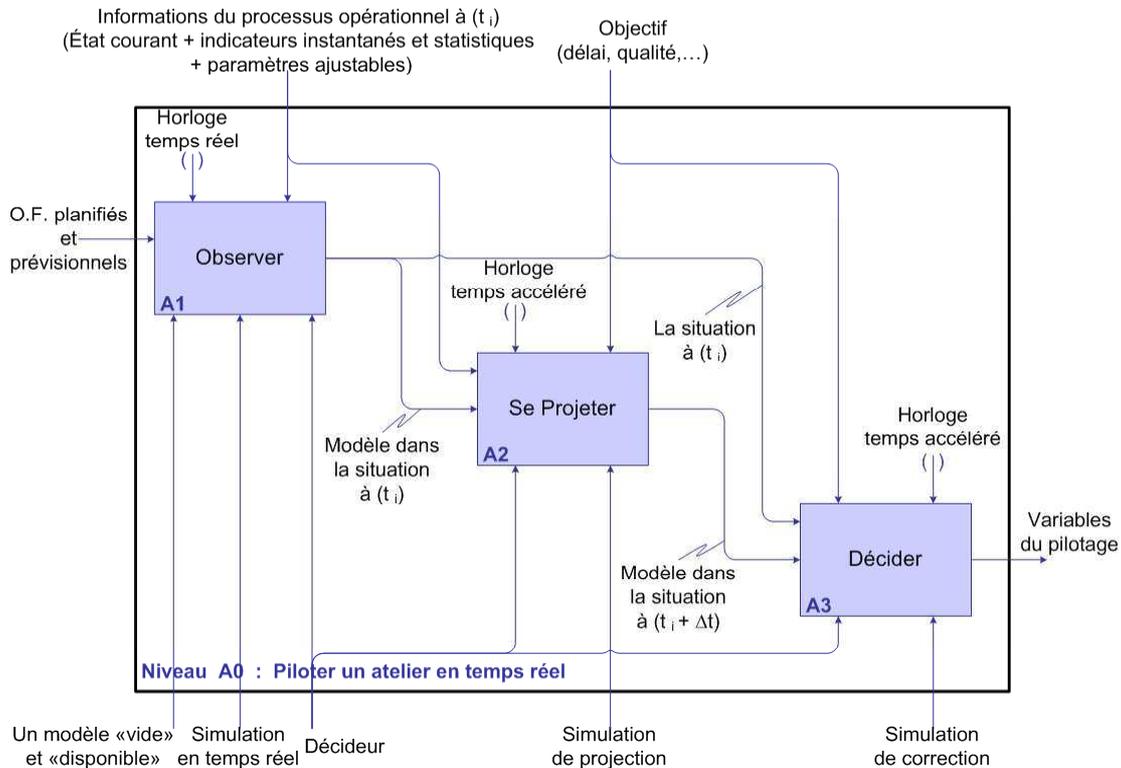


Figure III.11 : modélisation niveau [A0] du processus de pilotage

Par la suite, chaque fonction est décrite en détail ainsi que l'utilisation de la simulation en ligne comme support pour chacune de ces fonctions.

### III.3.3. Fonction [A1] - Observer le processus opérationnel en utilisant une simulation en temps réel

Pour cette fonction, nous nous plaçons dans la phase d'exploitation d'un système de production. La fonction [Observer] a pour objectif de rassembler les informations d'état et de fonctionnement du système réel à chaque instant de la production. Elle permet donc de connaître la situation courante et d'être informé de l'apparition d'un événement imprévu. Par exemple, à un instant donné, il est important de connaître le niveau et le positionnement des encours dans le flux, l'état des ressources, etc. Pour supporter cette fonction, l'outil le plus généralement utilisé est la supervision ou, de façon encore plus perfectionnée, le MES (voir la partie II). Dans ce travail, nous proposons d'utiliser la simulation de flux en temps réel, comme cela a été initié par [Cardin, 2007]. Dans sa thèse, à partir d'un principe énoncé par [Straßburger *et al.*, 2005], il propose l'utilisation d'un simulateur en temps réel appelé *observateur*, s'exécutant en parallèle du système réel. L'un des points forts de son travail est qu'il démontre, grâce à un système expérimental en grandeur réelle, l'intérêt de relier un simulateur à un processus opérationnel.

Avec l'utilisation de la simulation de flux en temps réel pour observer le processus opérationnel, le comportement dynamique du modèle de simulation doit être le plus proche possible du comportement du processus réel. Pour y parvenir, il est indispensable de connaître l'état courant du processus réel. Le modèle de simulation doit utiliser des données réelles provenant du terrain. Il est tout d'abord nécessaire de déterminer les données utiles et de s'assurer de leur disponibilité, puis de les collecter à partir des équipements réels et enfin de garantir la qualité et l'exactitude de ces données.

### **III.3.3.1. Caractérisation des données nécessaires**

#### **III.3.3.1.1. Disponibilité des données**

Généralement, les données utilisables pour le modèle ont deux caractéristiques : disponibilité et qualité [Fowler *et al.*, 2004]. La disponibilité des données précise si toutes les données du système physique peuvent être déterminées ou mesurées. On peut garantir que les informations sont complètes pour une utilisation quand toutes les données nécessaires sont disponibles par acquisition ou calcul à partir des données existantes.

#### **III.3.3.1.2. Acquisition de données**

Le système d'acquisition de données doit permettre d'accéder aux différentes données provenant du terrain et plus particulièrement de chacun des équipements. On distingue trois méthodes générales pour acquérir les données :

- Les données peuvent être obtenues *manuellement* en utilisant les ressources humaines intervenant dans le processus opérationnel. Par exemple, on demande à un opérateur de saisir dans une application informatique le nombre des pièces réalisées sur une machine après les avoir comptées. Cette première méthode n'est, bien sûr, pas la panacée quand il s'agit de faire du pilotage en temps réel, car le temps d'acquisition peut s'avérer long, sans parler des risques d'erreur de saisie.
- Plutôt que de les compter, l'opérateur peut être informé par des capteurs installés sur le système réel qui lui fourniront les informations à saisir. Cette deuxième méthode permet de réduire le temps d'acquisition, mais reste soumise aux aléas de la saisie manuelle.
- Les données peuvent provenir d'un système de gestion de base de données (SGBD) d'un ERP ou d'un MES. Le traitement statistique des valeurs ainsi archivées sur des périodes plus ou moins importantes va permettre de calibrer le modèle avec des paramètres mis sous forme de lois de distribution aléatoires.
- Les données peuvent enfin être acquises directement en temps réel par raccordement à un automate ou un réseau d'automates disposant d'un protocole d'échange de données comme par exemple OPC (Ole for Process Control). On obtient ainsi les valeurs instantanées. C'est cette solution qui est à privilégier pour synchroniser les événements du processus réel aux événements du modèle.

#### **III.3.3.1.3. Qualité et exactitude des données**

La qualité et l'exactitude des données est dépendante des erreurs d'acquisition et des erreurs de mesure (Figure III.12). Pour certaines applications comme la simulation de flux de trafic ou de flux des piétons, l'acquisition des informations nécessaires n'est pas toujours

correcte car les données sont impossibles ou difficiles à collecter. Par ailleurs, elle dépend des mises à jour et de la différence entre la date d'initialisation du modèle et la date de la mesure. Pour la *simulation en ligne*, l'idéal est bien sûr de disposer de données disponibles, complètes et de bonne qualité. Malgré cette évidence théorique, la réalité démontre que dans la pratique, les difficultés sont nombreuses. Dans la partie IV de cette thèse, une application expérimentale sera présentée et les difficultés liées à la disponibilité et à la qualité des données seront évoquées plus précisément.

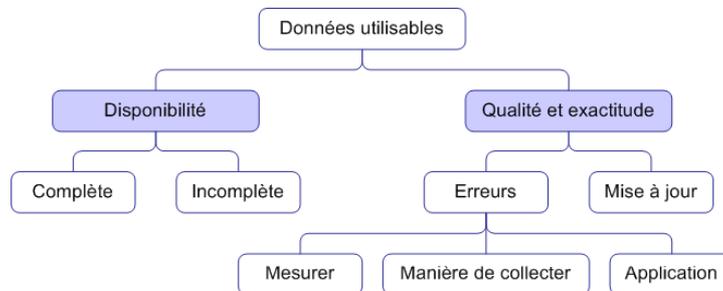


Figure III.12 : données utilisables dans un modèle

#### III.3.3.1.4. Fréquence de synchronisation

La synchronisation des événements dans un modèle peut être déclenchée de plusieurs manières :

- de façon *périodique*, c'est-à-dire à des intervalles de temps égaux. Par exemple, on peut synchroniser et mettre à jour les données du modèle toutes les deux minutes,
- de façon *événementielle*. Dans ce cas, le déclenchement de la synchronisation dépend de l'apparition de certains changements d'état qui ne correspondent pas aux changements d'état prévus. Parmi les changements d'état, on considère en particulier ceux correspondant aux *points de détection* situés sur le système réel, modélisés par des *points de décision*,
- à la demande du pilote d'atelier, sans que cette synchronisation soit déclenchée de manière automatique.

Après avoir apporté ces précisions sur l'importance des données provenant du processus réel, nous proposons maintenant de décomposer la fonction [Observer] en trois fonctions de niveau [A1] illustrées par le diagramme SADT de la Figure III.13.

- la première fonction [A11] a pour objectif de *calibrer* les paramètres du modèle à partir de données provenant du processus opérationnel,
- la deuxième fonction [A12] a pour objectif d'*initialiser* le modèle de simulation avec les états courants du processus opérationnel ;
- la troisième fonction [A13] a pour objectif d'*adapter* le comportement dynamique du modèle au comportement du système réel au cours de temps.

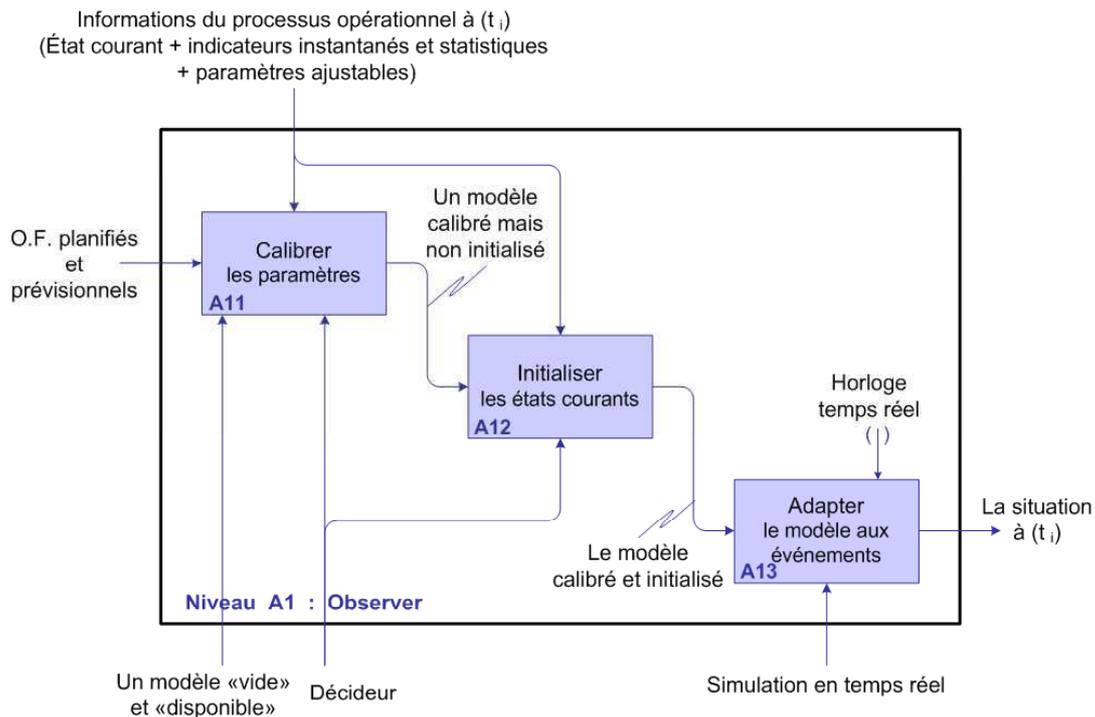


Figure III.13 : modélisation niveau [A1] de la fonction [Observer]

Ces trois fonctions du niveau [A1] sont décrites dans les chapitres suivants.

### III.3.3.2. Fonction [A11] - Calibrer le modèle

Comme son nom l'indique, l'objectif de cette fonction est d'arriver à ce que le modèle de simulation soit calibré sur le processus opérationnel. Cela signifie qu'à partir de données identiques, notamment pour les valeurs de temps et de capacité liées à chacun des équipements, le comportement dynamique du modèle de simulation sera très proche de celui du processus opérationnel. Les données peuvent avoir une valeur instantanée, moyenne ou encore suivre une loi de distribution aléatoire. Par exemple, pour un temps de cycle d'une machine, il est possible d'utiliser une valeur instantanée, une valeur moyenne calculée à partir de plusieurs valeurs instantanées ou bien encore utiliser une loi de distribution mathématique.

En général, dans un atelier de production, ces données décrivent non seulement les caractéristiques des ordres de fabrication, mais aussi les caractéristiques des postes de travail ou des machines comme par exemple le temps de cycle moyen, le MTBF, le MTTR, le temps de réglage, etc. Les valeurs de ces données nécessaires pour le calibrage sont collectées soit directement sur le système réel, en relation directe avec la commande de bas niveau (généralement par l'intermédiaire d'un automate programmable ou d'un réseau d'automates) ou par interrogation d'une base de données de production, de type MES ou ERP, éventuellement en association avec un outil d'analyse statistique de données.

Il est à noter que cette fonction de calibrage se fait de façon statique, c'est-à-dire sans qu'il y ait de simulation proprement dite. Il n'y a donc aucun article présent dans le modèle et tous les éléments sont dans un état disponible. Les données nécessaires au calibrage sont affectées aux différents éléments du modèle afin de garantir par la suite des simulations s'appuyant sur des valeurs les plus proches possibles des données du processus opérationnel réel.

### III.3.3.3. Fonction [A12] - Initialiser le modèle

Cette fonction est destinée à placer le modèle de simulation dans un état correspondant à l'état du processus réel. Il s'agit de l'un des points les plus délicats à résoudre. En effet, la plupart des simulateurs du commerce ne sont pas prévus pour être utilisés *en ligne et en temps réel*, mais plutôt hors ligne et sans synchronisation de temps avec le processus réel. En simulation hors ligne, l'initialisation d'un modèle se fait habituellement en partant de l'état vide (pas d'encours dans l'atelier). Ensuite, on simule une période de montée en régime permettant d'atteindre un état stationnaire. Bien que cet état stationnaire puisse correspondre à l'état stationnaire moyen du processus réel, à un instant donné, le modèle a fort peu de chance de se trouver dans le même état que le processus réel. Pour remplir la fonction [*Observer*], cette approximation n'est pas satisfaisante car l'on souhaite qu'il y ait vraiment un parallélisme d'évolution de l'état du modèle avec l'état du processus réel. La situation initiale du modèle a donc une importance considérable pour que la simulation d'observation puisse refléter une image proche de la réalité.

A un instant donné, cela revient à renseigner le simulateur avec des informations sur l'emplacement des encours dans l'atelier (positionnement des pièces sur les convoyeurs, les machines, dans les stocks, etc.) ainsi que sur l'état des différents éléments du modèle (état courant et temps prévu jusqu'au prochain changement d'état). Cela peut se faire instantanément si l'on dispose de toutes les données nécessaires non seulement sur la localisation des articles mais aussi sur l'état des différents éléments. Dans ce cas, le modèle est initialisé à partir d'une « photo » de l'état du processus réel, qui est reproduite dans le modèle de simulation. Si l'on ne dispose pas de toutes les données nécessaires à l'instant demandé, cela peut aussi se faire en faisant évoluer l'horloge de simulation en temps réel et en introduisant, à partir d'événements réels, des articles dans le modèle jusqu'à ce que l'état du modèle converge vers l'état du processus opérationnel. La période de montée en régime du modèle correspond à l'évolution du modèle pour atteindre l'état courant du processus opérationnel.

### III.3.3.4. Fonction [A13] - Adapter le modèle aux événements

Après la réalisation des fonctions [*calibrer*] et [*initialiser*] des chapitres précédents, le modèle se trouve donc dans un état correspondant à la situation actuelle du processus réel. La simulation en temps réel peut donc être lancée en parallèle du processus opérationnel avec un comportement dynamique très proche. Mais il est possible que l'avancement du modèle ne soit pas identique à l'avancement du processus réel. Ce problème peut soit être causé par un manque de synchronisation des événements du modèle par rapport aux événements du système réel, soit être la conséquence d'événements imprévus dans le système réel. L'objectif de la fonction [*Adapter le modèle aux événements*] est de maintenir de façon dynamique l'état du modèle de simulation dans un état identique au système. Nous proposons de décomposer cette fonction en deux fonctions de niveau inférieur :

- [*Synchroniser*] les événements ou changements d'état du modèle de simulation par rapport au système réel,
- [*Ajuster*] les paramètres du modèle dans le cas où l'on constate l'apparition répétitive de certains événements non synchronisés avec le fonctionnement réel du système, la cause pouvant provenir par exemple de la dérive de certains temps de cycle du système réel.

### III.3.3.4.1. Synchroniser les événements du modèle

Le modèle doit présenter la dynamique d'un système réel et il doit être synchronisé dans le cas où le changement d'état du modèle ne correspond pas au changement d'état du système réel. Ces *changements d'états* ne peuvent avoir lieu qu'à des instants déterminés dans le temps que l'on appelle *événements* [Bel et Kieffer, 2002] comme par exemple, l'événement d'arrivée d'une pièce dans le système, l'événement de début ou de fin d'opération pour une pièce sur une machine, etc. L'apparition asynchrone de ces événements dans le système réel et dans le modèle fait apparaître des écarts sur, par exemple, la position des pièces dans le processus réel, l'état actuel d'une machine (en panne, occupée ou libre), la longueur des files d'attente à l'entrée ou à la sortie d'une machine et les articles qui la composent.

À ce niveau d'analyse fonctionnelle, l'évolution d'un modèle calibré (au niveau des paramètres) et initialisé (au niveau de l'état) dans la partie précédente doit être comparé avec l'évolution du processus réel. L'objectif de cette comparaison entre deux systèmes, l'un réel et l'autre modélisé, est de différencier les écarts par rapport à la démarche prévue afin de pouvoir les synchroniser. Les écarts entre les deux systèmes peuvent signifier soit que (i) le modèle de simulation est en retard par rapport à l'évolution du processus réel ou bien que (ii) l'évolution du système réel est en avance par rapport au modèle.

**Exemple d'une synchronisation :** prenons l'exemple du positionnement d'une palette dans une chaîne de production. La présence de chaque palette est détectée par des détecteurs installés aux points importants sur les convoyeurs, le plus souvent à l'entrée et à la sortie. Dans le modèle de simulation à événements discrets, les *points de décision* correspondent aux *points de détection* dans le système réel. À l'instant  $t_1$  durant le fonctionnement parallèle de deux systèmes, nous constatons par exemple un décalage entre la détection de la palette  $i$  à l'entrée du convoyeur réel et le passage de cette même palette  $i$  au point de décision du modèle. Le logigramme de la Figure III.14 décrit la procédure que l'on applique pour synchroniser le modèle au système réel dans les deux cas d'évolution du processus réel, en avance ou en retard par rapport au modèle. Dans cet exemple, on considère que chaque palette porte un numéro  $i$  (étiquette code barre, RFID, etc.) permettant de l'identifier. A chaque détection d'une palette  $n^\circ i$  sur le point de détection  $x$  du système réel, la procédure est déclenchée afin de corriger la position de la *palette virtuelle  $i$*  sur le *point de décision* du modèle.

- (I) Le cas I correspond au comportement attendu du modèle. L'arrivée simultanée de la palette  $i$  sur le point de détection du système réel et de la palette virtuelle  $i$  sur le point de décision du modèle correspond à cette situation. Pour valider cela, nous n'avons qu'à vérifier la présence des palettes à un instant précis dans les deux systèmes sur les points similaires et ensuite contrôler la valeur des identifiants  $i$  affectés à une palette dans les deux systèmes réel et modélisé.
- (II) Le cas II correspond à un retard de la simulation par rapport au réel. Nous avons obtenu le changement d'état de la variable présentant le passage de la palette sur le point de détection ainsi que la valeur de l'identifiant de la palette  $i$ . A ce moment, la présence de cette palette n'a pas encore été obtenue au point de décision correspondant dans le modèle. Il faut d'abord trouver la position actuelle de la palette virtuelle  $i$  dans le modèle et identifier le convoyeur et la position qui lui correspond. Ensuite, il faut supprimer la palette virtuelle  $i$  de cette position sur le convoyeur où elle se trouve et l'introduire sur le point de décision du « bon » convoyeur à condition que cette position soit disponible.

Dans le cas où une palette  $j$  se trouve déjà sur ce point de décision, il est nécessaire de la supprimer de ce point et d'introduire la palette  $i$  à sa position. À ce moment dans la production, la palette virtuelle  $j$  n'existe plus dans le modèle et il suffit maintenant d'attendre la détection de la palette réelle  $j$  par le détecteur du système réel et ensuite d'introduire une palette virtuelle  $j$  sur le point similaire dans le modèle s'il n'y a pas de présence d'une autre palette sur ce point.

- (III) Dans le cas III, le modèle de simulation est en avance par rapport au système réel. La palette  $i$  n'a toujours pas été détectée dans le système réel, alors que sa présence a été validée dans le modèle au point de décision correspondant. Dans ce cas, il suffit de bloquer la palette virtuelle  $i$  du modèle sur le point de décision et d'attendre d'avoir les conditions correspondant au cas (I) c'est-à-dire attendre l'arrivée d'une palette réelle avec l'identifiant qui lui correspond avant de la libérer dans le modèle.

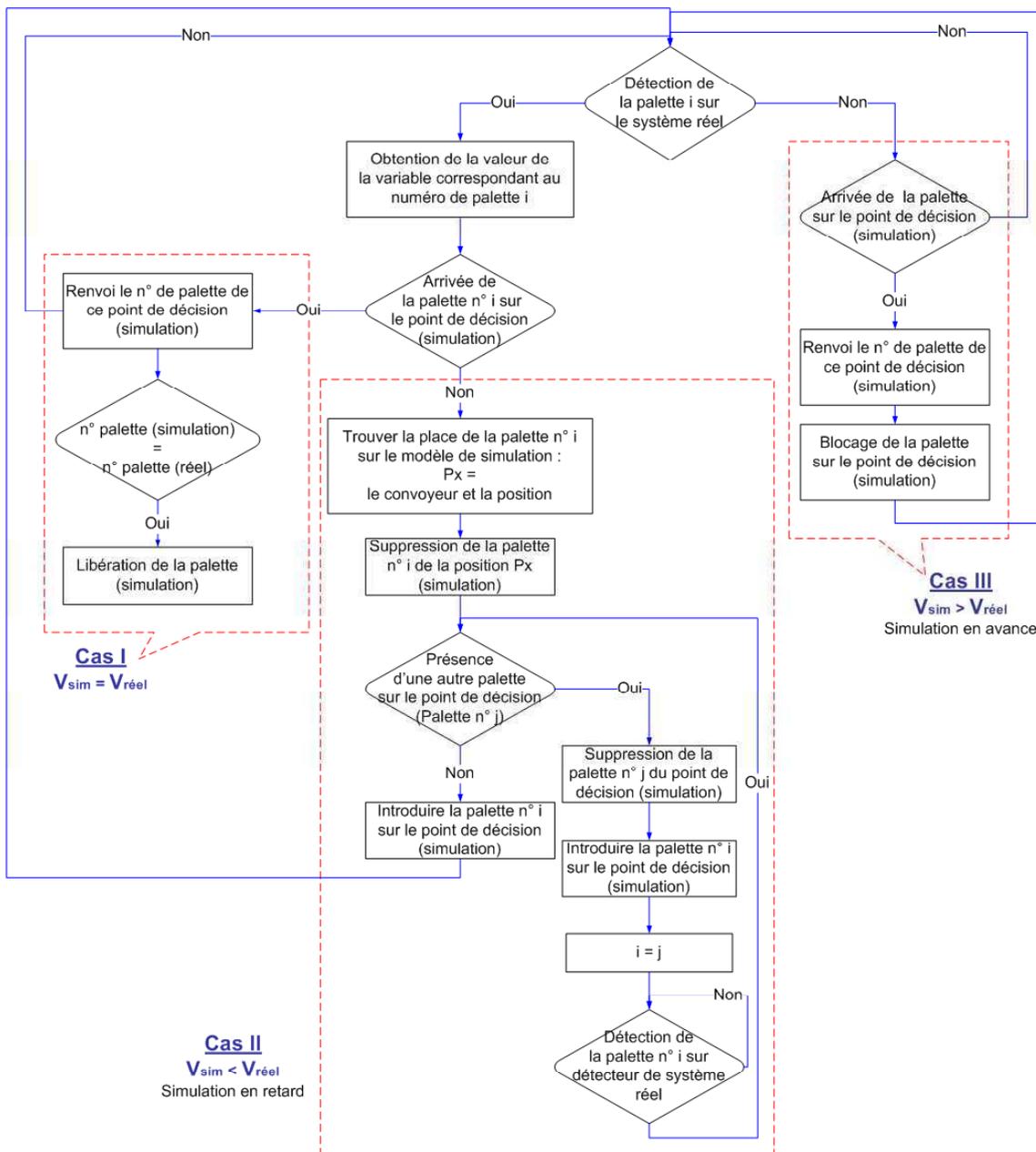


Figure III.14 : exemple de la synchronisation sur le positionnement d'une palette

Nous avons appliqué ce logigramme sur une ligne expérimentale proche de l'exemple précédent. Nous pouvons ainsi démontrer en pratique que la fonction de synchronisation met à jour le positionnement des palettes et la situation de tous les éléments enregistrés d'un processus réel. La synchronisation reste dans une boucle avec la fonction de comparaison entre les deux systèmes pour pouvoir corriger successivement les écarts et événements imprévus en cours de la production.

Pour synchroniser un modèle de simulation à événements discrets, il est nécessaire de connaître la date de l'occurrence d'un événement réel pour pouvoir la comparer à la date du même événement sur le simulateur.

### III.3.3.4.2. Ajuster les paramètres

Comme cela a été présenté dans le chapitre précédent, durant l'observation du processus de production par un modèle de simulation, les événements du modèle peuvent être synchronisés avec les événements du système réel en cas d'écart important entre les deux. Dans le cas où ces écarts seraient répétitifs, il est nécessaire de disposer d'une fonction pour en faire une analyse. À ce stade de l'adaptation du flux dynamique d'un modèle par rapport au réel, le décideur doit analyser les raisons de ce décalage et essayer de trouver l'origine et les causes relatives aux écarts. Cette fonction doit être appliquée simultanément avec la fonction de synchronisation permettant de connaître les causes et l'origine des écarts. Ce problème peut être la conséquence d'une initialisation incomplète de données que l'on résout avec une synchronisation, mais si cette correction devient répétitive, cela signifie que le problème de décalage est relatif au calibrage du modèle. Le décideur doit distinguer s'il s'agit d'un problème de paramétrage incorrect du modèle qu'il faudra donc corriger ou s'il s'agit d'un problème ponctuel de décalage d'un événement.

Le diagramme FAST *Function Analysis System Technic* de la Figure III.15 hiérarchise toutes les fonctions découlant de la fonction *Observer*. La fonction de service est la fonction [*Observer*], qui est réalisée pour répondre au besoin du décideur et les fonctions techniques sont les fonctions *internes* permettant d'assurer la fonction de service.

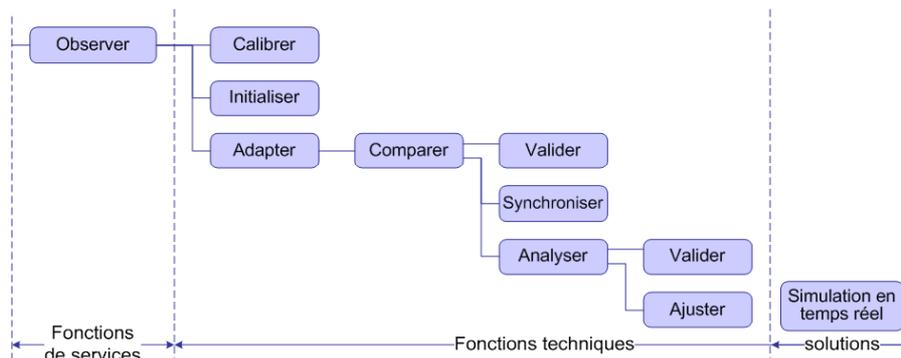


Figure III.15 : analyse fonctionnelle interne en utilisant la méthode FAST

Les trois fonctions permettant d'observer l'évolution de la production ont été détaillées précédemment : calibrer les paramètres, initialiser les états courants et adapter le modèle aux événements. Le logigramme de la Figure III.16 complète la description fonctionnelle précédente en mettant en évidence les différentes étapes du processus d'observation de la production en temps réel.

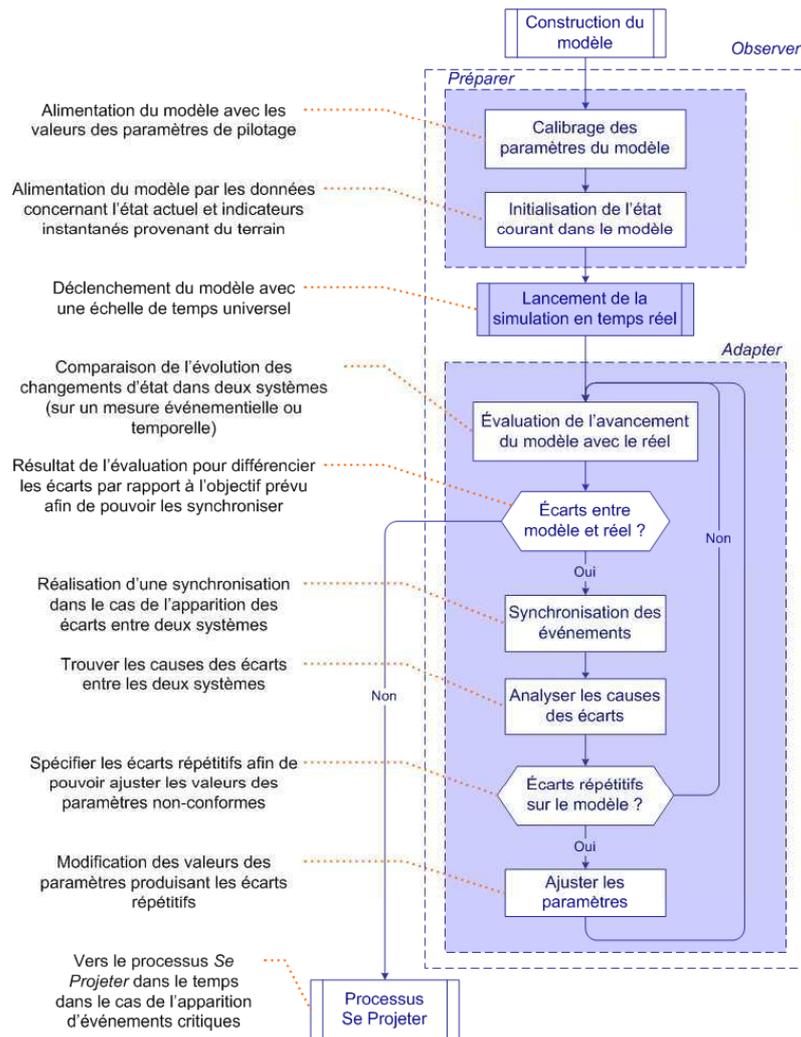


Figure III.16 : le fonctionnement dans le processus [Observer]

Pour cette fonction [A1]-[Observer le processus opérationnel], nous avons fait apparaître un premier apport de la *simulation en ligne* pour le pilotage en temps réel. En premier lieu, elle permet de disposer d'un *observateur* dont le comportement dynamique est très proche du processus réel. Certains auteurs parlent aussi de *visualisation en temps réel*. Cela peut s'apparenter à l'image que l'on obtient par exemple avec un outil de supervision, mais qui est plus souvent destiné à la surveillance des automatismes qu'à la représentation du flux. L'intérêt majeur de l'*observateur* est de disposer d'un modèle de simulation essentiellement destiné à simuler les flux, ce qui correspond au besoin du pilotage. Dans la partie suivante, nous allons étudier comment cette vision de la réalité avec un modèle de simulation en temps réel peut aider le *décideur* à prévoir le comportement du système dans le futur.

### III.3.4. Fonction [A2] - *Se projeter dans le court terme en utilisant une simulation de projection*

Pour cette fonction, la production est toujours en phase d'exécution. Durant cette phase, il est possible que des événements imprévus ou des anomalies dans le processus réel surviennent. Les événements imprévus peuvent être par exemple une panne machine, l'annulation d'une commande ou l'arrivée d'une commande urgente, une brusque variation du temps opératoire ou de la qualité sur une machine pour la fabrication de pièces identiques, etc.

Le décideur a besoin de se projeter dans le court terme et de visualiser les conséquences de cet événement imprévu sur l'objectif. Nous appellerons ce processus une *pré-vision*, volontairement écrit en deux mots. Cela doit être réalisé le plus rapidement possible afin de pouvoir prendre une décision correctrice et appliquer cette décision dans le processus opérationnel. L'utilisation de la *simulation en ligne* en accélérant le temps à partir d'une situation réelle peut aider le décideur à se projeter dans le futur proche pour vérifier si l'objectif prévu sera atteint.

La fonction [*se Projeter*] dans le temps par la simulation va être réalisée à partir d'un modèle qui se trouve dans un état correspondant à un état proche du processus réel. La garantie de démarrer une simulation de projection avec un modèle dans un état proche du processus réel est un élément déterminant sur les résultats obtenus à l'issue de la période de projection.

### III.3.4.1. Fonctions [A21] et [A22] - Sélectionner un critère de filtrage et Classifier les événements courants

L'apparition d'un événement important comme une panne machine durant la production réelle peut entraîner des conséquences majeures. Mais d'autres événements beaucoup moins importants n'ont aucune conséquence et ne nécessitent donc pas de se projeter dans le futur. Dans ce chapitre, nous allons donc proposer de classifier les événements afin de mettre en évidence ceux que l'on considérera *a priori* comme *critiques*. Ce sont les événements appartenant à cette classe qui déclencheront le simulateur en temps accéléré.

		selon	exemple	
Classification des événements selon différents critères	Changement d'état	Discret ou discontinu (changement d'état binaire)	la mise en attente d'une pièce dans une file, l'occurrence d'une panne, la libération d'une ressource,...	
		Déviant (le changement d'état est associé au franchissement d'un seuil limite)		
	Origine	Interne (endogène)	humain	capacité de travail, augmentation de l'absentéisme des opérateurs, changement de l'équipe d'opérateurs, grève, motivation, ...
			équipements	pannes machines, informatiques, problème logiciel, problème de transport et logistique, saturation des stocks, panne d'une ressource, défaillance propre des machines de production, bris d'outils, saturation des ressources, variation de la productivité, blocage opération,...
			matière	manque de pièces en stock, pièces rebutés, pièces non-conformes, mauvaise qualité,...
			informations	retard des O.F.,...
			décision	choix d'augmenter la production d'un produit spécifique, ...
	Externe (exogène)	modification de l'urgence d'une opération, annulation d'une commande, relation avec fournisseurs, arrêt ou interruption de la fourniture d'énergie, commande d'un produit personnalisé, arrivée d'une commande urgente, changement de réglementation, changement du temps de travail,...		
	Type d'impacts		intégrité du système, objectif général, relation avec indicateurs de pilotage, ressources humaines, ...	
	Evaluation	Gravité des impacts (importance des conséquences de l'événement sur les différents objectifs du projet)		
Criticité			fréquence, gravité, probabilité d'apparition, probabilité de détection, ...	

Tableau III.2 : exemple d'une classification des événements selon différents critères

Le rôle du décideur est de classier tous les événements qui surviennent dans le processus réel afin d'identifier le plus critique. Mais il existe différents critères pour réaliser cette classification. Il est donc nécessaire que le décideur sélectionne le critère en fonction de l'objectif planifié et prévisionnel de la production courante. Le Tableau III.2 montre un exemple de classification des événements selon différents critères.

Comme le montre la Figure III.17, les deux premières fonctions pour la réalisation d'une simulation de projection correspondent à [A21]-[sélectionner un critère de filtrage] et ensuite [A22]-[classifier les événements courants]. Ces deux fonctions vont aider le décideur à réaliser plus facilement la troisième fonction [A23]-[filtrer les événements déclencheurs].

La liste des événements déclencheurs n'est pas figée pour un système de production donné. Elle dépend du système étudié, mais aussi des objectifs fixés, qui eux, peuvent varier. Par exemple, si nous nous focalisons sur un objectif de délai, les événements importants sont ceux qui peuvent entraîner un retard de production comme l'augmentation du temps de cycle d'une machine ou l'arrivée d'une nouvelle commande. Si de plus nous avons des contraintes de qualité des pièces produites, le taux de rebut ou la non qualité seront eux aussi à prendre en compte. S'ils deviennent plus importants que ce qui est attendu, il sera nécessaire de fabriquer plus de pièces pour obtenir la quantité souhaitée. Par effet induit, le temps de production sera plus long que prévu et il sera nécessaire de s'assurer que ceci ne crée pas de retard.

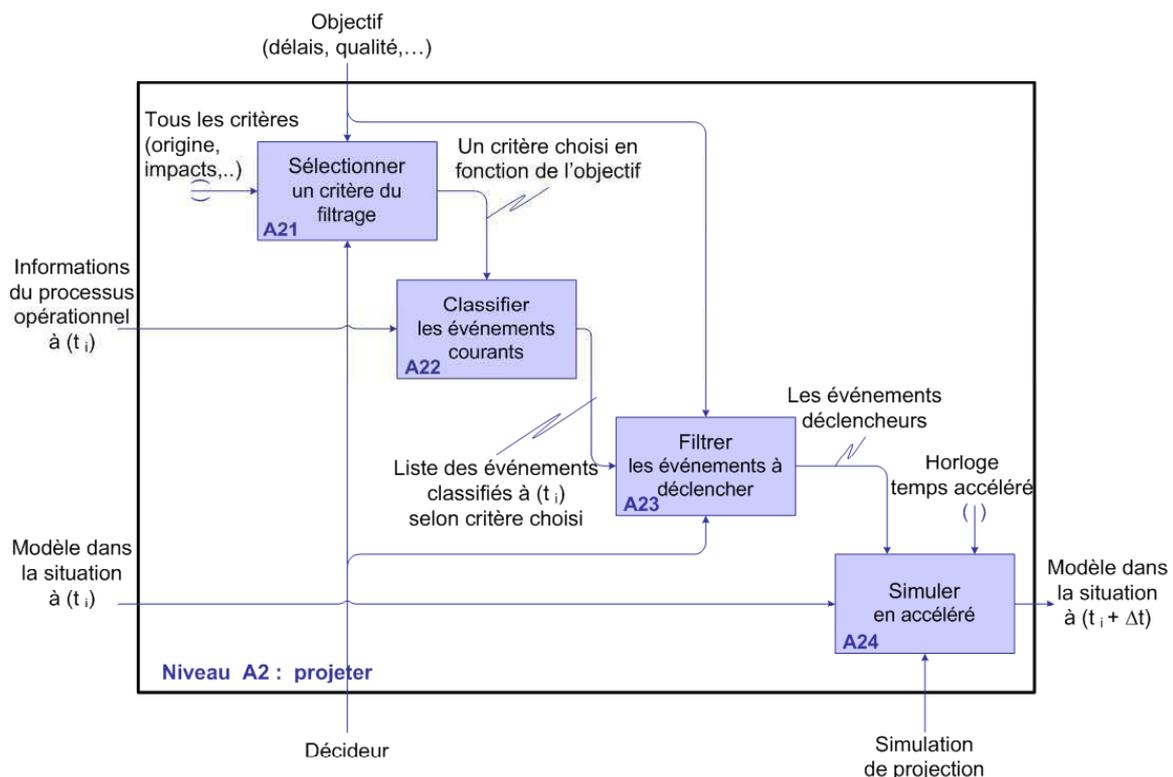


Figure III.17 : décomposition de la fonction [se Projeter] au niveau [A2]

### III.3.4.2. Fonction [A23] – Filtrer les événements déclencheurs

Tous les événements qui se produisent sur le système réel ne nécessitent pas le lancement d'une simulation de projection. L'apparition de certains événements sont normaux et on sait à l'avance qu'ils n'entraîneront pas de perturbations dans le futur. Ce type d'événement est appelé dans la Figure III.8 *événement prévu*. D'autres événements similaires

sont déjà apparus et ont déjà été pris en compte à cette occasion. Ce type d'événement est présenté comme *événement imprévu mais connu* dans le schéma. Si l'on considère que ce type d'événement a une probabilité forte d'apparition, il est inutile de lancer une simulation de projection si l'on est capable de retrouver le traitement qui avait été appliqué lors des dernières apparitions. Il suffit de réappliquer cette même solution.

Avant de lancer une ou plusieurs simulations, il est donc important de [filtrer] les événements. Cette fonction est présentée comme troisième fonction au niveau A2 du schéma SADT. Le filtrage des événements peut éviter de déclencher le modèle en accéléré à partir de tous les changements d'état normaux, car tous les changements d'état n'ont pas forcément des impacts importants sur l'objectif. C'est le décideur qui choisit d'utiliser la simulation de projection et qui doit aussi estimer une durée approximative pour cette exécution.

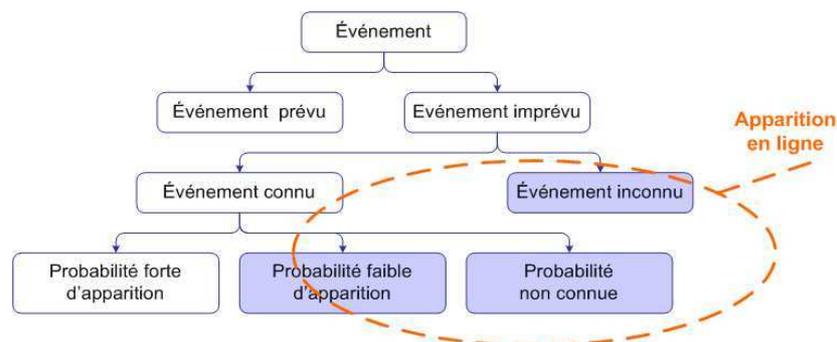


Figure III.18 : différencier les événements survenant au cours de la production

### III.3.4.3. Fonction [A24] – Simuler en accéléré

La simulation de projection en accélérant le temps peut être déclenchée pour plusieurs raisons :

- pour *synchroniser le modèle* : pour la fonction [Observer] en temps réel, nous avons expliqué la synchronisation entre les deux systèmes réel et simulé. La réalisation de cette fonction signifie qu'il y a un décalage entre l'occurrence d'un événement réel et le même événement en simulation. Cela peut constituer une des raisons du déclenchement de la simulation de projection en fonction de la décision prise par le décideur.
- Pour *ajuster les paramètres* : cette fonction est réalisée dans le cas où les décalages au niveau de l'apparition d'événements entre les deux systèmes deviennent répétitifs. Cela peut aussi être une raison pour déclencher la simulation en accéléré afin de prévenir la situation dans le futur avant effectuer des corrections sur les paramètres.
- Suite à l'analyse de données de production archivées : nous avons la possibilité de récupérer l'historique des données réelles en utilisant un outil d'exécution comme le MES. L'analyse de ces données peut fournir une indication sur les dérives de certaines variables. Si l'on constate une tendance marquée à la dérive (par exemple, le temps de cycle d'une machine est en constante augmentation après plusieurs cycles successifs), il peut être intéressant de déclencher une simulation de projection en accéléré.
- À partir d'*événements propres* : l'utilisation de capteurs internes au système de production peuvent nous permettre d'identifier les événements déclencheurs *propres* comme le changement d'état d'une machine, d'un stock, etc.

- A partir d'événements induits comme l'annulation d'une commande ou le lancement d'une commande urgente, un problème de matières premières avec le fournisseur, etc.
- Après avoir identifié les événements déclencheurs pour réaliser la fonction [A2]-[se Projeter], ce sont les actions à réaliser avant le déclenchement d'une simulation en accéléré et la durée de ces actions à respecter qui doivent être détaillées. Le temps disponible pour réaliser la fonction [A2]-[se Projeter] est généralement très bref car l'état de la production est toujours en changement. Cette durée dépend de la vitesse de la réalisation de plusieurs actions avant le démarrage du simulateur que nous avons spécifiées de façon temporelle dans la Figure III.19.

Pour commencer, la vitesse de détection des anomalies résulte de la sensibilité des capteurs placés sur les points de détection des événements propres, de la rapidité du système et des moyens de transfert des informations concernant l'événement critique externe au décideur. Plus précisément, ces événements critiques peuvent être signalés suite à une synchronisation, un ajustement des paramètres, une analyse de données, des événements propres ou induits. Le décideur est donc alerté que l'un des événements critiques s'est produit et que cela nécessite de diagnostiquer ce type d'anomalie et de prévoir éventuellement une simulation de projection. Le lancement de cette simulation est à l'appréciation du décideur en fonction des objectifs à atteindre.

La période de réalisation de la fonction [A2]-[se Projeter] est très limitée car cette période peut rapidement augmenter le retard d'application de la décision prise dans le processus opérationnel. Pour résoudre cette problématique, le décideur doit d'abord déterminer les conditions d'arrêt de la simulation (une date limite ou une situation précise) et ensuite estimer la durée approximative de la simulation. En effet, le décideur doit calculer et fixer une date maximale pour effectuer cette simulation en fonction de la vitesse du processus opérationnel.

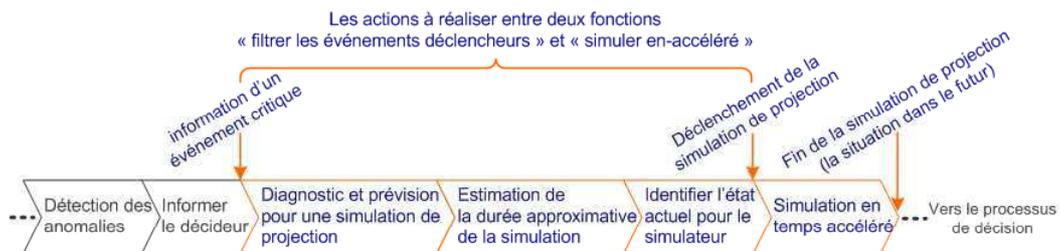


Figure III.19 : les actions à réaliser après identification d'événement déclencheur et simulation de projection

Après avoir estimé la durée à consacrer pour l'analyse et la simulation, il est nécessaire d'identifier l'état courant du processus réel dans le modèle et de déclencher le simulateur. La durée de la simulation en accéléré dépend encore de la vitesse du moteur du simulateur. La fin de la simulation doit indiquer le temps calculé par le décideur. Ce résultat va être envoyé dans la procédure de décision expliquée dans le chapitre suivant.

### III.3.5. Fonction [A3] - Décider en utilisant une simulation de correction

Dans le chapitre précédent, nous avons discuté de la possibilité d'apparition d'événements imprévus ou d'anomalies en phase d'exécution d'un processus réel comme une panne machine, l'arrivée d'une commande urgente, etc. Nous avons aussi expliqué que, suite à une anomalie, l'évolution du système dans le futur peut être connue grâce à l'utilisation de

la *simulation de projection*. Dans ce chapitre, nous allons analyser la procédure de prise de décision afin de modifier les variables de pilotage prédéfinies selon les derniers changements d'état constatés dans le processus réel. Nous allons aussi voir la place et l'aide de la *simulation de projection* dans la fonction [Décider].

D'après [Le Moigne, 1974], [Décider] c'est identifier et résoudre les problèmes que rencontre toute organisation. Dans toutes les entreprises industrielles, les décisions à prendre se hiérarchisent selon un horizon correspondant à leur implication dans l'évolution du système. Généralement, ces décisions à prendre interviennent dans les différents niveaux : (i) Les *décisions stratégiques* introduisent des orientations durables de l'entreprise industrielle sur un horizon à long terme. Par exemple : conception d'une nouvelle ligne de production, choix des activités, des marchés, construction du système de production, installation de nouvelles unités, etc. (ii) Les *décisions tactiques* s'intéressent à la mise en œuvre et à l'adaptation des décisions prises au niveau stratégique sur une période plus courte. Elles concernent particulièrement la planification mensuelle des flux de produits dans la production, l'approvisionnement, stockage, distribution. (iii) Les *décisions opérationnelles* sont celles qui nous intéressent plus particulièrement dans cette partie. Les décisions à ce niveau mettent en application le plan d'actions réalisé au niveau tactique. Elles contiennent les actions à court terme, comme par exemple l'ordonnancement de la production. La procédure de prise de décision intervient durant la production de deux façons, périodique et événementielle.

La notion d'*aide à la décision* est expliquée dans [Roy, 1985] comme l'activité qui, prenant appui sur des modèles, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision. Le point très important pour l'aide à la décision est de prévoir le comportement du système. Celui-ci tient compte de plusieurs facteurs. Il faut d'abord prendre en compte l'état du système au moment de la détection d'une anomalie et ensuite, il faut étudier les évolutions possibles du processus examiné à partir de cet état. Nous avons donc besoin d'un modèle dynamique du système réel pour prévoir les conséquences de différentes évolutions avant de prendre la bonne décision et de l'appliquer sur le système réel.

Dans cette partie, nous allons donc détailler la fonction [A3] [Décider] afin de piloter un atelier de production en temps réel. L'entrée principale de cette fonction correspond à la situation du processus opérationnel à  $(t_i + \Delta t)$  qui résulte de la simulation de projection vue dans la partie précédente. La sortie principale correspond aux valeurs corrigées et optimisées pour les variables de pilotage prédéfinies. Cette fonction contient différentes étapes permettant de prendre une bonne décision en cours d'exécution de la production. Nous décomposons la fonction [A3]- [Décider] en quatre fonctions présentées dans la Figure III.20.

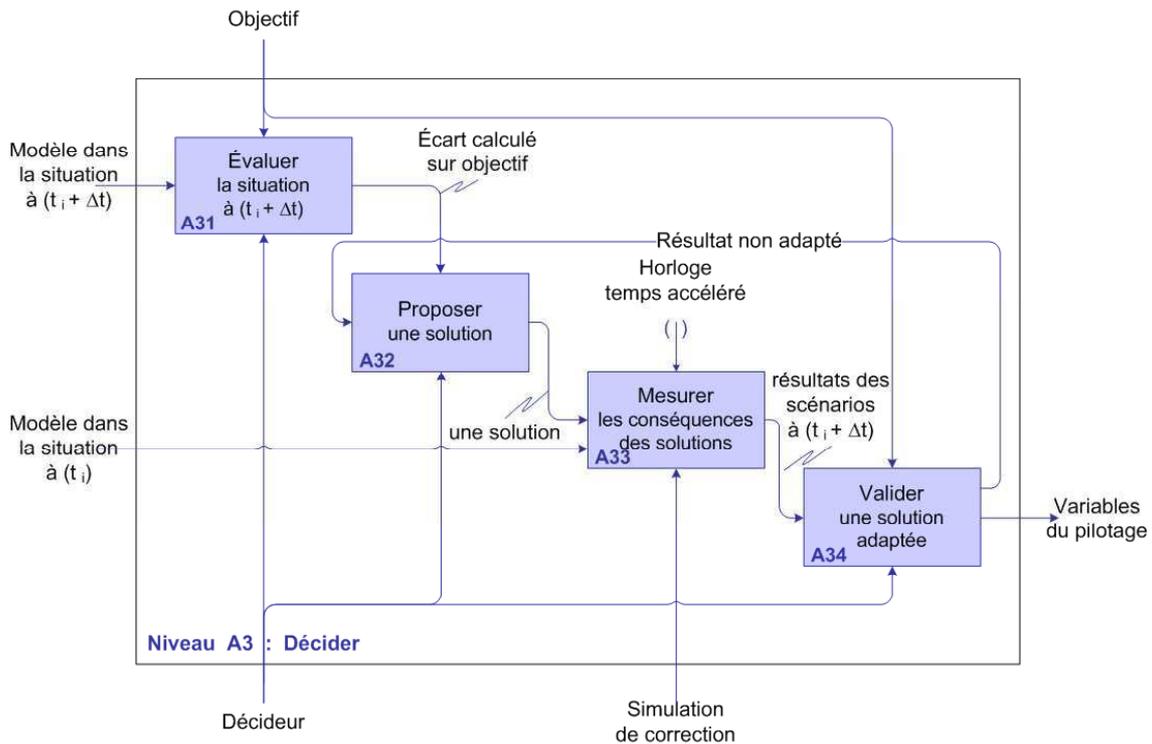


Figure III.20 : décomposition de la fonction [Décider] et support de la simulation de correction

### III.3.5.1. Fonction [A31] – Évaluer la situation à $(t_i + \Delta t)$

La première fonction concerne une évaluation de la situation du processus réel dans le futur. En effet, grâce à la simulation de projection, nous avons défini cette situation à  $(t_i + \Delta t)$  suite à une anomalie survenue dans le système. La date et les conditions d'arrêt de la simulation ont été définies précédemment par le décideur en fonction de l'objectif. Toutes les fonctions qui découlent de la fonction [A3]-[Décider] vont être exécutées dans le cas où l'on constate des changements imprévus sur l'objectif de production.

Nous proposons une fonction [A31]-[Évaluer la situation à  $(t_i + \Delta t)$ ] pour éliminer les situations qui n'ont pas besoin d'une correction dans les valeurs des variables de pilotage. Le rôle du décideur est ici de définir les conditions de lancement d'une procédure de décision et de juger si la situation obtenue exige un changement de valeurs de variables. Cela sera réalisé en fonction de l'objectif prévu et des besoins de la production considérée. La fonction [A31]-[Évaluer la situation à  $(t_i + \Delta t)$ ] évite un déclenchement d'une procédure de décision après chaque projection dans le temps. Les situations éliminées après réalisation de cette fonction concernent les événements inconnus du processus opérationnel qui n'ont pas d'impact dans l'avenir du système. En effet, la fonction [A31]-[Évaluer la situation à  $(t_i + \Delta t)$ ] s'applique comme deuxième filtrage de la fonction principale [A0]-[piloter un atelier en temps réel]. Ces filtres aident le décideur à réduire la durée des procédures de projection, de décision et de correction du pilotage.

### III.3.5.2. Fonction [A32] – Recherche des solutions

Dans la pratique de l'atelier de production et du point de vue industriel, les exigences pour prendre une bonne décision correspondent à la demande finale de la production et à la situation actuelle de l'atelier de production. Le décideur doit modifier les valeurs des variables

de décision en fonction de l'écart calculé dans la partie précédente. Cela correspond à utiliser une démarche pour tester ses idées, pour essayer de connaître leurs conséquences sur l'objectif et pour trouver de nouvelles idées pour l'implémentation sur le terrain. En cas d'apparition ordinaire d'événements connus, il peut s'appuyer sur son expérience et appliquer une solution déjà éprouvée. Mais dans un système de production complexe, les difficultés pour une prise de décision efficace peuvent devenir très importantes du fait de l'apparition de certains événements non prévisibles.

Deux des difficultés majeures concernent d'abord la grande quantité d'informations qu'il faut prendre en compte au moment de la décision et ensuite le délai très court à respecter pour choisir la bonne décision adaptée au système. De ce fait, le décideur doit être aidé de manière exacte et rapide grâce à une approche beaucoup plus précise et scientifique que celle basée uniquement sur son expérience. Pour cela, plusieurs alternatives (ou évolutions) doivent pouvoir être évaluées afin de connaître rapidement et précisément leur impact sur l'objectif de production.

### III.3.5.3. Fonction [A33] – Évaluer les solutions

Puisque nous sommes en phase d'exécution de la production, la procédure de décision suite à une anomalie dans le système doit garantir la qualité de la décision afin d'avoir des résultats plus fidèles. Par ailleurs, la procédure de prise de décision doit être exécutée en un temps raisonnable. Pour réaliser cette procédure, nous proposons l'utilisation d'un modèle de *simulation de correction*. En effet, le modèle de simulation d'un système a déjà été utilisé dans la phase d'exécution de la production. Il permet d'une part, de rendre compte de toutes les observations faites et, d'autre part, de prévoir la future situation du système suite à une anomalie survenue.

L'utilisation de la simulation en mode accéléré permet de prévoir le comportement du système considéré dans les conditions plus variées que celles ayant donné naissance aux observations. En effet, ces conditions doivent être définies à partir des différentes stratégies appliquées par le décideur. Après application de chaque stratégie proposée, nous effectuons une simulation en accéléré, toujours en respectant le délai prédéfini par le décideur. Nous remarquons que le point de démarrage de cette simulation ne concerne plus l'état obtenu dans la procédure de projection à  $(t_i + \Delta t)$  et correspond à l'état actuel obtenu à partir de la procédure d'observation à  $(t_i)$ . Comme nous l'avons montré dans le schéma précédent, l'obtention de l'état à  $(t_i + \Delta t)$  dans la procédure de décision n'a servi qu'au diagnostic du lancement de la simulation de correction.

Un élément important pour le lancement de cette simulation de correction est de connaître les informations définissant la situation actuelle du système réel à  $(t_i)$ . Cette situation s'obtient à partir de la fonction [AI]-[Observer] comme nous l'avons présenté dans la figure ci-dessus. A partir de l'état à l'instant  $(t_i)$ , la fin de cette simulation est le résultat du nouveau scénario retenu et indique la situation dans le futur à  $(t_i + \Delta t)$  en se basant sur une nouvelle condition.

Les mécanismes de prise de décision doivent permettre d'avoir une grande réactivité du système physique. Il est donc souhaitable de pouvoir exécuter plusieurs simulations en peu de temps. La durée pour réaliser la procédure de prise de décision doit respecter le délai fixé par le décideur. Il s'agit de pouvoir lancer et obtenir les résultats pour au moins une simulation entre l'apparition de deux événements sur le système réel. Si la première simulation met en

évidence une dérive du système réel par rapport à son objectif, il faut donc prévoir de lancer plusieurs simulations afin de déterminer les valeurs des variables de décision à corriger. Pour réduire la durée de cette procédure, on peut envisager une parallélisation des simulations plutôt que des lancements séquentiels.

#### III.3.5.4. Fonction [A34] – Valider une solution adaptée

Après chaque lancement de la simulation de correction, nous avons appliqué la fonction de validation sur ce résultat par rapport à l'objectif. Dans le cas où le résultat est non adapté à notre système réel, la procédure pour l'application d'une nouvelle stratégie sera réappliquée jusqu'à l'obtention d'une solution correcte. Les variables de pilotage corrigées peuvent donc être maintenant implémentées dans le processus opérationnel.

### III.4. Chronogramme d'utilisation de la simulation en ligne pour le pilotage en temps réel

#### III.4.1. Processus général de pilotage à l'aide de la simulation en ligne

Le processus de pilotage en temps réel à l'aide de la *simulation en ligne* intègre à la fois des fonctions destinées à *observer le comportement* du processus opérationnel, d'autres fonctions destinées à *se projeter dans le futur proche* pour évaluer l'évolution du système suite à un événement imprévu ou un dysfonctionnement, et enfin, des fonctions *pour aider à la prise de décision* afin de choisir la meilleure solution corrective. Nous avons présenté précédemment le processus correspondant à la fonction *Observer*. Dans la Figure III.21, nous illustrons de façon séquentielle et logique l'ensemble des fonctions du processus général et les relations qu'il peut y avoir entre elles pour piloter l'atelier.

La première relation correspond au déclenchement des fonctions destinées à *se projeter dans le futur proche* à partir d'un écart constaté dans les fonctions destinées à *observer le comportement* du processus opérationnel. Un filtrage est appliqué pour éviter de déclencher la simulation de projection pour n'importe quel écart. Le déclenchement des fonctions *pour aider à la prise de décision* sera réalisé suite à une évaluation sur la future situation du système à  $(t_i + \Delta t)$ . Si l'écart par rapport à l'objectif dépasse les limites fixées par le décideur, des fonctions destinées à *optimiser les variables de pilotage* sont lancées. À chaque itération, la simulation permet de vérifier si l'écart est minimisé par rapport à l'objectif. Cette boucle (optimisation/simulation) peut être répétée jusqu'à l'obtention d'un écart le plus faible possible. Les variables de pilotage peuvent alors être corrigées sur le système réel.

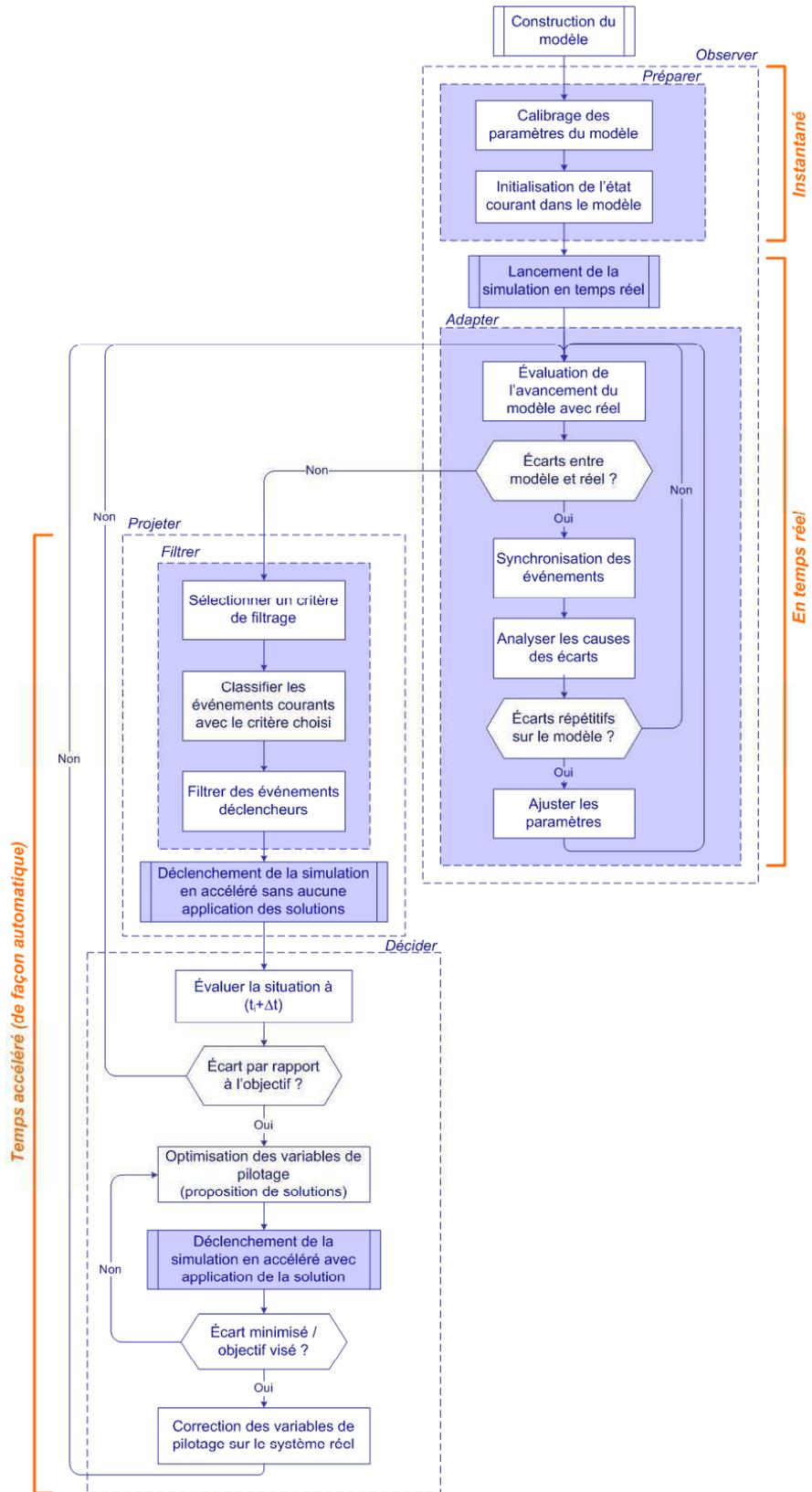


Figure III.21 : le processus de pilotage d'atelier en temps réel avec les trois principales fonctions remplies par la simulation en ligne

### III.4.2. Comparaison entre différentes stratégies d'utilisation de la simulation en ligne

Nous avons proposé une modélisation du processus de pilotage en temps réel sur un système de production en cours de fonctionnement. Cette modélisation s'applique sur un intervalle de temps qui commence à la détection d'un événement critique sur le terrain jusqu'à la correction dans le système réel des nouvelles valeurs des variables de pilotage. Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier la chronologie des événements du processus de pilotage propres à cette période et de comparer différentes stratégies possibles d'utilisation de la simulation en ligne.

#### III.4.2.1. Stratégie d'utilisation de deux modèles de simulation et d'initialisation sur un état unique

L'utilisation d'une simulation en temps réel appelée système de visualisation par [Straßburger *et al.*, 2005] permet d'avoir un modèle dont l'évolution est réalisée en parallèle avec le système réel. Le principal intérêt est de pouvoir visualiser ou observer sur le simulateur l'état du système réel à tout instant de la production. Dans le même cadre d'utilisation, [Cardin, 2006] appelle « Observateur » un simulateur dont l'évolution est parallèle au système réel. Il utilise cet observateur pour initialiser un simulateur proactif dans l'état actuel du système réel. La plupart des informations destinées à l'initialisation du simulateur proactif pourraient être directement obtenues à partir des outils destinés à la surveillance ou la supervision, mais certaines ne sont pas disponibles. Par exemple, il est rarement possible de connaître en continu la position des articles dans le système réel, car seuls quelques points de passage sont instrumentés par des détecteurs. L'observateur est donc utilisé pour mettre à disposition du simulateur proactif l'ensemble des données d'initialisation. Le chronogramme détaillé de la Figure III.22 illustre l'enchaînement d'événements internes au processus de pilotage après l'apparition d'un événement externe critique. Selon [Cardin, 2007], l'observateur évolue grâce à une horloge en temps réel synchronisée avec l'avancement du temps universel. Nous pouvons donc observer l'apparition de tous les événements détectés du système réel sur l'axe observateur de la figure grâce à son lien direct avec le système réel.

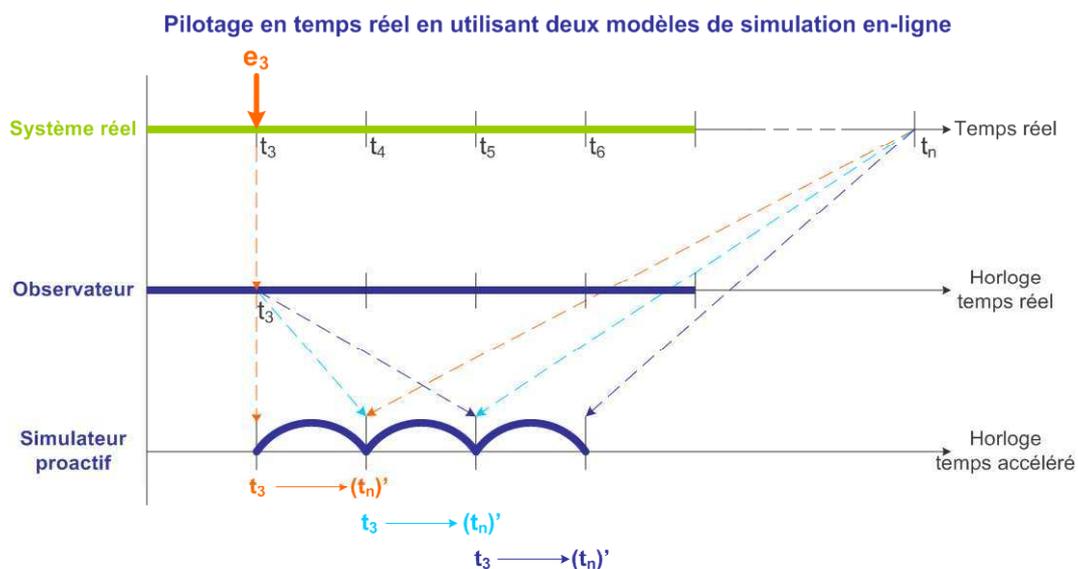


Figure III.22 : chronogramme de l'utilisation conjointe d'un observateur et d'un simulateur proactif selon l'application de [Cardin, 2007]- stratégie d'initialisation sur un état unique

A l'instant ( $t_3$ ), plusieurs simulations successives peuvent être lancées en accéléré avec le *simulateur proactif* pour analyser, après une durée ( $t_n$ )-(t<sub>3</sub>), les conséquences de cet événement dans le futur, à l'instant réel ( $t_n$ ).

La première simulation lancée en mode proactif montre l'évolution des événements dans le futur mais sans correction. Le point de départ de cette simulation doit correspondre à l'état du système réel à la date de détection ( $t_3$ ) de l'événement ( $e_3$ ). Dans ce cas, le simulateur proactif peut donc être initialisé avec les données provenant de l'observateur. Le point d'arrêt ou la condition d'arrêt de cette simulation est estimé en respectant le comportement du système réel et la durée de prise de décision. Cette condition d'arrêt peut correspondre à une date ( $t_n$ ) ou bien à un objectif de production. Supposons que la durée d'une simulation proactive est égale à ( $t_4$ - $t_3$ ) en temps accéléré et correspond à l'équivalent de ( $t_n$ )-(t<sub>3</sub>) en temps réel. Dans ce cas, la situation de la production à l'instant ( $t_n$ ) dans le futur sera obtenue à l'instant ( $t_4$ ) dans le temps réel. On appelle ( $t_n$ )' dans le schéma pour différencier une situation virtuelle de l'instant ( $t_n$ ) qui correspond à ( $t_4$ ) dans le temps réel.

Les simulations successives à la suite d'une première simulation proactive présentent la future situation du système, mais cette fois avec l'application de corrections. Les points de départ de ces simulations sont aussi initialisés au même point de départ ( $t_3$ ) que lors de la première simulation proactive, sachant que le système réel a probablement évolué.

Dans le cas où nous avons besoin de nombreuses expérimentations pour trouver une meilleure solution de correction, il est possible que l'écart soit de plus en plus grand entre l'état pris en compte à ( $t_3$ ) pour initialiser le simulateur proactif et l'état actuel réel, par exemple à ( $t_6$ ). Si le comportement dynamique du simulateur proactif n'est pas proche du comportement dynamique du système réel, ceci peut entraîner des résultats de la simulation proactive éloignés de la réalité à venir. Les analyses des résultats et la décision en conséquence seront inexactes, car cette décision est basée sur un état obtenu au moment de l'apparition d'un événement ( $t_3$ ), qui ne correspond plus à l'état actuel réel ( $t_6$ ).

#### **III.4.2.2. Stratégie d'utilisation de deux modèles de simulation et d'initialisation sur des états successifs**

Dans les travaux précédents, nous avons parlé de l'utilisation de deux types de simulation pour le pilotage. Nous montrons dans la Figure III.23 que le premier type concerne l'utilisation de la simulation en temps réel et que le deuxième type correspond à une utilisation de la simulation en accéléré. La simulation en mode accéléré est utilisée tout d'abord comme une simulation de projection pour mesurer les impacts d'un événement critique dans le futur, puis comme une simulation de correction pour mesurer les conséquences des corrections proposées.

Grâce à l'utilisation conjointe des deux simulateurs, le problème décrit précédemment au sujet de l'initialisation du modèle de simulation proactif peut trouver une solution en se basant sur les données exactes définissant le vrai état actuel. Ces données peuvent être obtenues à partir du modèle de simulation en temps réel en rafraîchissant le modèle de simulation de correction avec les données courantes dans le système réel à tout instant ( $t_4$ ), ( $t_5$ ) ou ( $t_6$ ), etc.

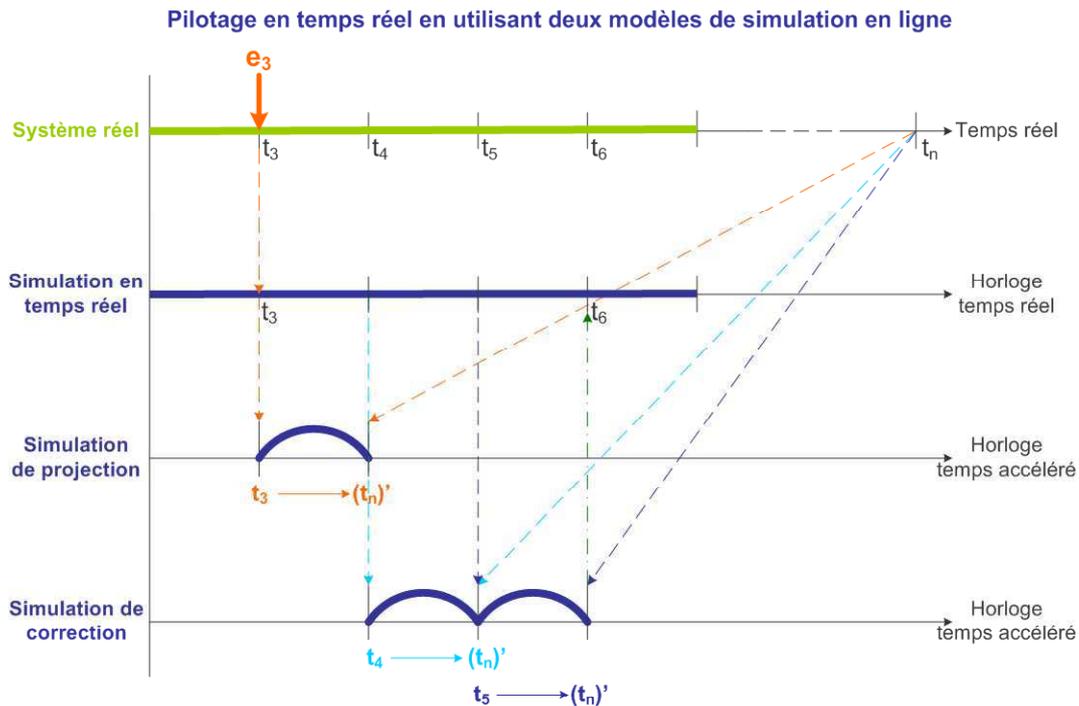


Figure III.23 : chronogramme d'utilisation de deux modèles de simulation-stratégie d'initialisation sur des états successifs

L'inconvénient de cette solution est qu'il faut initialiser le modèle de simulation pour chaque déclenchement de la simulation de correction à partir d'un nouvel état du modèle de simulation temps réel, ce qui peut prendre plus de temps.

L'avantage est d'avoir des résultats plus précis, ce qui peut augmenter la qualité de la décision sur les valeurs des variables de décision. La stratégie choisie sera fonction de la précision souhaitée, du temps de réalisation d'une simulation en accéléré, de la fréquence des événements, du temps d'acquisition des données, du temps de prise de décision, etc.

### III.4.2.3. Stratégie d'utilisation d'un seul modèle de simulation et d'initialisation sur un état unique

Nous proposons par la suite, une *stratégie avec un seul modèle de simulation*, utilisé à la fois pour *visualiser* le comportement du système en utilisant une horloge en *temps réel* et aussi pour *se projeter et décider* en utilisant une horloge en *temps accéléré*. Cette stratégie avec un seul modèle est détaillée dans la Figure III.24. En supposant qu'un événement critique ( $e_3$ ) est détecté à l'instant ( $t_3$ ) sur le système réel, la simulation est déclenchée en accéléré pour mesurer les impacts. Le décideur a précisé jusqu'à quel temps pouvait se dérouler cette simulation (temps d'arrêt). Le modèle de simulation en temps réel a suivi l'évolution du système réel jusqu'à cet instant ( $t_3$ ).

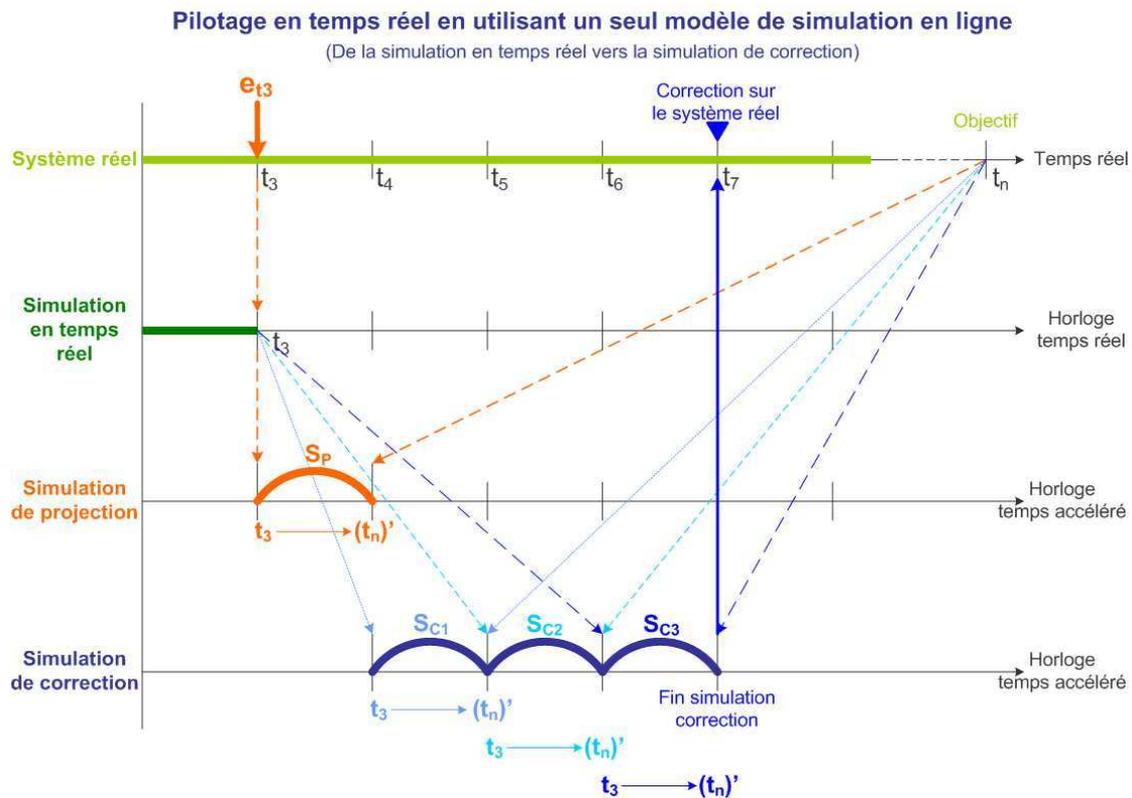


Figure III.24 : chronogramme d'utilisation d'un seul modèle de simulation en mode temps réel et en mode accéléré pour la projection et la correction-stratégie d'initialisation sur un état unique

Dans la phase de simulation de projection, le modèle, lancé en accéléré, va reproduire l'évolution des événements suivants dans le système jusqu'au temps d'arrêt. L'intérêt d'utiliser le même modèle que pour la simulation en temps réel est d'éliminer le temps d'acquisition des données provenant du terrain. A l'instant où l'on déclenche la simulation de projection, le modèle est initialisé dans un état proche du système réel. L'utilisation d'un deuxième simulateur obligerait aussi à initialiser le modèle. Avec cette stratégie à un seul modèle, l'état initial de la simulation de correction est connu automatiquement grâce à l'état de la simulation en temps réel au moment de l'apparition de l'événement. Cette simulation de projection appelée ( $S_P$ ) sur le schéma permet de montrer l'impact sur l'objectif, suite à l'événement critique détecté.

Dans la phase de correction, des simulations appelés ( $Sc_1$ ), ( $Sc_2$ ), ( $Sc_3$ )... peuvent être appliquées si le résultat de la simulation de projection présente un écart jugé trop important par rapport à l'objectif. Dans ce cas, chaque simulation de correction permet d'évaluer des solutions avec de nouvelles valeurs des variables de pilotage. Plusieurs simulations de correction peuvent être répétées avec, pour chacune d'elles, une modification des valeurs des variables de pilotage, jusqu'à ce que l'objectif soit atteint.

Dans ce travail, nous ne détaillons pas les techniques permettant de générer les solutions des variables de pilotage, mais celles-ci peuvent être obtenues soit à partir d'algorithmes soit à partir de règles préétablies ou d'une base de connaissance. Chaque simulation de correction est déclenchée à partir d'un état initial pris en compte à ( $t_3$ ). À l'instant ( $t_7$ ), correspondant à la fin des simulations de correction, les nouvelles valeurs des variables de pilotage sont appliquées sur le système réel.

Nous pouvons donc conclure que l'intérêt d'une telle stratégie à un seul modèle de simulation et d'initialisation sur un état unique est :

- (i) de simplifier le processus de pilotage en utilisant un seul outil de simulation. Ce modèle permet de visualiser la dynamique du processus réel, de mesurer les impacts d'un événement dans le futur et d'aider la procédure de prise de décision en évaluant les différentes solutions de correction,
- (ii) de ne pas avoir besoin d'initialiser un autre modèle de simulation de projection, puisqu'il suffit d'accélérer l'horloge du simulateur à partir de l'instant ( $t_3$ ),
- (iii) d'acquérir les données une seule fois pour initialiser chaque simulation, ce qui peut s'avérer intéressant quand les contraintes de temps sont importantes dans le processus de pilotage en temps réel, notamment avec un objectif basé sur le délai.

L'utilisation d'une telle stratégie présente cependant des inconvénients :

- (i) les simulations de correction successives lancées jusqu'à trouver le meilleur scénario ( $Sc_3$ ) à l'instant ( $t_7$ ) sont toujours initialisées sur l'état pris en compte à ( $t_3$ ). Si ces simulations de correction sont nombreuses et de durée cumulée importante, il est possible de constater des changements majeurs entre l'état pris en compte à ( $t_3$ ) et le vrai état actuel à ( $t_7$ ),
- (ii) un autre inconvénient est de « perdre » la fonction [*observer*] de la simulation en temps réel pendant les phases de projection et de correction. A l'issue de la correction des variables de pilotage, il est donc nécessaire de reprendre la simulation en temps réel. Ce problème est présenté dans le chapitre suivant.

#### III.4.2.4. Problème de reprise de la simulation en temps réel

Supposons que la dernière simulation de correction indiquée ( $Sc_3$ ) dans la Figure III.25 corresponde à la meilleure solution choisie parmi l'ensemble des scénarios proposés. Une fois que les valeurs des variables de pilotage évaluées dans ( $Sc_3$ ) ont été implémentées dans le système réel, il faut reprendre le processus de simulation en temps réel. Nous proposons une stratégie pour résoudre le problème de reprise de simulation en temps réel afin d'attendre l'apparition d'un autre événement critique dans le processus opérationnel réel et de reboucler éventuellement toutes les étapes précédentes.

La fin de la simulation de correction ( $Sc_3$ ) correspond à l'instant ( $t_7$ ) dans le temps réel. Nous avons donc besoin de connaître l'état du processus réel à cet instant ( $e_{t_7}$ ) et d'initialiser notre modèle de simulation unique dans cet état. L'évolution de l'état du processus réel, depuis l'arrivée d'un événement critique à l'instant ( $t_3$ ) jusqu'à la modification de certaines valeurs des variables de pilotage à l'instant ( $t_7$ ) est pris en compte dans chaque simulation de correction en accéléré. En effet, durant chaque simulation de correction, tous les événements vont se produire mais dans un temps réduit par rapport au temps réel. Les instants ( $t_4$ ), ( $t_5$ ), ...( $t_n$ ) dans la réalité correspondent aux points indiqués ( $t_4'$ ), ( $t_5'$ ), ...( $t_n'$ ) dans les simulations de correction successives.

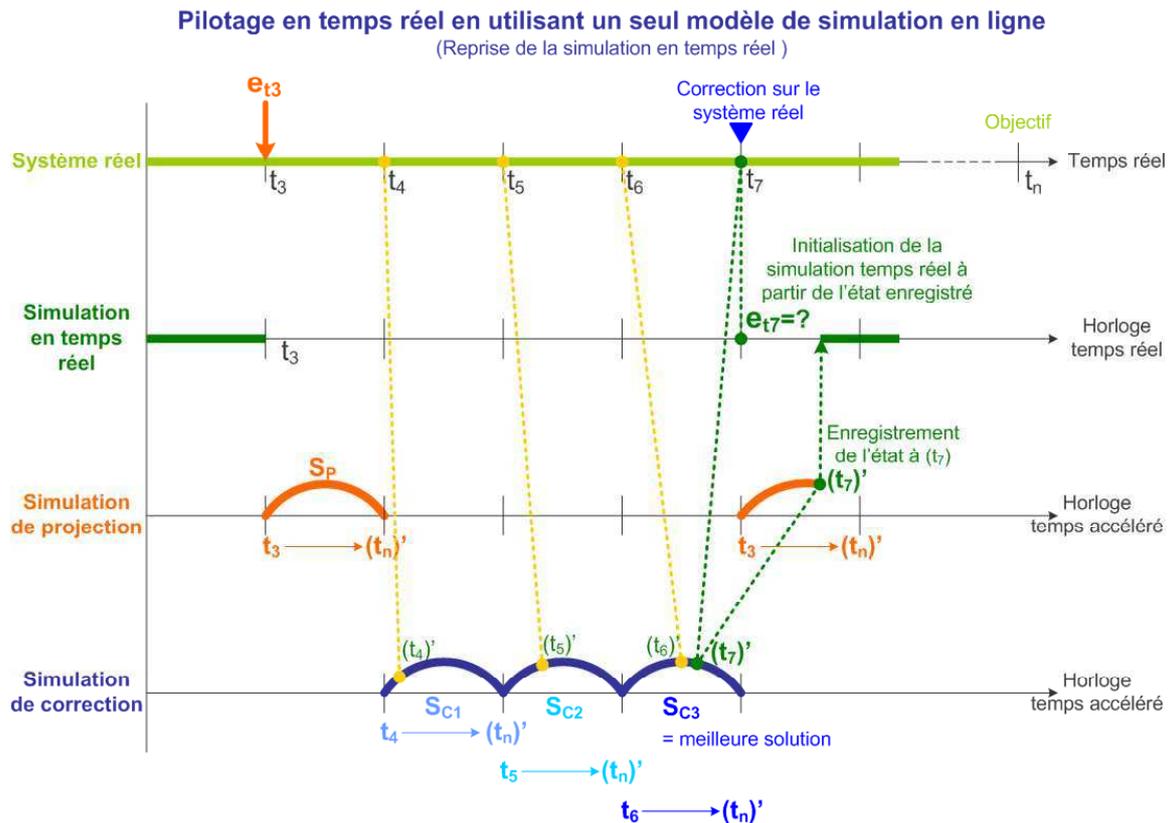


Figure III.25 : chronogramme présentant le problème de reprise de la simulation en temps réel suite à l'application de la stratégie d'utilisation d'un seul modèle de simulation

L'état virtuel du processus réel à l'instant ( $t_7$ ) a été « vu » par la dernière simulation de correction ( $Sc_3$ ) grâce à son horloge de temps accéléré, mais cet état n'a pas été enregistré. Une fois que l'on connaît la date de fin de la dernière simulation de correction, il est donc nécessaire de relancer une simulation avec les mêmes valeurs des variables de pilotage et de l'arrêter à l'instant ( $t_7$ )' qui doit correspondre à l'état réel ( $t_7$ ). La simulation temps réel reprend donc à partir de cet instant. Cependant, un risque existe que le système réel n'ait pas conservé un comportement proche du modèle de simulation entre l'apparition de l'événement critique et l'application des valeurs corrigées des variables de pilotage. Dans ce cas, l'état virtuel initial de reprise de la simulation en temps réel peut être différent de l'état réel. Il faut alors avoir recours à la fonction [Adapter], qui a été présentée dans le chapitre III.2.1.3.

### III.5. Couplage entre Simulation et MES pour l'aide à la décision dans le pilotage

Nous avons étudié différentes applications de la *simulation en ligne* en phase d'exploitation d'une production et nous avons aussi proposé une modélisation du processus de pilotage avec différents modes d'utilisation de la *simulation en ligne* dans les différentes étapes du pilotage. Dans cette partie, nous présentons une structure de pilotage en temps réel d'un système de production basé sur le couplage entre un outil de *simulation en ligne* à événements discrets et un *système d'exécution de la fabrication MES*.

Comme nous l'avons expliqué dans la partie II de cette thèse, le MES a pour objectif d'exécuter les commandes sur le processus opérationnel. Il utilise une base de données et il comporte notamment une fonction permettant l'acquisition des données de terrain. Présenté

comme un outil de pilotage, le MES ne dispose pas de fonction de simulation destinées à l'aide à la décision. Si les informations fournies par le MES permettent au décideur de constater en temps réel l'apparition d'événements critiques et donc de prendre des décisions de correction, aucune fonction ne permet de vérifier la pertinence de la décision retenue. Comme cela a été montré dans les chapitres précédents, la simulation en phase d'exécution de la production permet d'évaluer différentes décisions possibles en réalisant plusieurs scénarios de la simulation avant d'agir sur le système de production réel. Nous proposons donc de coupler ces deux outils en ajoutant au MES une nouvelle fonction de simulation pour l'aide à la décision dans le processus de pilotage. Dans la Figure III.26, nous montrons l'utilisation des deux outils.

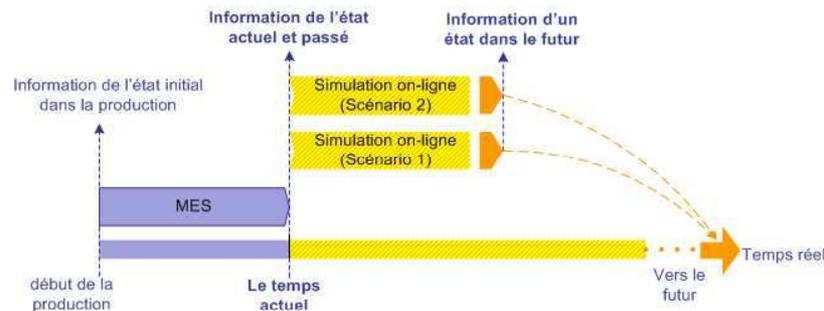


Figure III.26 : couplage entre MES et simulation en ligne

### III.5.1. État de l'art de la simulation couplée à l'exécution pour le pilotage d'atelier

Dans les différents travaux de couplage pour le pilotage, les auteurs présentent plusieurs solutions de systèmes composés d'outils de simulation, de supervision, d'exécution de la production, de systèmes d'acquisition des données, de bases de données, d'émulateur du système physique, etc. Ils montrent les principes et les difficultés de mise en œuvre d'un tel système et l'intérêt d'avoir un lien direct entre modèle et processus réel de production.

La méthode *ETS Event-Time Synchronization* est présentée par [Manivannan et Banks, 1991] pour résoudre les problèmes de pilotage en ligne. Cette méthode permet d'avoir un modèle de simulation avec le même comportement et la même complexité que le système réel pour permettre le pilotage en ligne face aux événements. Elle synchronise les événements et ajuste leur temps associé entre le modèle et l'atelier. La connexion d'un système d'acquisition de données avec un émulateur permet de collecter l'état et la performance mesurée de système émulé. Cependant, cette application ne montre pas les relations entre les différents types d'événements sur les entités, ressources et activités.

[Tayanithi *et al.*, 1992] proposent une nouvelle architecture appelée *KBOLS Knowledge Based On Line Simulation* ou simulation en ligne à base de connaissances afin d'obtenir une meilleure productivité et de minimiser les interruptions. Ce travail prend en compte seulement deux types d'interruptions : les pannes machine et les commandes urgentes ; il ne considère pas les événements critiques avant l'arrivée des perturbations. Tout d'abord, la simulation en ligne est utilisée avec les données courantes pour analyser les effets des interruptions. Ensuite, une base de connaissances est utilisée pour le traitement des interruptions. Pour finir, un émulateur du système physique permet de vérifier les résultats avant l'application sur le système réel. La principale difficulté est le temps de réponse entre la modification de la décision du pilotage et l'exécution du pilotage actuel. Cet article est l'un des papiers les plus complets sur la simulation en ligne. Pourtant, les auteurs n'expliquent pas en détail le

problème de l'initialisation de l'émulateur et la façon dont ils injectent les données réelles dans le simulateur.

[Katz *et al.*, 1993] démontrent l'avantage d'un pilotage événementiel via la simulation par rapport à un pilotage périodique, notamment face aux changements d'ordonnancement (re-ordonnancement) causés par des interruptions telles que des ordres urgents et des écarts dans le plan de production.

[Drake et Smith, 1996] se focalisent sur le pilotage et l'analyse de scénario à court terme. Pour cela, ils insistent également sur les difficultés de mise en place de la simulation en ligne. Pour les auteurs, les systèmes de simulation en ligne incorporeront à terme deux puissantes caractéristiques : (i) la capacité à prévoir correctement le comportement futur de l'atelier compte tenu de son état actuel, (ii) la capacité d'émuler et/ou supplanter la logique de commande d'un système manufacturier. Ces deux capacités offrent des avantages potentiels à une variété d'utilisateurs dans une organisation de fabrication. La Figure III.27 montre un système de simulation en ligne intégré avec plusieurs services fonctionnels. Les auteurs donnent un schéma général de mise en place de cette simulation vis-à-vis des autres systèmes de l'entreprise et il donne un exemple d'application de ce schéma à l'aide du langage de simulation SIMAN.

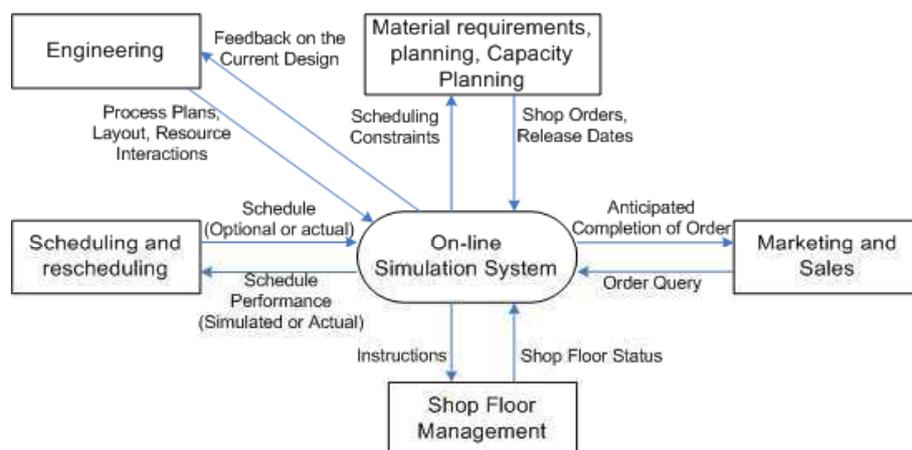


Figure III.27 : un système de simulation en ligne pour la planification, l'ordonnancement et le suivi [Drake et Smith, 1996]

[Smith *et al.*, 1996] ont développé une application de pilotage basée sur la simulation pour envisager la date de traitement d'un plan et obtenir le produit fini. Pour avoir des résultats fiables, ils indiquent les échanges et les fréquences d'échange des données entre le modèle de simulation et le système réel. Le modèle doit bien sûr être proche de la réalité. Pour mieux prendre en compte l'état courant du système dans la simulation, ils utilisent les données récoltées et ils calculent le temps d'occupation de chaque poste de travail pour l'injecter dans chaque nouvelle simulation.

L'utilisation de la simulation pour aider au pilotage reste souvent difficile à mettre en place à cause de la difficulté de collecter les données du terrain d'une manière cohérente et automatique. Il est difficile de garder un modèle et ses données suffisamment proches de la réalité pour que les résultats soient exploitables. De plus, les logiciels de simulation ne facilitent pas toujours la prise en compte de données réelles. La simulation en ligne présente donc deux problèmes qui sont, tout d'abord, la collecte efficace et automatique des données du terrain et ensuite, leur intégration dans le modèle de simulation. L'auteur [Davis, 1999]

prédit qu'une des directions futures d'évolution de la simulation sera la simulation basée sur les technologies web. Ces simulations permettront à tous les acteurs d'interagir sur un modèle à travers une simple interface, programmée par exemple en Java. Il expose qu'il n'existe pas de procédures exactes qui permettent aux utilisateurs de s'interfacer efficacement avec les données temps réel.

La simulation est un outil utilisé dans le monde industriel dans les phases qui concernent la conception ou le dimensionnement des systèmes de production ou bien comme un outil d'aide à la décision. [Varady, 1999] utilise une simulation qui permet une modélisation fidèle de l'outil de production et qui prend en compte la dynamique de système réel. Elle peut donc apporter un réel avantage pour aider à un pilotage efficace et pour une optimisation des performances.

Le pilotage proactif via la simulation est présenté dans [Pujo *et al.*, 2004]. Ils construisent le modèle DEVS d'un atelier comportant plusieurs lignes de type KANBAN enchevêtrées. Cet atelier considère plusieurs références de produits. Les auteurs utilisent la technique de *warm-up* pour résoudre le problème d'initialisation des simulations. Cette méthode consiste à toujours partir d'un état vide de l'atelier et suivre une trajectoire permettant d'amener le système dans l'état actuel. Cela nécessite souvent des grands archivages des évolutions passées du système réel en vue de construire la trajectoire au moment souhaité. Cette technique n'est donc pas toujours utilisable.

[Kouiss et Najid, 2004] présentent une structure de pilotage complexe basée sur le couplage d'un progiciel d'atelier de type MES et la simulation en utilisant une base de données en temps réel. Le schéma de la Figure III.28 présente le fonctionnement général de leur pilotage. Ils utilisent la simulation en ligne comme détecteur de dérivation du système. Une simulation est lancée pour donner une estimation au MES du comportement du système. Les résultats obtenus avec ces estimations sont comparés à chaque moment. Si la dérive augmente, une alarme est déclenchée et le pilote doit prendre une décision pour corriger. Le problème est la liaison avec le réel. Ils ne font qu'observer le comportement réel et ajuster en conséquence les distributions aléatoires utilisées dans le modèle de simulation. Ce modèle est lancé à partir d'un état du système vide. L'idée générale est d'avoir une correction permanente et de faire intervenir la décision en utilisant une structure d'arbre de décision. Ce travail est orienté vers une méthode de pilotage événementiel afin de corriger le système en permanence. Une expérimentation sur une cellule flexible d'assemblage a été réalisée en utilisant le logiciel de simulation ARENA, le superviseur INTOUCH et la base de données INSQL.

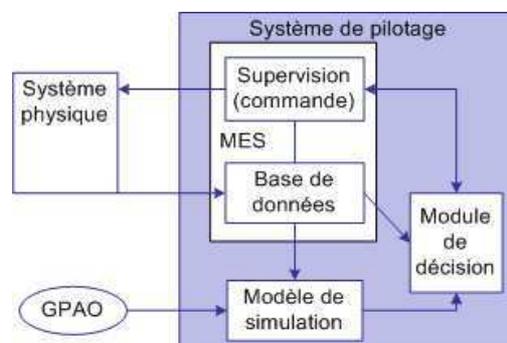


Figure III.28 : architecture de fonctionnement [Kouiss et Najid, 2004]

Le couplage des systèmes commerciaux de simulation discrets avec les systèmes de réalité virtuelle ou les systèmes de visualisation en temps réel est proposé par [Straßburger *et al.*, 2005]. Ce couplage ouvre de nouvelles possibilités pour l'échange temporel entre le produit et la conception de processus. Cet article se concentre sur les problèmes techniques de ce couplage comme le lien entre simulation et réalité virtuelle, l'échange de données, le parallélisme temporel entre le système de visualisation et le temps réel, etc. Les auteurs discutent notamment de la synchronisation, car c'est le facteur principal pour permettre une visualisation interactive assurée dans le monde virtuel.

En conclusion, le but de cet état de l'art est de montrer la place de la simulation en ligne pour le pilotage. Au travers des différents travaux de recherche étudiés, il apparaît que la simulation est l'un des outils les plus efficaces d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier. On peut constater que l'idée d'utiliser la simulation en ligne comme un outil d'aide à la décision pour le pilotage a été beaucoup mentionnée dans les travaux de recherche, mais que malheureusement, il n'existe que de très rares applications industrielles de ce concept. Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse montrent les apports de la simulation pour le pilotage réactif afin de prévoir le comportement à court terme du système de production. Ces travaux éclairent aussi sur les difficultés à établir un lien direct et constant entre le modèle et le système réel. Pour répondre à ces problèmes, cette thèse contribue à exposer des solutions pour mettre en œuvre le couplage, comme par exemple la synchronisation, l'acquisition des données, le filtrage des données, l'initialisation du modèle, etc.

### III.5.2. Analyse du besoin et spécifications attendues pour le couplage

Précédemment, nous avons défini le processus de pilotage afin de corriger les valeurs des variables de pilotage suite à l'apparition d'événements dans le processus réel. La Figure III.29 montre les relations entre le processus opérationnel et le processus de pilotage.

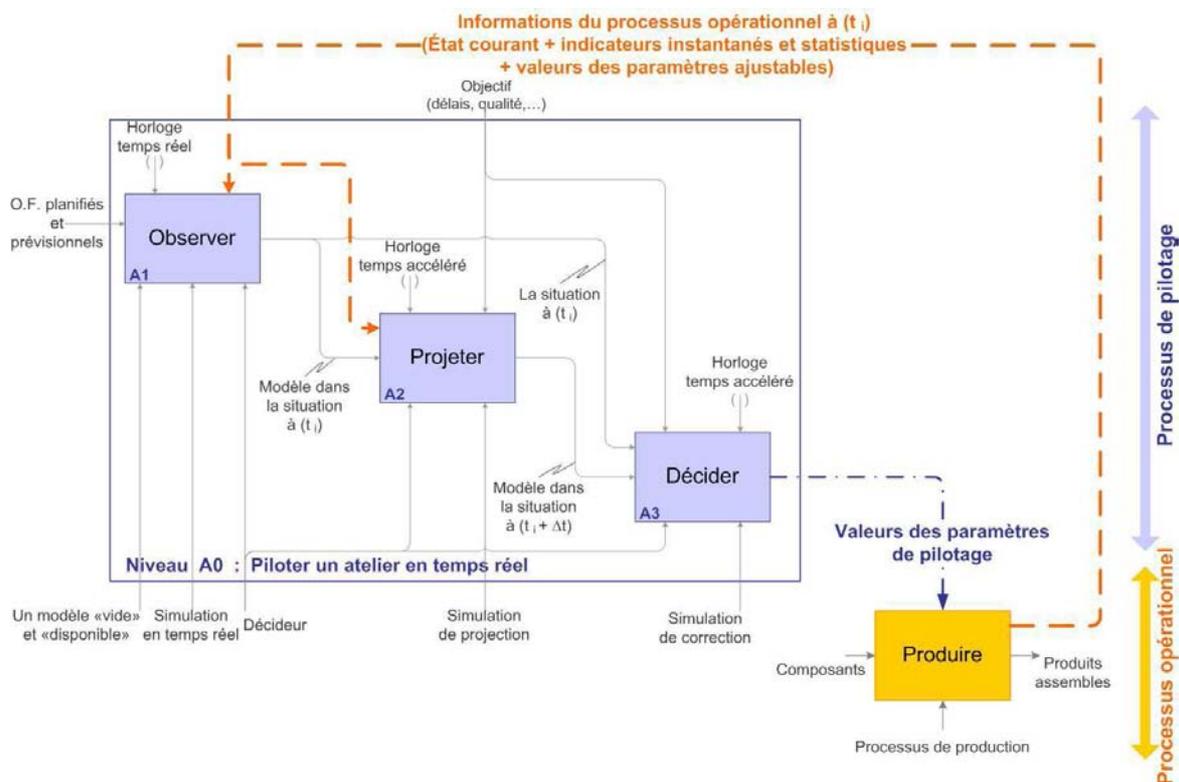


Figure III.29 : informations provenant du processus opérationnel à appliquer au processus de pilotage

Si l'on s'intéresse aux informations sortant du processus opérationnel à ( $t_i$ ), elles doivent être utilisées non seulement comme contrôle de la fonction [observer], mais aussi comme des données d'entrée de la fonction [se projeter].

Nous avons vu le support d'un outil de simulation de flux dans les différentes fonctions de pilotage. Cet outil a la capacité de nous informer sur la situation future du système en testant plusieurs scénarios. Dans les chapitres précédents, nous avons expliqué les types d'informations dont nous avons besoin pour le pilotage, mais nous n'avons pas indiqué la façon d'acquérir ces données. L'objectif général est donc d'établir un lien entre un outil de simulation de flux et un outil d'exécution d'atelier tout en affinant progressivement la cohérence du modèle de simulation par rapport au système réel grâce à la mise à jour dynamique des données utilisées. Dans ce but, nous présentons l'architecture générale de l'intégration des deux outils de simulation et de MES dans la Figure III.30.

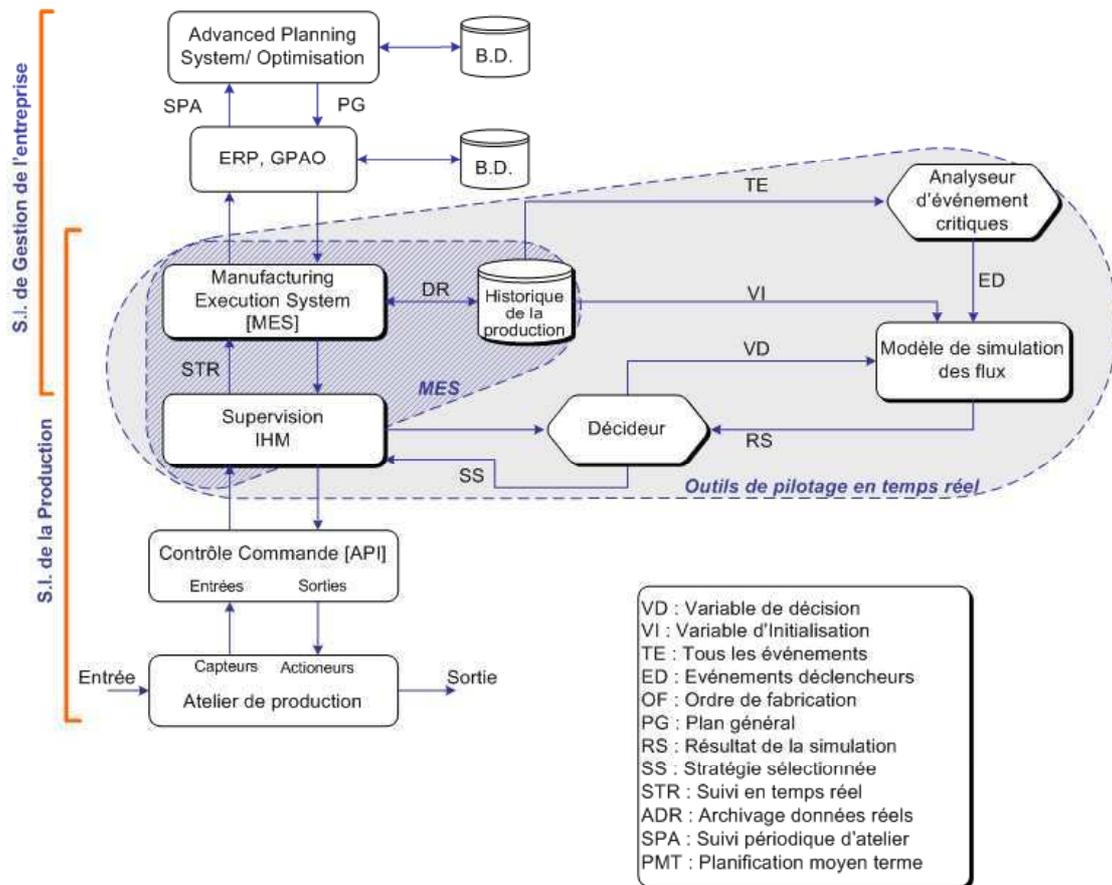


Figure III.30 : architecture de couplage Simulation-MES

Les progiciels de type *ERP* (*Enterprise Resource Planning*) et *GPAO* (*Gestion de Production Assistée par Ordinateur*) permettent de planifier la demande et les besoins. Une optimisation opérationnelle est proposée par les *APS* (*Advanced Planning System*). Chacun de ces outils a sa propre base de données afin de stocker l'ensemble des informations nécessaires. L'utilisation de ces outils n'est pas souvent évoquée pour préciser les liaisons entre le niveau planification et le niveau exécution. Un outil de *MES* a pour principal intérêt de réaliser cette liaison entre le *système d'information de la gestion d'entreprise* et le *système d'information de la production*.

Le MES peut récupérer les données provenant du système de gestion de production pour générer l'ordonnancement opérationnel puis lancer les ordres et suivre la production. Le MES récupère aussi les données à partir du niveau d'exécution dans le processus opérationnel, ce qui correspond à la fonctionnalité d'acquisition de données de cet outil. Nous avons expliqué dans les chapitres précédents que cette fonctionnalité peut être réalisée de façon automatique, ce qui est le plus fiable ou bien de façon manuelle par l'opérateur positionné dans la chaîne de production. La manière d'acquies les données et la fréquence d'acquisition de données peuvent être différentes en fonction du système de *contrôle-commande* utilisé, comme par exemple l'utilisation d'automates programmables industriels (API), éventuellement connectés en réseaux locaux.

L'utilisation d'une base de données reliée au MES permet d'enregistrer les événements survenus dans le passé avec leurs dates d'apparitions. La *supervision* permet de communiquer avec les opérateurs en affichant les informations via une interface homme-machine. Le décideur est donc capable de suivre la production en temps réel et d'évaluer en permanence les valeurs des variables de pilotage récupérées du terrain pour pouvoir intervenir si une variable est en dehors de sa valeur nominale et de son intervalle de tolérance. Dans ce cas, le décideur utilise la simulation pour trouver une valeur permettant de corriger le système. Pour cela, tous les événements survenus sont transmis au module qui réalise la fonction [*Analyser les événements critiques*] afin de sélectionner les événements déclencheurs de la simulation. Le principe retenu pour l'utilisation de cette simulation et l'initialisation du modèle sont mis en œuvre, comme nous l'avons expliqué dans les chapitres précédents. Le résultat de la simulation sera évalué par le décideur. La meilleure solution sera transférée et exécutée dans le système réel.

### III.6. Conclusion

Dans le premier chapitre de cette partie, nous avons discuté des différentes utilisations de la simulation *en ligne*. Nous avons essayé de distinguer quelques différences entre simulation *en ligne*, simulation *en temps réel*, simulation de type *Hardware In the Loop*, simulation *Look Ahead* et *Émulation*. Nous considérons qu'une simulation est *en ligne* quand les données provenant du système réel sont prises en compte par le modèle et quand ce modèle évolue en temps réel et se synchronise avec l'évolution réelle du système opérationnel. Après avoir étudié quelques travaux concernant de telles simulations, nous avons constaté qu'il existe très peu d'applications pratiques dans ce domaine par rapport aux travaux théoriques et que les difficultés d'intégration sur un cas réel sont rarement mises en avant.

De ce fait, nous avons proposé une modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide de la simulation en ligne. Nous avons montré les principales fonctions à remplir par ce type de pilotage sous le formalisme IDEF0. Nous avons décrit trois fonctions principales : la fonction *Observer*, la fonction *se Projeter* et la fonction *Décider*. Cette modélisation nous a permis de caractériser ces fonctions et de décrire les différentes utilisations de la simulation en ligne pour supporter ces fonctions comme la simulation *en temps réel*, la simulation *de projection* et la simulation *de correction*. Le processus de pilotage à l'aide de la simulation s'applique sur un intervalle de temps qui commence à la détection d'un événement critique sur le terrain jusqu'à la correction des valeurs des variables de pilotage qui doivent être mises à jour dans le processus opérationnel réel.

En parallèle, nous avons aussi étudié la chronologie des événements du processus de pilotage. Nous avons comparé différentes stratégies possibles d'utilisation de la simulation en ligne. Cette comparaison concerne l'utilisation de deux ou d'un seul modèle de simulation et la méthode d'initialisation du modèle sur un état unique ou sur des états successifs. Nous proposons d'utiliser plutôt la stratégie avec un seul modèle de simulation à la fois en temps réel et en temps accéléré avec initialisation sur un état unique. Un des avantages de cette stratégie est de simplifier le processus de pilotage, mais avec la difficulté de la reprise de la simulation en temps réel, après avoir corrigé le système réel.

En fin de cette partie, nous avons présenté une structure de pilotage en temps réel d'un système de production basé sur le couplage entre un outil de simulation en ligne à événements discrets et un système d'exécution des fabrications de type MES (Manufacturing Execution System) en spécifiant les besoins pour ce couplage.

## Références bibliographiques partie III

---

[**Banks et al., 2005**] Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L. Nelson et David M. Nicol, “Discrete-event system simulation”, International Fourth Edition, Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice-Hall, Inc, 2005.

[**Becker, 2005**] Martin Becker, “Interactive Simulation”, inSiDE review (Innovative Supercomputing in Deutschland), The German National Supercomputing Centres HLRS, LRZ, and NIC, Autumn 2005, Vol. 3, No. 2.

[**Bel et Kieffer, 2002**] G. Bel, J. P. Kieffer, “Pilotage assisté par la simulation discrète”, Hermès Science Europe Ltd (Ed.) : Méthodes du pilotage des systèmes de production, pp. 99-127, 2002.

[**Brandin et al., 1992**] B. Brandin, W. Wonham, et B. Benhabib, “Manufacturing Cell Supervisory Control - A Timed Discrete Event System Approach.” IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992, pp. 931-936.

[**Brennan, 2000**] R.W. Brennan, “Performance comparison and analysis of reactive and planning-based control architectures for manufacturing”, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, No. 16, 2000, pp. 191-200.

[**Cardin, 2007**] Olivier Cardin, “Apport de la simulation en-ligne dans l’aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production. Application à un système flexible de production.”, 2007, Thèse de doctorat de l’université de Nantes, France.

[**Castagna et al., 2001**] Pierre Castagne, Nasser Mebarki et Roland Gauduel, “La simulation, un outil d’aide au pilotage des systèmes de production. Exemple d’application.”, MOSIM’01, Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation, 2001, Troyes, France.

[**Davis, 1998**] Wayne J. Davis, “Handbook of Simulation. Online simulation : Need and evolving research requirements”, 1998, pp. 465-516.

[**Davis, 1999**] Wayne J. Davis, “Simulation : technologies in the new millenium.” 31<sup>st</sup>. Conference on Winter Simulation : Simulation – a bridge to the future. Phoenix : ACM Press, 1999, pp. 141-147.

[**Drake et Smith, 1996**] Glenn R. Drake et Jeffrey S. Smith, “Simulation system for real time planning, scheduling and control.” 28<sup>th</sup> Conference on Winter Simulation. Coronado : ACM Press, 1996, pp. 1083-1090.

[**Fowler et Rose, 2004**] John W. Fowler et Oliver Rose, “Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems”, SIMULATION, September 2004, Vol. 80, Issue 9, pp. 469-476.

[Gonzales et Davis, 1997a] Fernando G. Gonzalez et Wayne J. Davis, “A simulation based controller for distributed discrete-event systems with application to flexible manufacturing” 29<sup>th</sup> Conference on Winter Simulation. Atlanta : ACM Press, 1997, pp. 845-852.

[Gonzales et Davis, 1997b] Fernando G. Gonzalez et Wayne J. Davis, “A simulation-based controller for a flexible manufacturing cell”, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Orlando, FL, 1997, pp. 3642–3647.

[Gonzales et Davis, 1998] Fernando G. Gonzalez et Wayne J. Davis, “Initializing on-line simulations from the state of a distributed system.” 30<sup>th</sup> Conference on Winter Simulation. Washington, D.C.: IEEE Computer Society Press, 1998, pp. 507-513.

[Gupta et Sivakumar, 2005] Amit Kumar Gupta et Appa Iyer Sivakumar, “Conjunctive simulated scheduling.”, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 2005, Vol. 26, pp. 1409-1413.

[Hanisch *et al.*, 2003] André Hanisch, Juri Tolujew, Klaus Richter et Thomas Schulze, “Modeling people flow : Online simulation of pedestrian flow in public buildings”, 35<sup>th</sup> Conference on Winter Simulation : driving innovation. New Orleans: Winter Simulation Conference, 2003, pp. 1635-1641.

[Hanselmann, 1993] H. Hanselmann, “Hardware-in-the-Loop Simulation Development and Test of Electronic Control Units and Mechanical Components”, The RealTime Conference, January 13-15, 1993, Paris.

[Hanselmann, 1996] H. Hanselmann, “Hardware-In-the-Loop Simulation Testing and its Integration into a CACSD Toolset”, The IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, September 15-18, 1996, Dearborn, Michigan USA, 5 pages.

[Iassinovski *et al.*, 2007] Serguei Iassinovski, Abdelhakim Artiba et Christophe Fagnart, “A generic production rules-based system for on-line simulation, decision-making and discrete process control.”, International Journal of Production Economics, 2007.

[Katz *et al.*, 1993] D. Katz, S. Manivannan, “Exception Management on Shop Floor Using Online Simulation”. Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference, 1993, pp. 888-896.

[Kiffmeier, 1996] U. Kiffmeier, “A Hardware-In-the-Loop Testbench for ABS Controllers”, Conference on Control and Diagnostics in Automotive Applications, Genova, Italy, October 3-4, 1996.

[Kouiss et Pierreval, 1999] Khalid Kouiss et Henri Pierreval, “Implementating an on-line simulation in a flexible manufacturing system.”, ESS’99 Conference, Nuremberg, 1999, pp. 484-488.

[Kouiss et Najid, 2004] K. Kouiss, N. M. Najid, “Couplage MES-Simulation pour le pilotage d’un système de production”, 4<sup>e</sup> Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, MOSIM’04, 2004, Nantes, France.

[LeBaron et Hendrickson, 2000] H. Todd LeBaron, Ruth Ann Hendrickson, “Using emulation to validate a cluster tool simulation model”, Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000, pp. 1417-1422.

[**Le Moigne, 1974**] Jean-Louis Le Moigne, “Les systèmes de décision dans les organisations”, Presses Universitaires de France, Paris, 1974.

[**Le Moigne, 1993**] Jean-Louis Le Moigne, “La modélisation des systèmes complexes”, AFCET Systèmes, Dunod, Paris, 1993.

[**Leo et al., 2004**] J. De Vin Leo, H.C. Ng Amos et Jan. Oscarsson, “Simulation Based Decision Support for Manufacturing System Life Cycle Management”, Journal of Advanced Manufacturing Systems, December 2004, Vol. 3, No. 2, , pp. 115-12.

[**McGregor, 2002**] Ian McGregor, “The relationship between simulation and emulation”, Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002, pp. 1683-1688.

[**Manivannan et Banks, 1991**] S. Manivannan et J. Banks, “Real-Time Control of a Manufacturing Cell Using Knowledge-Based Simulation.”, In Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference, 1991, pp. 251-260.

[**Manivannan et Banks, 1992**] S. Manivannan et J. Banks, “Design of a Knowledge-Based On-Line Simulation System to Control a Manufacturing Shop Floor.” IIE Transactions, 1992, Vol. 24, No. 3, pp. 72-83.

[**Munteanu et al., 2006**] Iulian Munteanu, Joël Guiraud, Seddik Bacha, Daniel Roye et Antoneta Iuliana Bratcu, “Méthodologie de simulation temps réel « Hardware-In-the-Loop » Application aux systèmes éoliens”, 6<sup>e</sup> Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation/MOSIM’06, 3-5 avril, 2006, Rabat, Maroc, Modélisation-Optimisation et Simulation des Systèmes.

[**Peters et Smith, 1998**] Brett A. Peters, Jeffrey S. Smith, “Real-time, simulation-based shop floor control.”, ArenaSphere’98. Pittsburgh, 1998, pp. 188-194.

[**Pujo et al., 2004**] Patrick Pujo, Massimo Pedetti et Fouzia Ounnar, “Pilotage proactif des lignes de production kanban par modelisation DEVS et simulation temps-réel.”, 5<sup>e</sup> Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation, Modélisation et simulation pour l’analyse et l’optimisation des systèmes industriels et logistiques, MOSIM’04, Nantes, France, 2004, pp. 593-600.

[**Ramakrishnan et al., 2002**] Sreeram Ramakrishnan, Seungyub Lee, Richard A. Wysk., “Real-time control : implementation of a simulation-based control architecture for supply chain interactions.”, 34<sup>th</sup> Conference on Winter Simulation : exploring new frontiers, San Diego : Winter Simulation Conference, 2002, pp. 1667-1674.

[**Rogers et Flanagan, 1991**] P. Rogers et M.T.Flanagan, “On-line simulation for real time scheduling of manufacturing systems”, Industrial Engineering, 1991, Vol. 23, pp. 37-40.

[**Roy, 1985**] Bernard Roy, “Méthodologie multicritère d’aide à la décision”, Livre, Collection « Gestion », Paris, Economica 1985.

[**Smith et al., 1996**] J. Smith, B. Peters, J. Curry, G. Drake et C. La Jimodièrre, “Advanced Tutorial – Simulation-Based Scheduling and Control”, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, 1996, pp. 194-198.

[**Straßburger et al., 2005**] Steffen Straßburger, Thomas Schulze, Marco Memessi, Gordon D.Rehn, “Temporally parallel coupling of discrete simulation systems with virtual reality systems”, Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, 2005, pp. 1949-1957.

[**Tayanithi et al., 1992**] P. Tayanithi, S. Manivannan, J. Banks, “A knowledge-based simulation architecture to analyse interruptions in a flexible manufacturing system”, Journal of Manufacturing Systems, 1992, Vol. 11, No. 3, pp. 195-214.

[**Varady, 1999**] Varady M., “Dynamic Simulation Based Scheduling”, IPA, 1999, Slovakia.

[**Wu et Wysk, 1989**] Szu-Yung David Wu et Richard A. Wysk, “An application of discrete event simulation to on-line control and scheduling in flexible manufacturing.”, International Journal of Production Research, 1989, Vol. 27, No. 9, pp. 1603-1623.

[**Yoon et al., 2006**] Hyun Joong Yoon et Weiming Shen, “Simulation-Based Real-Time Decision-Making for Manufacturing Automation Systems”, International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2006, Vol. 8, Nos. 1/2/3, pp. 188-202.



# Partie IV

## IV. Démonstration de la faisabilité technique

---

### Sommaire détaillé de la partie IV

<b>IV. Démonstration de la faisabilité technique .....</b>	<b>129</b>
<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>131</b>
<b>IV.2. Présentation de la plateforme expérimentale .....</b>	<b>131</b>
IV.2.1. Caractéristiques générales.....	131
IV.2.2. Description de la partie opérative .....	131
IV.2.3. Description de la partie commande.....	134
IV.2.3.1. Commande bas niveau.....	134
IV.2.3.2. Commande de haut niveau.....	134
IV.2.4. Pilotage de la production par le produit .....	135
<b>IV.3. Construction du modèle de simulation hors ligne de la plateforme expérimentale .</b>	<b>141</b>
IV.3.1. Données réelles utiles à la modélisation .....	141
IV.3.2. Choix de l'outil de modélisation.....	143
IV.3.3. Modélisation des règles aux différents points de décision.....	144
IV.3.4. Résultats fournis par la simulation hors ligne.....	145
IV.3.5. Calibrage et validation du modèle de simulation hors ligne.....	145
<b>IV.4. Étude de la faisabilité technique pour réaliser des simulations en ligne.....</b>	<b>150</b>
IV.4.1. Simulation en temps réel et problème de l'initialisation du modèle.....	150
IV.4.2. Développement des fonctions techniques pour la simulation en ligne .	150
IV.4.3. Démonstration en vraie grandeur .....	153
<b>IV.5. Conclusion.....</b>	<b>153</b>



## IV.1. Introduction

Dans cette partie, l'objectif est de démontrer la faisabilité technique d'utiliser la simulation en ligne et en temps réel comme aide au pilotage d'un atelier. Pour cela, nous utiliserons une plateforme expérimentale comme processus opérationnel avec son système d'exécution (MES) et Witness (voir le site de Lanner : [www.lanner.com](http://www.lanner.com)), un logiciel du commerce comme simulateur de flux. L'essentiel de la démonstration porte sur la faisabilité de la simulation en ligne à partir d'un logiciel largement répandu dans les entreprises industrielles et non pas sur des développements spécifiques. Ce choix technique est avant tout destiné à proposer des solutions facilement transposables en situation réelle pour des industriels connaissant déjà un outil de simulation.

## IV.2. Présentation de la plateforme expérimentale

### IV.2.1. Caractéristiques générales

Cette plateforme expérimentale, qui correspond à un système réel, est constituée d'équipements industriels identiques à ceux que l'on peut rencontrer dans de nombreuses entreprises industrielles. Elle est capable de réaliser l'assemblage de produits comportant plusieurs variantes en réalisant des opérations sur plusieurs postes de travail, manuels ou automatisés, alimentés par un système de convoyage automatisé. Le flux physique est contrôlé, suivi et tracé grâce à des étiquettes RFID disposées sur des palettes servant de support aux produits à assembler. Tous les équipements automatisés sont commandés par des automates hétérogènes (Siemens et Omron) sur un même réseau de type Ethernet industriel.

Ce *plancher* de l'atelier est relié à un système d'exécution de la production (ou Manufacturing Execution System, MES), qui comporte un certain nombre de fonctions (supervision, lancement et suivi des ordres de fabrication, analyse des performances, traçabilité, etc.) permettant de faire le lien avec les *étages* supérieurs et notamment le traitement des commandes et la planification des ordres d'assemblage. Le système d'information comporte aussi une application internet de *e-commerce* permettant aux pseudo-clients de passer une commande en ligne. Le MES est déployé sur internet, ce qui permet un accès à distance à toutes ses fonctionnalités et en particulier au pilotage de cette ligne de production. De cette manière, il est possible d'accéder aux données de production archivées afin de les utiliser comme données expérimentales réelles pour, par exemple, valider des modèles. Une extension progressive vers les étages supérieurs (ERP, APS) est prévue, de même que l'intégration ou l'interopérabilité avec des outils spécifiques.

### IV.2.2. Description de la partie opérative

La partie opérative est une *ligne d'assemblage avec un système de transfert libre automatisé*. Les produits sont posés sur des palettes entraînées par des convoyeurs à accumulation. Trois fonctions principales sont réalisées :

- ***charger et décharger les produits sur des palettes***. Ces fonctions sont réalisées automatiquement et le transfert des palettes est fait sur un convoyeur appelé *Boucle de Chargement/Déchargement*,

- **acheminer les palettes** avec les produits en cours d'assemblage vers les différents postes de travail. Cette fonction est réalisée par un convoyeur appelé *Boucle Centrale*,
- **assembler les composants** sur les postes de travail. Ces postes de travail sont implantés en dérivation sur des convoyeurs. Les opérations d'assemblage peuvent être automatisées ou manuelles.

Le diagramme fonctionnel de la Figure IV.1 illustre les liaisons entre ces trois fonctions principales.

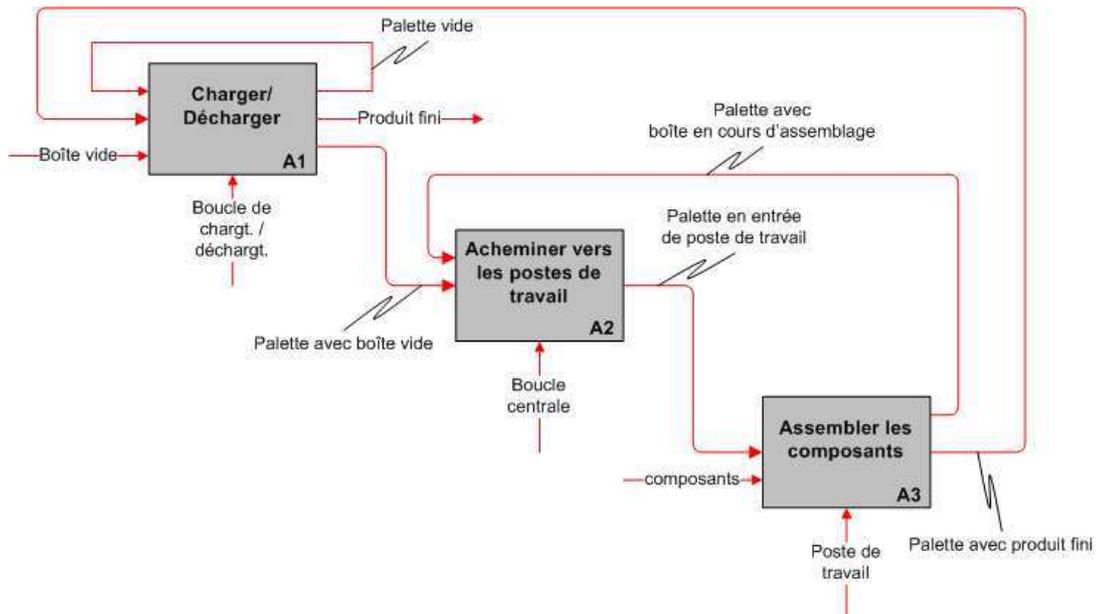


Figure IV.1 : fonctions principales de la partie opérative

Les opérations d'assemblage peuvent se dérouler sur un ou plusieurs des quatre postes de travail. Chaque poste dispose d'une zone d'accumulation des palettes en amont de l'opération afin de ne pas retenir les palettes sur la boucle centrale. De la même façon, une zone d'accumulation en aval du poste de travail permet de ne pas bloquer la palette en fin d'opération avant son retour sur la boucle centrale.

De nombreuses combinaisons de flux sont possibles et comportent, pour une palette :

- le chargement d'un composant *maître*,
- l'accès et la circulation sur la boucle centrale,
- la dérivation vers un ou plusieurs postes de travail en dérivation pour réaliser des opérations d'assemblage,
- éventuellement un rebouclage sur la boucle centrale afin de repasser sur certains postes ou d'accéder à ceux qui n'étaient pas disponibles lors d'un passage précédent.

Enfin, une fois que toutes les opérations ont été réalisées, la palette est dirigée vers la boucle de déchargement où le produit fini est déchargé.

La Figure IV.2 présente l'architecture matérielle du système de transfert des produits avec le repérage des postes et les opérations d'assemblage qui peuvent être réalisées.

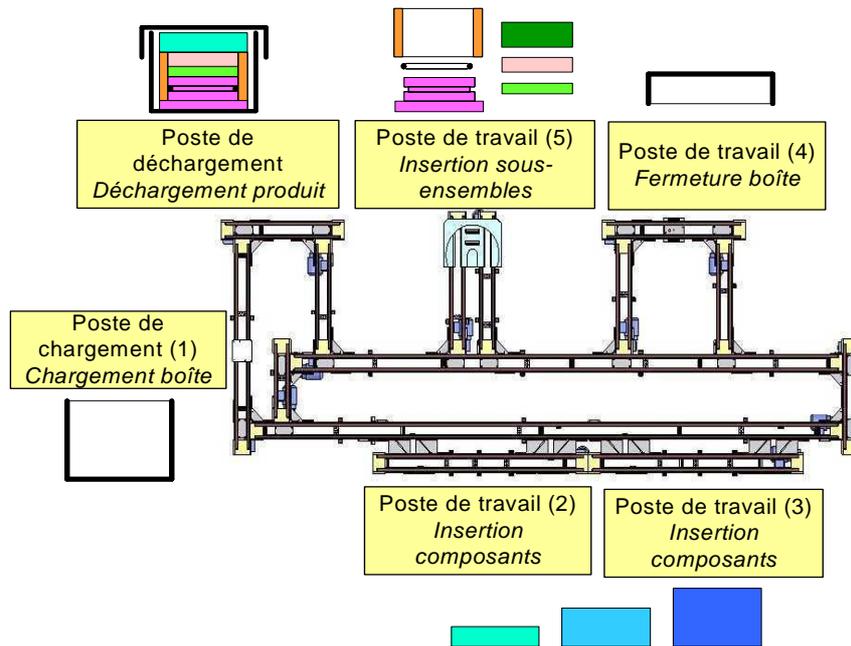


Figure IV.2 : architecture matérielle

La fonction [Assembler les composants] – [A3] peut être réalisée selon les postes de travail, soit par un manipulateur automatisé, soit par un opérateur. Actuellement, la ligne est configurée pour assembler des boîtes de différentes tailles, remplies avec différentes combinaisons de composants. La Figure IV.3 donne un exemple d'un produit assemblé. Sa gamme d'assemblage est décrite sur la Figure IV.4.

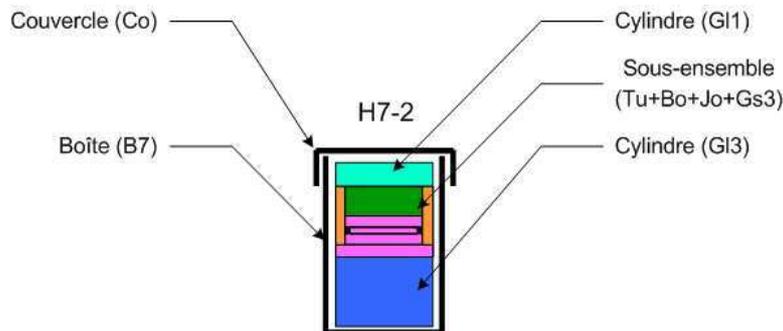


Figure IV.3 : exemple de produit fini (réf. H7-2) obtenu à l'issue du processus d'assemblage

Phase	Poste	Opérations
10	Chargement	Charger boîte B7 sur palette
20	P2 ou P3	Insérer 1 cylindre G13
30	P5	Insérer 1 sous-ensemble
40	P2 ou P3	Insérer 1 cylindre G1
50	P4	Fermer la boîte
60	Déchargement	Décharger le produit H7-2

Figure IV.4 : exemple de gamme d'assemblage

### IV.2.3. Description de la partie commande

#### IV.2.3.1. Commande bas niveau

L'architecture de commande au niveau « Contrôle Commande » est de type distribué. Cinq automates Siemens (CPU 315F-2PN/DP) assurent la commande de la ligne d'assemblage pour toutes les fonctions liées au transfert des palettes. Sur les postes où l'opération d'assemblage est automatisée, un automate est dédié spécifiquement à la commande du manipulateur. Tous les automates sont connectés sur un réseau Ethernet industriel sur lequel un ordinateur dispose d'un serveur OPC (Ole for Process Control). Le serveur OPC permet de mettre à disposition de clients OPC, locaux ou distants, l'ensemble des variables automate. Cet ordinateur est aussi connecté via internet à la commande de haut niveau. L'un des objectifs de cette plateforme expérimentale est de permettre son pilotage depuis un site distant, via internet. La commande de haut niveau est ainsi installée sur un autre site que celui du processus opérationnel et de la commande bas niveau. Il est à noter qu'une interruption momentanée de la liaison internet ne cause pas d'interruption de fonctionnement de la production car la commande de bas niveau dispose d'une autonomie lui permettant de commander les postes de travail. La Figure IV.5 illustre l'architecture générale du système d'information.

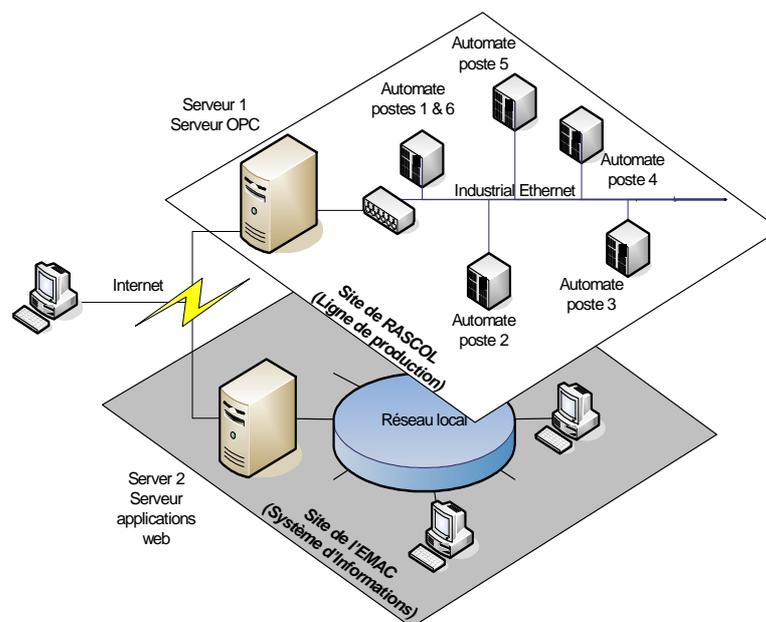


Figure IV.5 : architecture du système d'information

#### IV.2.3.2. Commande de haut niveau

La commande de haut niveau, implantée sur un site distant du site de production, comporte trois applications illustrées sur la Figure IV.6 :

- e-commerce, destinée à recueillir les commandes des clients,
- e-plan, permettant au gestionnaire de production de planifier les ordres de fabrication correspondant aux commandes des clients,
- e-MES, pour l'exécution et le suivi des ordres de fabrication.

Toutes ces applications sont accessibles via internet et e-MES permet de piloter à distance la ligne de production. Pour notre travail de recherche portant sur le pilotage à l'aide de la simulation de flux, cet outil d'aide à la décision est donc à intégrer dans la fonction [A3]-[Exécuter une commande], réalisée par l'application e-MES.

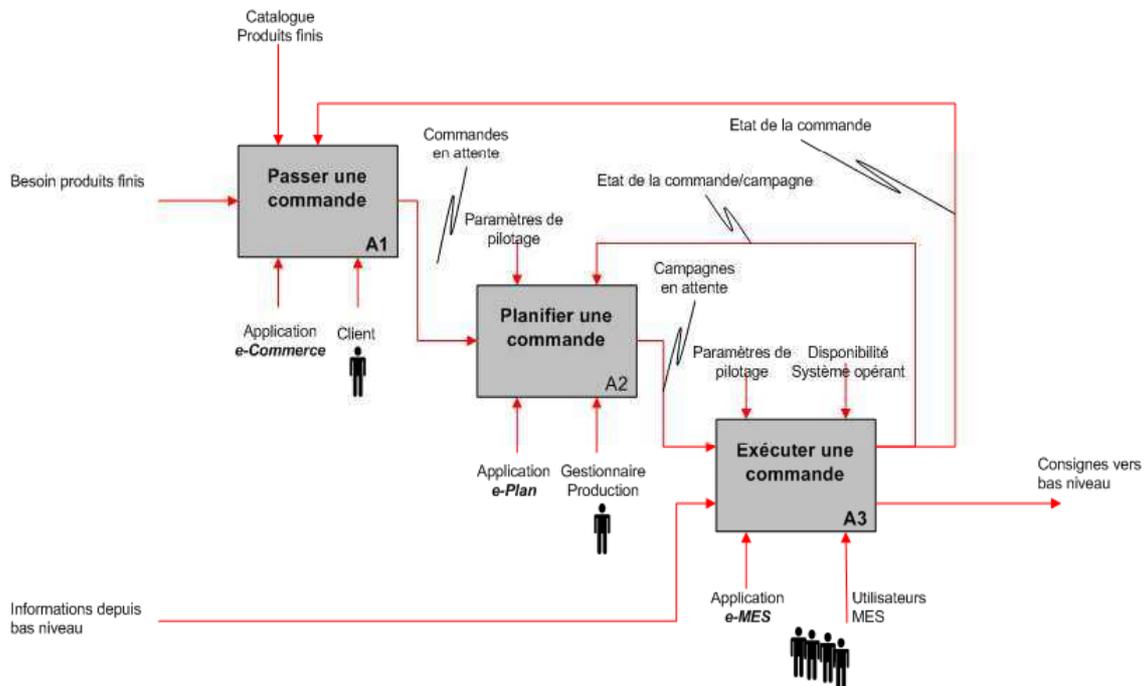


Figure IV.6 : architecture du système d'information

#### IV.2.4. Pilotage de la production par le produit

Chaque palette comporte une étiquette RFID dans laquelle sont stockées les données utiles au suivi des différentes phases et opérations. Chaque étiquette a une capacité de stockage de 752 octets. La structure générale est la suivante :

- les 32 premiers octets sont utilisés pour stocker les paramètres généraux (adresse 0 à 31),
- les octets suivants sont divisés en six groupes de 62 octets de l'adresse 32 à l'adresse 403. Chaque groupe de 62 octets contient les informations d'une phase de la gamme,
- les octets de l'adresse 404 à l'adresse 741 ne sont pas utilisés.

La Figure IV.7 illustre la structure d'une étiquette RFID pour les 32 premiers octets (adresses 0 à 31) qui correspondent aux paramètres généraux suivants :

- EPC : Electronic Product Code comprenant quatre groupes d'octets. Le premier groupe (1 octet) permet de définir l'en-tête. Le second groupe (4 octets) sert à coder la société. Le troisième groupe est utilisé pour coder le produit fini porté par la palette (3 octets). Le quatrième groupe (4 octets) correspond à un numéro de série, nombre compris entre 0 et 4,3 milliard, affecté automatiquement à chaque palette lancée et sert de clé de requête de la base de données (La saisie du numéro de série permet de retrouver tous les enregistrements correspondants). Ce numéro est incrémenté par la base de données.

- État : compris entre 1 et 5 (1 par défaut), permet de renseigner sur l'état de la palette:
  - ⇒ 1 = palette vide : mise à jour par l'automate Déchtg après le déchargement de la palette,
  - ⇒ 2 = production en cours : mis à jour par l'automate Déchtg après le chargement d'une boîte sur la palette.
  - ⇒ 3 = production terminée : mise à jour par l'automate Déchtg après la dérivation de la palette de la boucle centrale vers la ligne de déchargement,
  - ⇒ 4 = défaut sur le produit : mise à jour par l'un des automates d'opération ou par un opérateur en cas de problème lors d'une opération d'assemblage,
  - ⇒ 5 = non utilisé.
- Indice Phase suivante : compris entre 1 et 6 (1 par défaut). Incrémenté par l'automate de transfert correspondant au module où se trouve la palette dès qu'une opération est terminée. Permet de pointer sur la zone mémoire de l'étiquette décrivant la phase suivante (groupe de 62 octets) par l'expression (32 + 62 i) :
  - ⇒ 1 = Phase 10 (adresses 32 à 93)
  - ⇒ 2 = phase 20 (adresses 94 à 155)
  - ⇒ 3 = phase 30 (adresses 156 à 217)
  - ⇒ 4 = phase 40 (adresses 218 à 279)
  - ⇒ 5 = phase 50 (adresses 280 à 341)
  - ⇒ 6 = phase 60 (adresses 342 à 403)
- Nombre de bouclages : supérieur ou égal à 0 (0 par défaut). Incrémenté par l'automate de transfert Déchtg au niveau de la dérivation de retour vers la ligne de déchargement chaque fois qu'une palette fait un tour de la boucle centrale.
- Indice de priorité : compris entre 1 et 3 (1 par défaut), affecté par le gestionnaire au moment de l'intégration d'une ligne de commande dans une campagne. Utilisé pour gérer les priorités en sortie de poste en dérivation et éventuellement les accès aux postes.
  - ⇒ 1 = commande normale
  - ⇒ 2 = commande importante
  - ⇒ 3 = commande prioritaire
  - ⇒ Date de livraison : date demandée par le client au moment de la commande. Peut être utilisée pour gérer les priorités en sortie de poste en dérivation et éventuellement les accès au poste.
- N° de palette : identifiant compris entre 1 et 25 (nombre maximal de palettes disponibles).
- Les adresses 26 à 31 ne sont pas utilisées et laissées libres pour des développements ultérieurs.

	Désignation	Adresse	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
		Paramètres généraux	Electronic Product Code (entête = 1 octet, code société = 4 octets, code article = 3 octets, n° de série = 4 octets)	0						
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12	Etat (1, ..., 5)									
13										
14	Indice Phase suivante (1, ...,6)									
15										
16	Nombre de bouclages (0, 1, ...)									
17										
18	Indice de priorité (1, 2, ..., 5)									
19										
20										
21	Date de livraison (jj/mm/aaa et hh:mm:ss)									
22										
23										
24										
25										
26	N° palette (1 .....25)									
27										
28	non utilisé									
29										
30	non utilisé									
31										

Figure IV.7 : paramètres généraux du code d'une étiquette RFID

La Figure IV.8 illustre la structure d'une étiquette RFID pour le codage d'une phase. Les produits assemblés ne comportent pas plus de six phases d'assemblage. Les paramètres de chaque phase sont donc regroupés en six groupes de 62 octets entre les adresses 32 et 403. Le pointage sur le groupe de paramètres correspondant à une phase se fait par l'expression (32 + 62 i) où i correspond à l'indice de la phase suivante (dans les paramètres généraux à l'adresse 14). Chaque groupe de 62 octets comporte les paramètres suivants :

	Désignation	Adresse	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
		Phase 10	Poste (0, 1, ..., 7)	32						
33										
34										
Date et heure entrée dans le poste (jj/mm/aa et hh:mm:ss)	35									
	36									
	37									
	38									
	39									
	40									
Date et heure début phase (jj/mm/aa et hh:mm:ss)	41									
	42									
	43									
	44									
	45									
	46									
Date et heure fin phase (jj/mm/aa et hh:mm:ss)	47									
	48									
	49									
	50									
	51									
	52									
Nbre total de composants à assembler (1, 2, ...)	53									
	54									
Composant Galet G1	Quantité		54							
	N° d'ordre		55							
Composant Galet G2	Quantité		56							
	N° d'ordre		57							
Composant Galet G3	Quantité		58							
	N° d'ordre		59							
Composant Boîte B4	Quantité		60							
	N° d'ordre		61							
Composant Boîte B7	Quantité		62							
	N° d'ordre		63							
Composant Couverture Co	Quantité		64							
	N° d'ordre		65							
Composant Galet Gs1	Quantité		66							
	N° d'ordre		67							
Composant Galet Gs2	Quantité		68							
	N° d'ordre		69							
Composant Galet Gs3	Quantité		70							
	N° d'ordre		71							
Composant Tube Tu	Quantité		72							
	N° d'ordre		73							
Composant Bouchon Bo	Quantité	74								
	N° d'ordre	75								
Composant Joint Jo	Quantité	76								
	N° d'ordre	77								
non utilisé	Quantité	78								
	N° d'ordre	79								
non utilisé	Quantité	80								
	N° d'ordre	81								
non utilisé	Quantité	82								
	N° d'ordre	83								
non utilisé	Quantité	84								
	N° d'ordre	85								
Résultat Phase (1, ...10)	Quantité	86								
	N° d'ordre	87								
Identifiant opérateur	Quantité	88								
	N° d'ordre	89								
non utilisé	Quantité	90								
	N° d'ordre	91								
non utilisé	Quantité	92								
	N° d'ordre	93								

Figure IV.8 : structure de l'étiquette RFID pour le codage d'une phase

- Poste : Compris entre 0 et 7 (0 par défaut). Repère du poste où doit se dérouler la phase. Initialisé dans l'étiquette à partir de la gamme correspondant à l'ordre de fabrication (la gamme est en base de données).
  - ⇒ 0 = aucun poste
  - ⇒ 1 = poste de chargement
  - ⇒ 2 = poste 1
  - ⇒ 3 = poste 2
  - ⇒ 4 = poste 1 ou poste 2
  - ⇒ 5 = poste 3
  - ⇒ 6 = poste 4
  - ⇒ 7 = poste de déchargement
- Date et heure d'entrée dans le poste : mise à jour par l'automate de transfert de chaque poste chaque fois qu'une palette est dérivée vers le poste.
- Date et heure de début de phase : mise à jour par l'automate de transfert de chaque poste dès qu'une palette est arrêtée ou indexée sur le poste opératoire.
- Date et heure de fin de phase : mise à jour par l'automate de transfert de chaque poste dès qu'une palette est libérée du poste opératoire.
- Nombre total de composants à assembler : supérieur ou égal à 0 (0 par défaut). Initialisé dans l'étiquette à partir de la gamme correspondant à l'ordre de fabrication (la gamme est en base de données). Décrémenté par l'automate de transfert de chaque poste de travail (à zéro quand tous les composants sont assemblés).
- Composants : les adresses (54 + 62 i) à (85 + 62 i) où i correspond à l'indice de la phase permettant de définir le numéro d'ordre et la quantité à assembler pour chaque composants. Ces informations sont initialisées dans l'étiquette à partir de la gamme correspondant à l'ordre de fabrication (la gamme est en base de données (toutes les adresses sont à zéro par défaut) :
  - ⇒ Galet G11 : adresse (54 + 62 i) pour la quantité et adresse (55 + 62 i) pour le numéro d'ordre
  - ⇒ Galet G12 : adresse (56 + 62 i) pour la quantité et adresse (57 + 62 i) pour le numéro d'ordre
  - ⇒ Etc.... jusqu'à l'adresse (76 + 62 i) pour la quantité de Joint Jo et l'adresse (77 + 62 i) pour le numéro d'ordre. Les adresses (78 + 62 i) à (85 + 62 i) sont laissées libres.
- Résultat phase : compris entre 1 et 6 (1 par défaut). Mis à jour par l'automate de transfert ou l'opérateur (par l'intermédiaire de l'IHM) de chaque poste :
  - ⇒ 1 = OK (pas de défaut enregistré)
  - ⇒ 2 = défaut type 1 (manque composant à assembler)
  - ⇒ 3 = défaut type 2 (défaut phase antérieure)
  - ⇒ 4 = défaut type 3 (assemblage impossible)
  - ⇒ 5 = défaut type 4
  - ⇒ 6 = défaut type 5

Si la valeur de ce paramètre est différente de 1 alors le paramètre général « État » (adresse 12) passe à 4.
- Identifiant opérateur : compris entre 0 et 255 (0 par défaut). Chaque opérateur est affecté d'un repère (la table de correspondance est en base de données) :

- ⇒ 0 = pas d'opérateur (manipulateur)
- ⇒ 1 = Fred
- ⇒ 2 = Tom
- ⇒ 3 = Paulo
- ⇒ 4 = ...

La Figure IV.9 présente la règle d'accès d'une palette sur un poste de travail en dérivation.

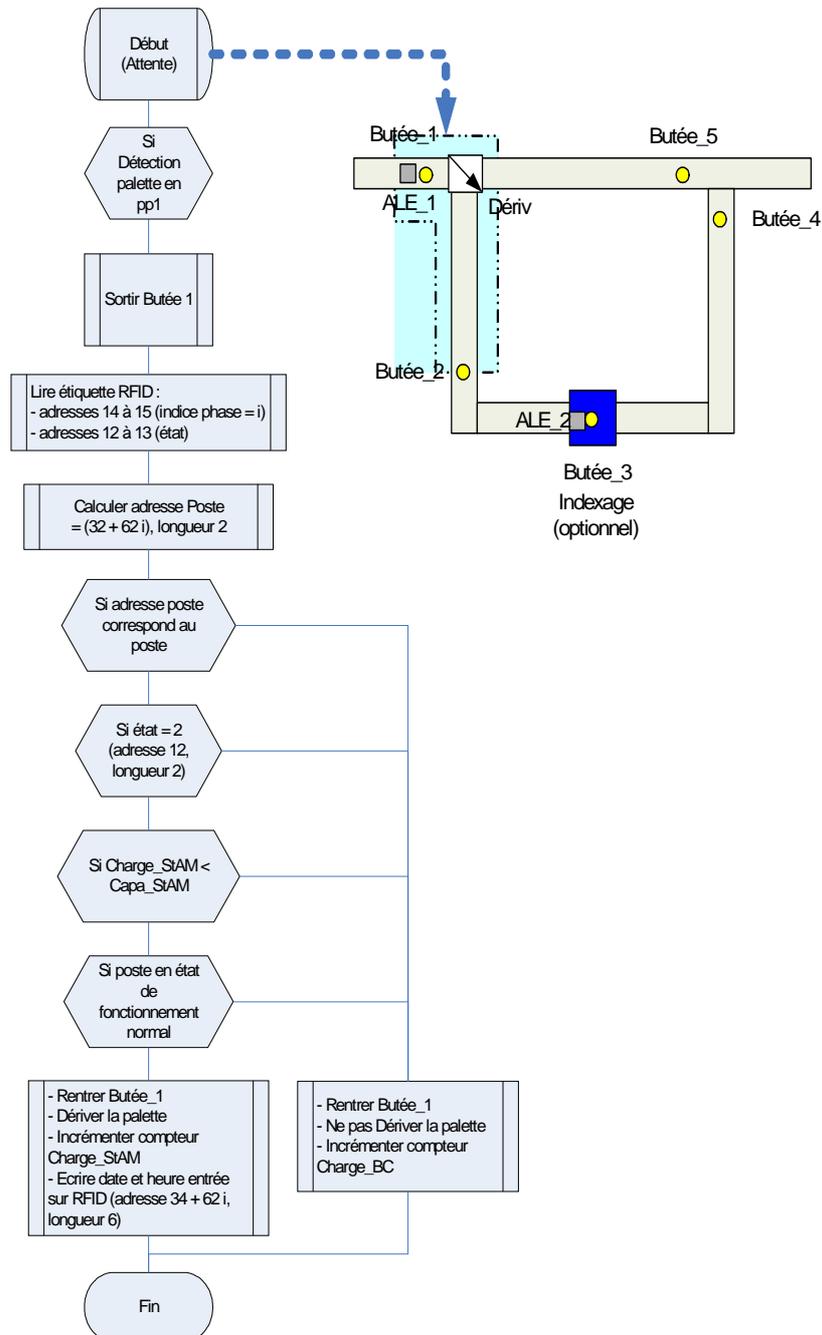


Figure IV.9 : règle d'accès sur un poste de travail en dérivation

La Figure III.10 illustre la règle de fonctionnement d'un poste de travail en dérivation.

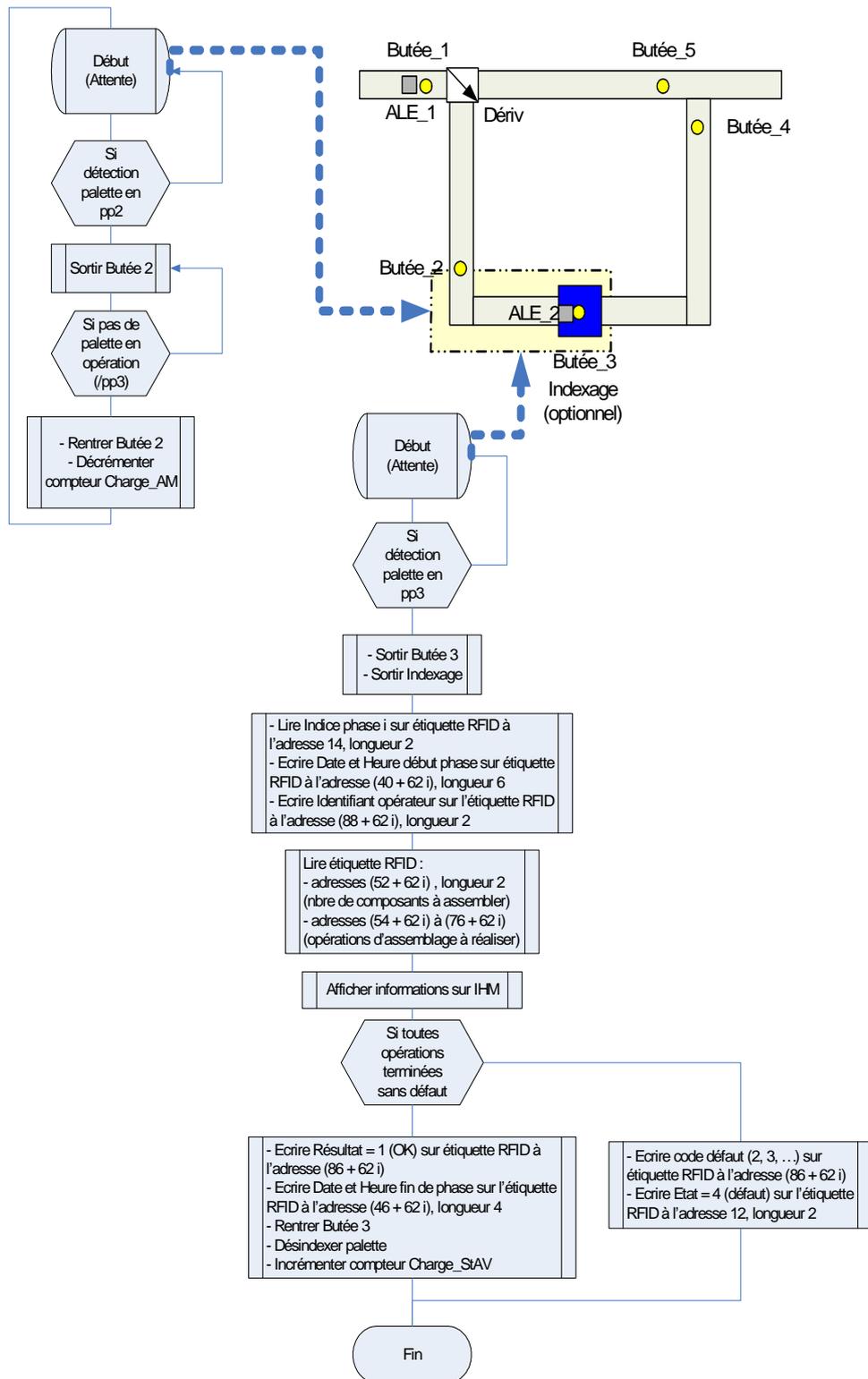


Figure IV.10 : règle de fonctionnement d'un poste en dérivation



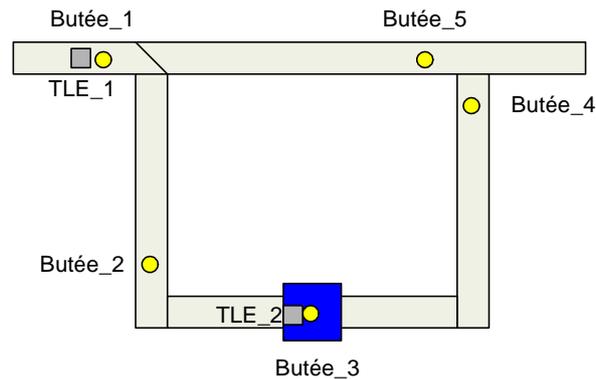


Figure IV.12 : emplacement des butées sur un poste de travail en dérivation

La butée 1 permet de gérer l'accès des palettes sur le poste de travail. La butée 2 est utilisée pour accumuler les palettes en amont de l'opération. La butée 3 sert à arrêter les palettes à l'endroit où se situe l'opération proprement dite. Les butées 4 et 5 permettent de gérer la priorité entre les palettes qui sortent du poste et celles qui circulent sur la boucle centrale.

Afin de détecter la présence d'une palette, un détecteur de proximité inductif est implanté au niveau de chaque butée. La photo de la Figure IV.13 illustre l'arrivée d'une palette sur une butée de priorité située sur la boucle centrale.

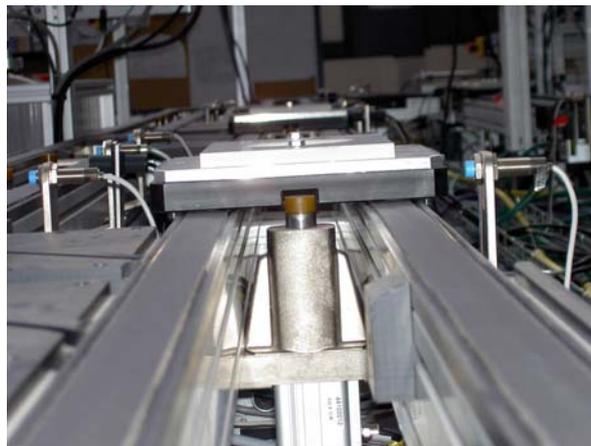


Figure IV.13 : photo de l'arrivée d'une palette sur une butée (sur le dessous) avec son détecteur (à droite)

Comme le montre aussi la Figure IV.12, des têtes de lecture/écriture (TLE) des étiquettes RFID sont implantées à certains points afin de lire des informations présentes dans l'étiquette pour permettre aux automates de prendre des décisions ou pour écrire des informations pour suivre en temps réel ou *a posteriori* l'avancement de chaque palette. La photo de la Figure IV.14 permet de voir l'arrivée d'une palette à l'entrée d'un poste en dérivation. La tête de lecture/écriture (TLE) est face à l'étiquette RFID de forme cylindrique située sur la tranche de la palette.



Figure IV.14 : photo de l'entrée d'un poste de travail avec au premier plan le détecteur (à droite) et la tête de lecture/écriture (TLE)

Il faut noter qu'entre deux détecteurs, il n'est donc pas possible de connaître la position précise d'une palette sur un convoyeur. De la même façon, les informations contenues dans l'étiquette RFID ne peuvent pas être lues ou écrites en continu, mais uniquement au niveau des têtes de lecture/écriture. Ces dernières remarques sont intéressantes vis-à-vis de la simulation en ligne, car les détecteurs et têtes de lecture/écriture pourront donc servir à synchroniser des événements réels (passage d'une palette devant un détecteur par exemple) avec des événements du modèle de simulation. La position des palettes sur les convoyeurs pourra donc être extrapolée sur le modèle de simulation, alors que cette information n'est pas disponible sur le système réel.

### IV.3.2. Choix de l'outil de modélisation

Pour cette expérimentation, nous avons choisi d'utiliser le progiciel Witness comme outil de modélisation et simulation. Witness est l'un des leaders du marché mondial des outils de simulation à événements discrets et c'est une des raisons de notre choix. En effet, il est certainement plus facile de convaincre des utilisateurs industriels de Witness de l'intérêt de notre travail de recherche en nous appuyant sur un outil qu'ils connaissent déjà. Par contre, comme nous le verrons plus loin, certaines fonctions nécessaires à la simulation en ligne et en temps réel ne sont pas disponibles sur Witness en standard puisque cet outil, comme la plupart des ses concurrents, est principalement utilisé en phase de conception d'un nouveau processus ou d'amélioration d'un processus existant. La société Lanner, qui développe Witness, nous a indiqué qu'il n'existait pas à ce jour d'application de simulation en ligne et en temps réel avec Witness, mais nous a confirmé son intérêt pour nos travaux. Nous avons ainsi pu bénéficier d'un outil de développement appelé SIMBA afin de réaliser les nouvelles fonctions dont nous avons besoin et de vérifier la faisabilité technique de nos travaux de recherche. Nous nous sommes limités à un développement très expérimental et démonstratif, sans chercher la performance du code.

La Figure IV.15 illustre une vue de la simulation du processus expérimental à un instant donné. On distingue les palettes qui se déplacent sur les différents convoyeurs. Pour permettre de suivre plus facilement les palettes qui sont toutes les mêmes, le numéro de palette inscrit dans l'étiquette RFID est affiché sur chaque palette du modèle de simulation.

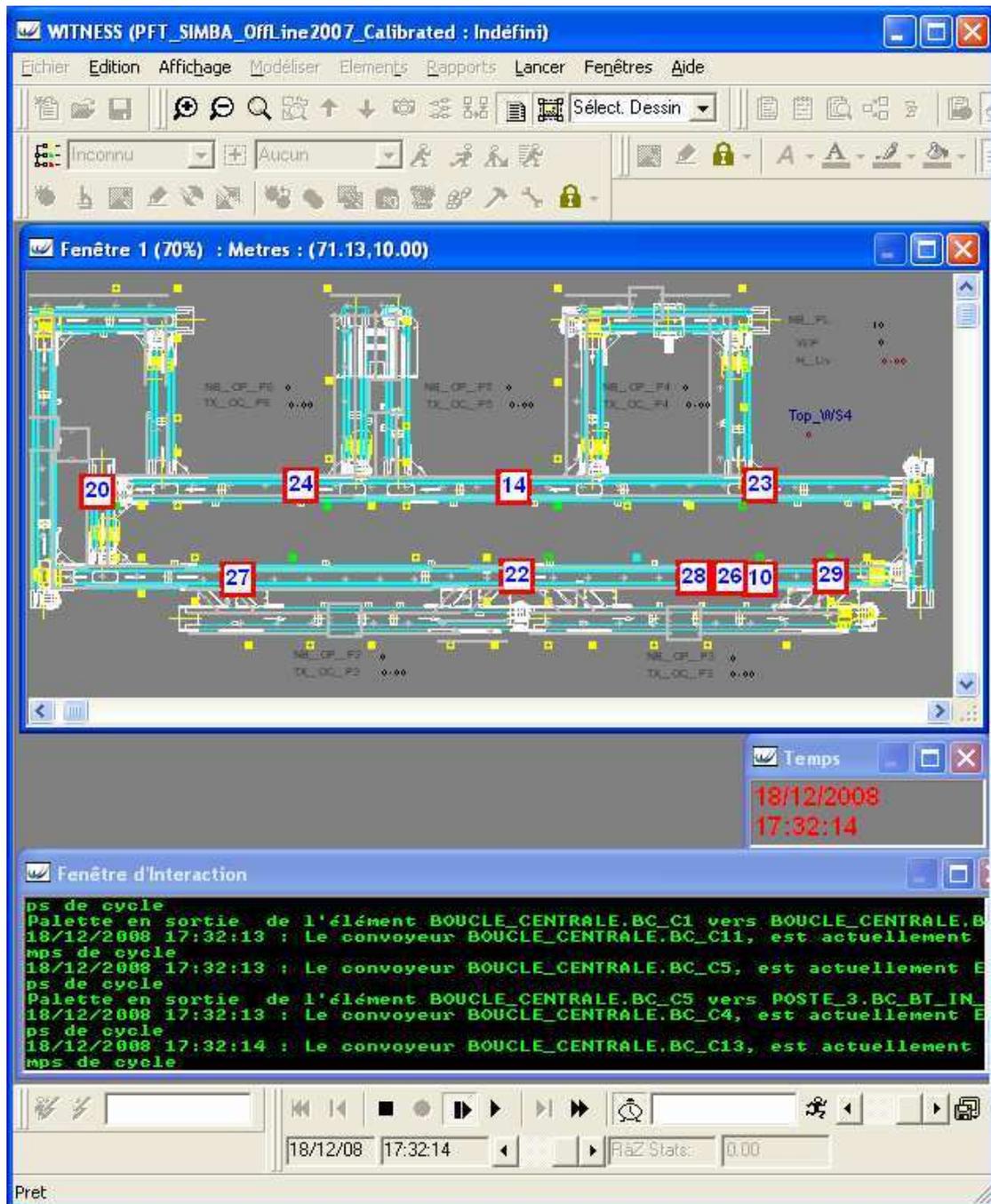


Figure IV.15 : vue de la simulation du processus expérimental avec Witness

Chaque palette est modélisée par un *article* dans Witness. Les informations contenues dans l'étiquette RFID sont modélisées par des *attributs*, comme c'est le cas pour le numéro de chaque palette.

### IV.3.3. Modélisation des règles aux différents points de décision

Le modèle de simulation doit reproduire le comportement du flux de palettes du processus opérationnel. Pour modéliser des règles comportant de la logique de décision, comme c'est par exemple le cas à l'entrée d'un poste de travail en dérivation pour décider si la palette doit être dérivée ou pas, il est nécessaire de programmer des lois de sortie des convoyeurs, comme celle présentée sur la Figure IV.16.



Figure IV.16 : modélisation de la règle d'accès d'une palette sur un poste de travail

La logique de décision prend en compte à la fois des données présentes sur les palettes sous la forme d'attributs (par exemple  $Code\_P3=1$  dans l'exemple de la Figure IV.16 est un attribut porté par la palette et indiquant qu'elle doit passer sur le poste 3), mais aussi des données indépendantes des palettes sous la forme de *variables* ou de *fonctions* (par exemple  $Nparts(P3\_C3) < CP\_ST\_AM\_P3$  permet de vérifier si la charge du stock amont est inférieure à la capacité fixée). La règle d'accès d'une palette sur un poste de travail, qui a été préalablement présentée sur l'organigramme de la Figure III.9, est donc modélisée avec Witness par le code présenté sur la Figure IV.16.

#### IV.3.4. Résultats fournis par la simulation hors ligne

A tout moment, pendant la simulation ou en fin de simulation, il est possible d'obtenir des statistiques sur les éléments du modèle. La Figure IV.17 montre un exemple de statistiques pour les machines modélisant les postes de travail. Ces résultats peuvent être aussi affichés sous la forme de graphiques.

Nom	LIGNE_DECH	LIGNE_Modul	POSTE_1	POSTE_2	POSTE_3	POSTE_4
%Disp.	0.00	84.09	100.00	8.39	77.34	74.93
%Cycle - Occ.	43.88	15.91	0.00	34.72	22.66	25.07
%Cycle - Remp.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
%Cycle - Vidange	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
%Arrêté - Bloqué	56.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
%Attente - Cycle	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
%Arrêté - réglage	0.00	0.00	0.00	56.89	0.00	0.00
%Attente - réglage	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
%Arrêté - panne	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
%Attente de répar.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nombre d'op.	27	11	35	24	7	13

Figure IV.17 : exemple de statistiques obtenues avec Witness

#### IV.3.5. Calibrage et validation du modèle de simulation hors ligne

En s'appuyant sur la simulation visuelle d'une part et sur les statistiques et indicateurs d'autre part, l'étape suivante consiste à valider le modèle afin que son comportement soit très proche du système réel. Pour y arriver, le fait de disposer du vrai processus opérationnel est

un avantage. En effet, en nous aidant d'un client OPC, nous avons pu collecter sur le système réel des données utiles à la mise au point de notre modèle de simulation. OPC est une interface logicielle standard qui permet à des programmes Windows de communiquer avec des équipements industriels tels que des automates programmables en utilisant le protocole réseau DCOM. OPC est implémenté non seulement dans un ordinateur serveur, mais aussi dans un ordinateur client. Le client OPC utilise le serveur OPC pour obtenir des données ou envoyer des commandes aux équipements.

La Figure III.18 illustre le dispositif mis en place pour collecter les données grâce à un serveur et un client OPC sur notre plateforme expérimentale.

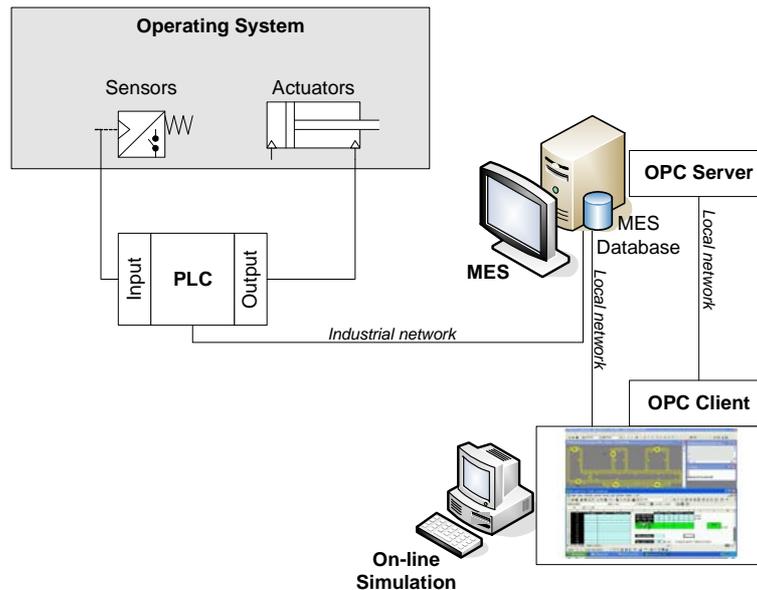


Figure IV.18 : dispositif d'acquisition de données par client et serveur OPC

Pour calibrer notre modèle de simulation, nous avons mis en circulation des palettes et enregistré, grâce à OPC, à chaque point de détection, l'heure de détection et le numéro de la palette. La Figure IV.19 montre un extrait des données collectées sur la boucle centrale de convoyage au niveau de l'entrée de la ligne de chargement (WS1-6), du poste de travail n° 2 (WS2), du poste de travail n° 3 (WS3) et du poste de travail n° 4 (WS4). L'enregistrement des données est réalisé sur une période suffisamment longue afin de disposer de plusieurs valeurs pour une même donnée. Dans l'extrait présenté, on peut distinguer plusieurs enregistrements de la détection d'une même palette à l'entrée de chaque poste. Par exemple, sur la ligne 2 du tableau suivant, la palette n° 22 est détectée à l'entrée du poste WS1-6 à 17:24:28, puis une nouvelle fois à 17:25:42 et ainsi de suite. Avec toutes ces valeurs, il est donc possible de faire des statistiques ou même de choisir des lois de probabilités aléatoires permettant de modéliser au mieux le comportement réel.

Heure	Événement	Heure	Événement	Heure	Événement	Heure	Événement
17:24:27	Détection palette entrée WS1-6	17:24:29	Détection palette entrée WS2	17:24:27	Détection palette entrée WS3	17:24:28	Détection palette entrée WS4
17:24:28	N° Palette entrée WS1-6 : 22	17:24:30	N° Palette entrée WS2 : 28	17:24:27	N° Palette entrée WS3 : 10	17:24:30	N° Palette entrée WS4 : 24
17:24:34	Détection palette entrée WS1-6	17:24:36	Détection palette entrée WS2	17:24:34	Détection palette entrée WS3	17:24:36	Détection palette entrée WS4
17:24:35	N° Palette entrée WS1-6 : 27	17:24:37	N° Palette entrée WS2 : 22	17:24:35	N° Palette entrée WS3 : 26	17:24:37	N° Palette entrée WS4 : 14
17:24:42	Détection palette entrée WS1-6	17:24:44	Détection palette entrée WS2	17:24:41	Détection palette entrée WS3	17:24:43	Détection palette entrée WS4
17:24:42	N° Palette entrée WS1-6 : 20	17:24:44	N° Palette entrée WS2 : 27	17:24:42	N° Palette entrée WS3 : 28	17:24:45	N° Palette entrée WS4 : 23
17:24:49	Détection palette entrée WS1-6	17:24:51	Détection palette entrée WS2	17:24:49	Détection palette entrée WS3	17:24:50	Détection palette entrée WS4
17:24:50	N° Palette entrée WS1-6 : 24	17:24:52	N° Palette entrée WS2 : 20	17:24:49	N° Palette entrée WS3 : 22	17:24:52	N° Palette entrée WS4 : 29
17:24:57	Détection palette entrée WS1-6	17:24:59	Détection palette entrée WS2	17:24:56	Détection palette entrée WS3	17:24:58	Détection palette entrée WS4
17:24:57	N° Palette entrée WS1-6 : 14	17:25:00	N° Palette entrée WS2 : 24	17:24:57	N° Palette entrée WS3 : 27	17:25:00	N° Palette entrée WS4 : 10
17:25:04	Détection palette entrée WS1-6	17:25:06	Détection palette entrée WS2	17:25:04	Détection palette entrée WS3	17:25:05	Détection palette entrée WS4
17:25:05	N° Palette entrée WS1-6 : 23	17:25:07	N° Palette entrée WS2 : 14	17:25:05	N° Palette entrée WS3 : 20	17:25:07	N° Palette entrée WS4 : 26
17:25:11	Détection palette entrée WS1-6	17:25:14	Détection palette entrée WS2	17:25:11	Détection palette entrée WS3	17:25:13	Détection palette entrée WS4
17:25:12	N° Palette entrée WS1-6 : 29	17:25:14	N° Palette entrée WS2 : 23	17:25:11	N° Palette entrée WS3 : 24	17:25:14	N° Palette entrée WS4 : 28
17:25:19	Détection palette entrée WS1-6	17:25:21	Détection palette entrée WS2	17:25:19	Détection palette entrée WS3	17:25:20	Détection palette entrée WS4
17:25:20	N° Palette entrée WS1-6 : 10	17:25:22	N° Palette entrée WS2 : 29	17:25:20	N° Palette entrée WS3 : 14	17:25:22	N° Palette entrée WS4 : 22
17:25:26	Détection palette entrée WS1-6	17:25:29	Détection palette entrée WS2	17:25:26	Détection palette entrée WS3	17:25:28	Détection palette entrée WS4
17:25:27	N° Palette entrée WS1-6 : 26	17:25:29	N° Palette entrée WS2 : 10	17:25:27	N° Palette entrée WS3 : 23	17:25:29	N° Palette entrée WS4 : 27
17:25:34	Détection palette entrée WS1-6	17:25:36	Détection palette entrée WS2	17:25:33	Détection palette entrée WS3	17:25:35	Détection palette entrée WS4
17:25:34	N° Palette entrée WS1-6 : 28	17:25:37	N° Palette entrée WS2 : 26	17:25:34	N° Palette entrée WS3 : 29	17:25:37	N° Palette entrée WS4 : 20
17:25:41	Détection palette entrée WS1-6	17:25:43	Détection palette entrée WS2	17:25:41	Détection palette entrée WS3	17:25:43	Détection palette entrée WS4
17:25:42	N° Palette entrée WS1-6 : 22	17:25:44	N° Palette entrée WS2 : 28	17:25:42	N° Palette entrée WS3 : 10	17:25:45	N° Palette entrée WS4 : 24
17:25:49	Détection palette entrée WS1-6	17:25:51	Détection palette entrée WS2	17:25:48	Détection palette entrée WS3	17:25:50	Détection palette entrée WS4
17:25:49	N° Palette entrée WS1-6 : 27	17:25:51	N° Palette entrée WS2 : 22	17:25:49	N° Palette entrée WS3 : 26	17:25:52	N° Palette entrée WS4 : 14
17:25:56	Détection palette entrée WS1-6	17:25:58	Détection palette entrée WS2	17:25:56	Détection palette entrée WS3	17:25:58	Détection palette entrée WS4
17:25:57	N° Palette entrée WS1-6 : 20	17:25:59	N° Palette entrée WS2 : 27	17:25:56	N° Palette entrée WS3 : 28	17:25:59	N° Palette entrée WS4 : 23
17:26:04	Détection palette entrée WS1-6	17:26:06	Détection palette entrée WS2	17:26:03	Détection palette entrée WS3	17:26:05	Détection palette entrée WS4
17:26:05	N° Palette entrée WS1-6 : 24	17:26:07	N° Palette entrée WS2 : 20	17:26:04	N° Palette entrée WS3 : 22	17:26:07	N° Palette entrée WS4 : 29
17:26:11	Détection palette entrée WS1-6	17:26:14	Détection palette entrée WS2	17:26:11	Détection palette entrée WS3	17:26:13	Détection palette entrée WS4
17:26:12	N° Palette entrée WS1-6 : 14	17:26:14	N° Palette entrée WS2 : 24	17:26:11	N° Palette entrée WS3 : 27	17:26:14	N° Palette entrée WS4 : 10
17:26:19	Détection palette entrée WS1-6	17:26:21	Détection palette entrée WS2	17:26:18	Détection palette entrée WS3	17:26:20	Détection palette entrée WS4
17:26:20	N° Palette entrée WS1-6 : 23	17:26:22	N° Palette entrée WS2 : 14	17:26:19	N° Palette entrée WS3 : 20	17:26:22	N° Palette entrée WS4 : 26
17:26:26	Détection palette entrée WS1-6	17:26:28	Détection palette entrée WS2	17:26:26	Détection palette entrée WS3	17:26:27	Détection palette entrée WS4
17:26:27	N° Palette entrée WS1-6 : 29	17:26:29	N° Palette entrée WS2 : 23	17:26:27	N° Palette entrée WS3 : 24	17:26:29	N° Palette entrée WS4 : 28
17:26:34	Détection palette entrée WS1-6	17:26:36	Détection palette entrée WS2	17:26:34	Détection palette entrée WS3	17:26:35	Détection palette entrée WS4

Figure IV.19 : acquisition de données sur le processus expérimental réel

Par exemple, pour calibrer le flux des palettes circulant sur la boucle centrale, nous avons prélevé des données correspondant à la détection des palettes à l'entrée du poste 4 (WS4). Pour un total de dix palettes en circulation, la Figure IV.20 montre les données collectées (numéro de palette et heure de détection), qui vont servir à calibrer le modèle de simulation.

<b>17:30:06</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 26</b>
17:30:11	Détection palette entrée WS4
<b>17:30:13</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 28</b>
17:30:19	Détection palette entrée WS4
<b>17:30:20</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 22</b>
17:30:26	Détection palette entrée WS4
<b>17:30:28</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 27</b>
17:30:34	Détection palette entrée WS4
<b>17:30:35</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 20</b>
17:30:41	Détection palette entrée WS4
<b>17:30:43</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 24</b>
17:30:49	Détection palette entrée WS4
<b>17:30:51</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 14</b>
17:30:56	Détection palette entrée WS4
<b>17:30:58</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 23</b>
17:31:04	Détection palette entrée WS4
<b>17:31:05</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 29</b>
17:31:11	Détection palette entrée WS4
<b>17:31:13</b>	<b>N° Palette entrée WS4 : 10</b>

Echantillon de palettes pour calibrage du modèle

Figure IV.20 : exemple de données collectées pour le calibrage du modèle

Pour cela, nous avons introduit dans le modèle, à l'entrée du poste 4, des palettes dont l'attribut Num\_PL correspond au numéro de chaque palette. Comme le montre la Figure IV.21, les palettes arrivent dans le modèle aux heures correspondant aux heures de détection sur le processus réel.

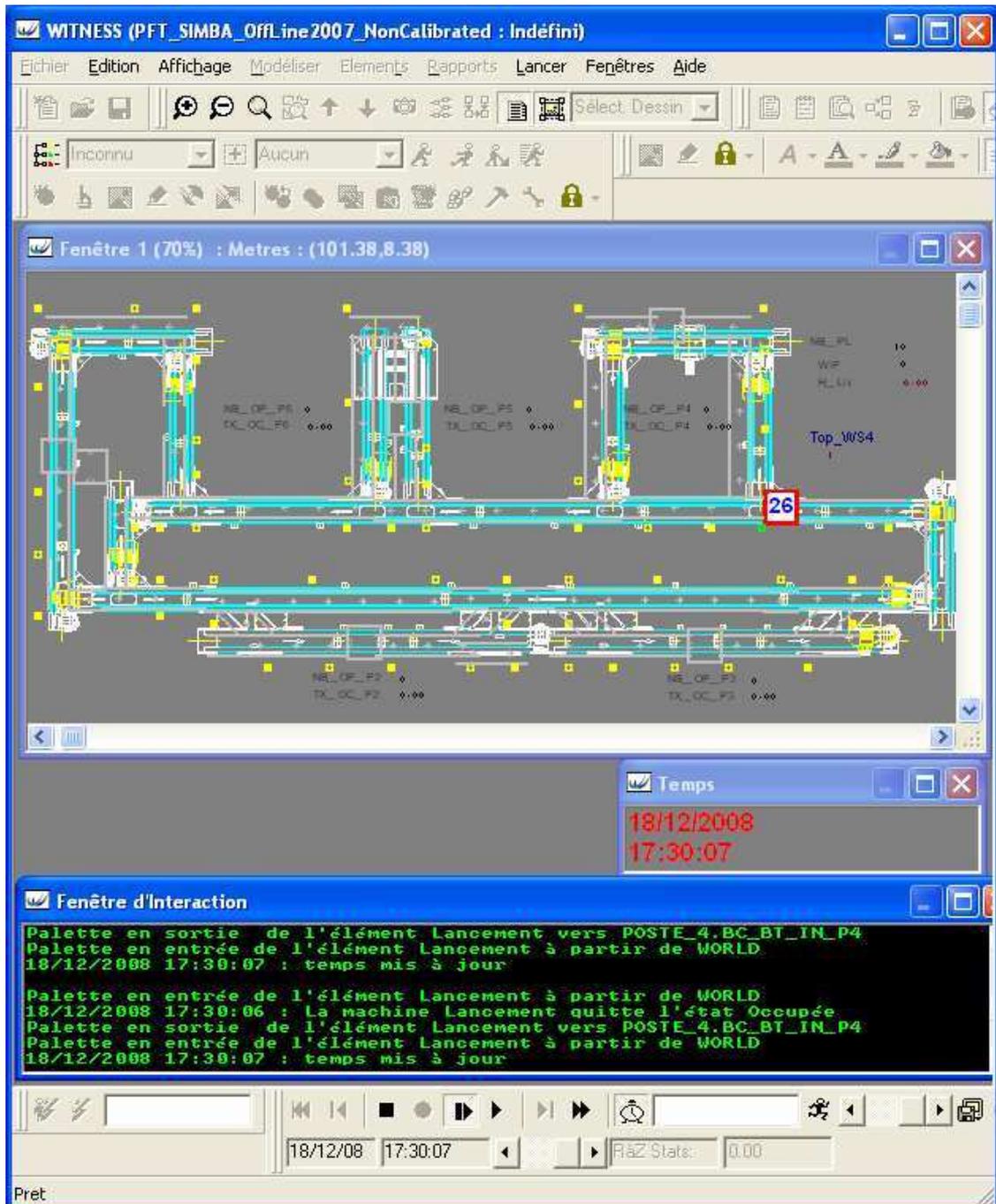


Figure IV.21 : introduction des palettes dans le modèle

Une fois que les palettes sont toutes introduites dans le modèle et sont en circulation sur les différents convoyeurs, le calibrage du modèle consiste à essayer de s'approcher au plus près des valeurs collectées sur le processus réel aux différents points de détection.

La Figure IV.22 illustre un exemple de comparaison entre les données collectées sur le processus réel et les mêmes données enregistrées par la simulation. On peut voir sur cet exemple, pris en régime nominal d'une simulation, qu'au niveau de la détection à l'entrée du poste 4, la simulation présente un retard qui semble augmenter au fil des passages. Par exemple, la palette n° 26 (ligne 1) est détectée sur le processus réel à 17:33:50 alors qu'avec la simulation, cette même palette est détectée à 17:34:02, soit 12 secondes de retard. On peut

voir aussi que d'autres données ont été utilisées, telles que le temps inter-arrivée entre deux palettes (TIA) à l'entrée du poste de travail. La comparaison de cette dernière donnée montre qu'il n'y a pas d'écart significatif entre la valeur réelle et la valeur simulée, ce qui permet de mener une analyse sur les raisons de l'écart sur les temps de détection.

Heure	Événement	Heure simul	N°	Ecart simul/réel	TIA réel	TIA simul
17:33:50	<b>N°Palette entrée WS4 : 26</b>	17:34:02	22	0:00:12	00:00:08	00:00:08
17:33:55	Détection palette entrée WS4					
17:33:57	<b>N°Palette entrée WS4 : 28</b>	17:34:10	23	0:00:13	00:00:07	00:00:08
17:34:03	Détection palette entrée WS4					
17:34:05	<b>N°Palette entrée WS4 : 22</b>	17:34:18	24	0:00:13	00:00:08	00:00:08
17:34:10	Détection palette entrée WS4					
17:34:12	<b>N°Palette entrée WS4 : 27</b>	17:34:26	25	0:00:14	00:00:07	00:00:08
17:34:18	Détection palette entrée WS4					
17:34:20	<b>N°Palette entrée WS4 : 20</b>	17:34:34	26	0:00:14	00:00:08	00:00:08
17:34:25	Détection palette entrée WS4					
17:34:27	<b>N°Palette entrée WS4 : 24</b>	17:34:42	27	0:00:15	00:00:07	00:00:08
17:34:33	Détection palette entrée WS4					
17:34:35	<b>N°Palette entrée WS4 : 14</b>	17:34:50	28	0:00:15	00:00:08	00:00:08
17:34:40	Détection palette entrée WS4					
17:34:42	<b>N°Palette entrée WS4 : 23</b>	17:34:58	29	0:00:16	00:00:07	00:00:08
17:34:48	Détection palette entrée WS4					
17:34:50	<b>N°Palette entrée WS4 : 29</b>	17:35:07	30	0:00:17	00:00:08	00:00:08
17:34:55	Détection palette entrée WS4					
17:34:57	<b>N°Palette entrée WS4 : 10</b>	17:35:15	31	0:00:18	00:00:07	00:00:08

Figure IV.22 : exemple de comparaison données réelles / données simulées

Pour minimiser les écarts entre les données réelles et simulées, il est possible d'agir sur plusieurs variables, comme par exemple les temps d'arrêt sur les butées et la vitesse de déplacement des convoyeurs. Ces variables peuvent prendre des valeurs fixes ou aléatoires suivant des lois de distribution mathématique à choisir. Les données collectées sur le système réel permettent de modéliser plus précisément la variabilité de certains phénomènes. C'est ainsi que le temps de cycle des convoyeurs, après analyse d'un échantillon de données significatives, a été modélisé par une distribution équiprobable comprise entre 0,805 et 0,8088 secondes. La Figure IV.23 illustre par exemple le résultat obtenu après calibrage pour les heures de passage des palettes à l'entrée du poste 4. Les écarts mettent en évidence que le comportement du modèle est satisfaisant sur cette portion de convoyeurs, puisqu'il n'y a pas plus d'une seconde d'écart entre les heures de passage de palettes sur le processus réel et sur son modèle de simulation. L'ensemble du modèle de simulation hors ligne a été calibré en suivant la même méthode.

Heure	Événement	Heure simul	N°	Ecart simul/réel	TIA réel	TIA simul
17:33:50	<b>N°Palette entrée WS4 : 26</b>	17:33:49	22	0:00:01	00:00:08	00:00:07
17:33:55	Détection palette entrée WS4					
17:33:57	<b>N°Palette entrée WS4 : 28</b>	17:33:57	23	0:00:00	00:00:07	00:00:08
17:34:03	Détection palette entrée WS4					
17:34:05	<b>N°Palette entrée WS4 : 22</b>	17:34:04	24	0:00:01	00:00:08	00:00:07
17:34:10	Détection palette entrée WS4					
17:34:12	<b>N°Palette entrée WS4 : 27</b>	17:34:12	25	0:00:00	00:00:07	00:00:07
17:34:18	Détection palette entrée WS4					
17:34:20	<b>N°Palette entrée WS4 : 20</b>	17:34:20	26	0:00:00	00:00:08	00:00:08
17:34:25	Détection palette entrée WS4					
17:34:27	<b>N°Palette entrée WS4 : 24</b>	17:34:27	27	0:00:00	00:00:07	00:00:07
17:34:33	Détection palette entrée WS4					
17:34:35	<b>N°Palette entrée WS4 : 14</b>	17:34:34	28	0:00:01	00:00:08	00:00:07
17:34:40	Détection palette entrée WS4					
17:34:42	<b>N°Palette entrée WS4 : 23</b>	17:34:42	29	0:00:00	00:00:07	00:00:08
17:34:48	Détection palette entrée WS4					
17:34:50	<b>N°Palette entrée WS4 : 29</b>	17:34:50	30	0:00:00	00:00:08	00:00:07
17:34:55	Détection palette entrée WS4					
17:34:57	<b>N°Palette entrée WS4 : 10</b>	17:34:57	31	0:00:00	00:00:07	00:00:07

Figure IV.23 : résultat après calibrage

## IV.4. Étude de la faisabilité technique pour réaliser des simulations en ligne

Dans ce paragraphe, l'objectif est d'utiliser le modèle de simulation précédemment créé et calibré hors ligne, mais pour l'utiliser en ligne, c'est-à-dire connecté au processus réel. Alors que dans la simulation hors ligne les palettes sont introduites dans le modèle à des instants prédéfinis, dans la simulation en ligne les palettes doivent être introduites uniquement sur l'apparition d'un événement réel identique. En reprenant le même exemple que celui développé précédemment, quand une palette est détectée à l'entrée du poste 4 du processus réel, son *clone virtuel* doit donc simultanément être introduit dans le modèle de simulation au même endroit, au même instant et avec les attributs affectés des valeurs prélevées dans l'étiquette RFID.

### IV.4.1. Simulation en temps réel et problème de l'initialisation du modèle

La simulation en temps réel signifie qu'elle se déroule dans la base de temps universel, alors qu'habituellement, une simulation utilise une base de temps plus rapide. Comme cela a été expliqué dans la partie III, la simulation en temps réel doit à chaque instant être une image (ou une vidéo si l'on considère un défilement d'images) du processus réel. Avec Witness, on peut régler l'avancement de l'horloge de simulation en fixant un rapport entre le temps universel et le temps simulé et en exécutant la simulation suivant ce rapport de temps. Pour que la simulation avance en temps réel, nous avons donc réglé le rapport de temps à 1.

En dehors de la synchronisation de l'horloge de simulation avec le temps universel, deux autres problèmes majeurs restent à résoudre : introduire les palettes dans le modèle et forcer l'état des différents éléments à partir de l'apparition d'événements réels. La résolution de ces deux problèmes doit permettre notamment d'initialiser le modèle de simulation en ligne, c'est-à-dire l'amener dans un état proche du processus réel le plus rapidement possible à partir d'informations provenant du processus réel et non pas, comme cela est fait en simulation hors ligne, à l'issue d'une période dite de *warm-up*. En effet, pour que les événements du modèle de simulation soient à un instant donné synchronisés avec les mêmes événements du processus réel, il est très peu probable que la montée en régime par une période de *warm-up* soit efficace. Même si le modèle de simulation est parfaitement calibré, le risque est donc très important d'avoir un fonctionnement décalé alors que le but recherché est d'avoir un fonctionnement synchrone.

### IV.4.2. Développement des fonctions techniques pour la simulation en ligne

Comme indiqué précédemment, Witness, ainsi que tous les autres outils de simulation du commerce, ne dispose pas en standard de fonction permettant de faire de la simulation en ligne. Nous avons donc utilisé SIMBA qui permet de développer des applications à base de simulation (*SIMulation Based Applications*) avec Witness. Le noyau de SIMBA est composé d'un modèle objet (API) construit en utilisant la technologie *COM* de *Microsoft* pour les plateformes *Windows*. Pour ce faire, SIMBA est utilisé comme une application serveur pendant que la simulation avec Witness est considérée comme une application cliente. Dans ce cas, le modèle Witness doit permettre l'accès à son modèle objet. Une version spéciale de Witness appelée OME (*Object Model Enabled*) doit donc être utilisée mais elle ne présente, en apparence, aucune différence avec la version normale.

La Figure IV.24 schématise les différents outils utilisés pour réaliser la simulation en ligne. Dans cette partie, nous allons présenter rapidement l'application qui a été développée

en Visual Basic pour démontrer la faisabilité de notre travail de recherche. Comme le montre ce schéma, nous avons intégré dans cette application à la fois un client OPC destiné à récupérer les événements apparaissant sur le processus réel et aussi un client SIMBA, afin de contrôler le simulateur Witness.

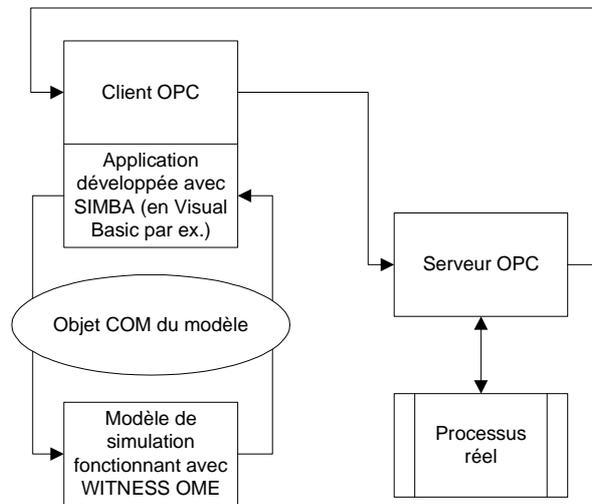


Figure IV.24 : outils utilisés pour la simulation en ligne

La Figure IV.25 montre trois exemples de code pour résoudre le premier problème évoqué plus haut consistant à introduire des articles dans un modèle.

```

1- Introduction d'un article Part_1 dans la machine Mach00
Intro_Article = Mach00.AddPart(Part_1)

2- Introduction d'un article Part_1 sur un convoyeur Conv02 à la position 3
Intro_Article = Conv02.AddPart(Part_1, 3)

3- Introduction d'un article Part_1 dans un stock stock St002 de la position 1 à la position 3
For num_article = 1 To 3
    Intro_Article = St002.AddPart(Part_1)
Next

```

Figure IV.25 : code SIMBA pour introduire des articles dans le modèle

La Figure IV.26 montre comment forcer une machine dans des états donnés pour résoudre le second problème posé par la simulation en ligne.

```

Force une machine dans un état « en panne »
Machine.ForcedStoppage

Force une machine dans un état « disponible »
Machine.ForcedResume

```

Figure IV.26 : code SIMBA pour forcer l'état d'une machine

La Figure IV.27 présente quant à elle la totalité d'une procédure écrite en Visual Basic destinée à introduire une palette dans le modèle à l'entrée d'un poste de travail à chaque fois qu'une palette est détectée sur le processus réel.

```
'This sub is used to create a new pallet in the simulation at the position
'corresponding to the last event (Pallet #) detected on the real system
'The first parameter NumPal is given by the RFID tag on the pallet
'The second parameter corresponds to the number of the workstation where the event occurs
Private Sub CreatePallet1(ByVal NumPal As Object, ByVal WorkStation As Object)

    Dim Action_Text As String
    Dim Intro_Article As Boolean

    nbpal = nbpal + 1

    If nbpal <= TextBox6.Text Then

        'Affect the Witness name of the article to the SIMBA part object
        Palette = My_App.Model.Elements("Palette")

        'Create an instance of the article
        UnePalette = Palette.CreateInstance

        'Affect the Witness name of the module to the Simba elements object
        MonModule = My_App.Model.Elements("POSTE_" + CStr(WorkStation))

        'Affect the Witness name of the conveyor (included in the previous module)
        'to the Simba elements object
        MonConvoyeur = MonModule.Elements("BC_BT_IN_P" + CStr(WorkStation))

        'This string is copied in the Witness "Actions on Join" of the previous conveyor
        'in order to affect the number of the pallet to the Witness attribute Num_PL
        Action_Text = "NUM_PL=" + CStr(NumPal)
        MonConvoyeur.ActionsOnJoin = Action_Text

        'Create an article "Palette" with the attribute NUM_PL
        'at the pos 1 of the conveyor
        Intro_Article = MonConvoyeur.AddPart(UnePalette, 1)

        'Delete the action on join
        Action_Text = ""
        MonConvoyeur.ActionsOnJoin = Action_Text

    End If

End Sub
```

Figure IV.27 : exemple de code SIMBA pour introduire une palette dans le modèle de simulation

La Figure IV.28 présente les codes SIMBA permettant de contrôler l'exécution de la simulation.

```
Initialise la simulation du modèle my_model à t = 0
my_model.Begin

Lance la simulation jusqu'à t= 1500
my_model.Run (1500)

Arrête la simulation
my_model.Stop
```

Figure IV.28 : contrôle de l'exécution de la simulation

### IV.4.3. Démonstration en vraie grandeur

La Figure IV.29 présente une copie d'écran sur laquelle on distingue (en haut à droite) l'image du processus réel fournit par une webcam en temps réel et au dessous, le modèle de simulation en ligne. On peut voir qu'à cet instant, la palette n° 8 est détectée à l'entrée du poste 4 sur le processus réel et qu'au même moment, une palette est introduite au même endroit dans le modèle. La vue située en haut à gauche correspond au client OPC avec l'affichage de différents événements utilisés par la simulation en ligne.

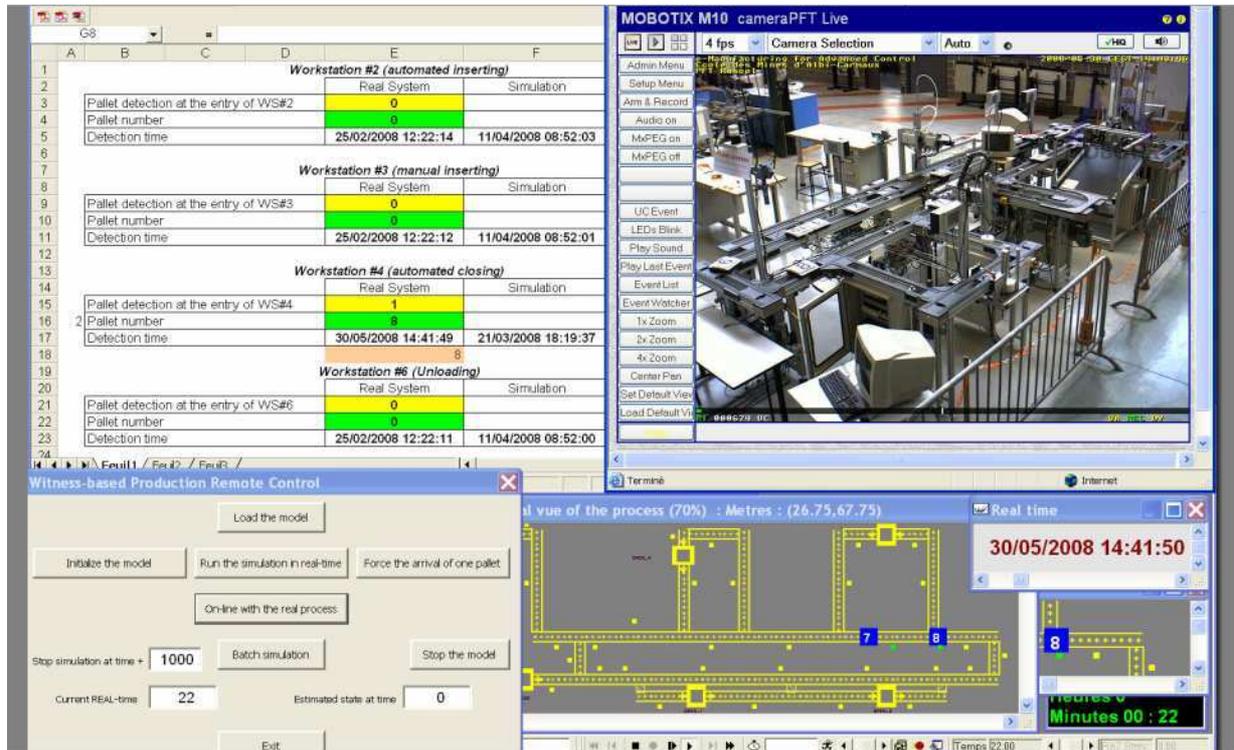


Figure IV.29 : aperçu d'une simulation en temps réel (détection de la palette n° 8 à l'entrée du poste 4 et introduction de cette même palette dans le modèle de simulation)

## IV.5. Conclusion

Dans cette partie, nous avons démontré la faisabilité technique de solutions destinées à réaliser des simulations en ligne. Afin de permettre un transfert technologique vers le monde industriel, nous avons délibérément choisi de nous appuyer sur Witness, un logiciel de simulation de flux du commerce parmi les plus utilisés dans les entreprises. Comme la plupart de ses concurrents, Witness est un simulateur destiné avant tout à être utilisé hors ligne, c'est-à-dire sans aucune connexion avec un processus réel. Il a donc fallu développer des prototypes de fonctions complémentaires permettant non seulement d'être connecté à des données provenant d'un processus réel, mais aussi de déclencher des événements dans la simulation en fonction d'événements réels.

Pour la connexion au processus réel, nous nous sommes appuyé sur OPC, un standard d'échange de données bien connu dans le monde des automatismes. Grâce à OPC, il est possible d'accéder en temps réel aux variables des automates assurant la commande de bas niveau et d'utiliser ces variables dans une application Microsoft Windows.

Pour synchroniser les événements du simulateur avec les événements réels, nous avons utilisé SIMBA, un outil de développement complémentaire à Witness.

Toujours dans le but de faciliter le transfert vers l'industrie, nous nous sommes appuyé sur une plateforme expérimentale de production semblable à ce que l'on peut rencontrer dans des entreprises. Cette plateforme est constituée de convoyeurs automatisés permettant de transférer des palettes portant les produits en cours d'assemblage vers différents postes de travail.

Dans notre démarche, nous avons tout d'abord construit un modèle de simulation hors ligne de la plateforme expérimentale. Afin de garantir les résultats fournis par la simulation, nous avons calibré ce modèle à partir de données collectées sur le processus réel grâce à OPC. Nous avons ensuite développé un prototype d'application permettant d'utiliser ce même modèle, mais en ligne, en introduisant des palettes non pas suivant une loi d'arrivée prédéfinie, mais suivant des événements réels tels que la détection d'une palette à l'entrée d'un poste de travail. Après une période de montée en régime correspondant à l'introduction successive dans la simulation des différentes palettes en circulation sur la plateforme expérimentale, la simulation en ligne et en temps réel atteint un état identique à celui du processus réel. A partir de cet instant, on peut considérer que la simulation en ligne est initialisée, ce qui signifie que son comportement est synchrone avec celui du processus réel. Nos travaux expérimentaux se sont limités à démontrer la faisabilité technique de la simulation en ligne et en temps réel correspondant à la fonction [A1]-[Observer] de notre proposition de modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide de la simulation (voir la partie III). La réalisation technique des fonctions [A2]-[Se projeter] pour la simulation de projection et [A3]-[Décider] pour la simulation de correction n'a pas été abordée, mais le développement présenté pour la fonction [Observer] permet de démontrer la faisabilité de leur réalisation.





## Conclusions et perspectives

---

Les travaux réalisés dans ce travail de recherche ont permis de présenter une modélisation d'un processus de pilotage d'atelier de production en temps réel à l'aide de la simulation de flux. L'intérêt d'un tel support pour le pilotage est d'avoir un outil d'aide à la décision par rapport à des événements se produisant en temps réel et sur leur conséquence sur un horizon à très court terme.

Dans ce but, nous avons présenté le contexte général du pilotage des systèmes de production en expliquant les différentes fonctions génériques, les évolutions des systèmes de production et des modes de pilotage et les évolutions des ateliers de production en comparant leur architecture. Nous avons distingué les différents types de pilotage selon l'origine des perturbations pouvant survenir et selon la période temporelle prise en compte dans la production. Les pilotages prédictif et proactif sont appliqués au niveau de la préparation d'un lancement de la production, alors que les pilotages réactif et correctif sont appliqués durant l'exploitation ou l'exécution. Nous avons expliqué notamment comment un pilotage en temps réel et réactif doit réagir durant la fabrication face aux événements critiques.

Nous avons étudié quelques logiciels existants dans l'industrie, comme la supervision et l'ordonnancement, et leurs fonctionnalités pour le pilotage d'une unité de production. Cependant, quand ces outils sont utilisés dans la conduite ou le pilotage en temps réel, ils nécessitent des fonctionnalités plus complexes pour les traitements événementiels. Partant des outils utilisés dans l'industrie pour le pilotage et l'aide à la décision, nous avons choisi de coupler un système d'exécution des fabrications (MES) et un simulateur à événement discret.

Nous avons tout d'abord proposé une démarche complémentaire de deux approches analytique et simulateur afin de chercher des règles de pilotage et de dimensionner un atelier de production manufacturier. La simulation a été utilisée dans son usage le plus courant, c'est-à-dire *hors ligne*, sans connexion avec un processus réel. Nous nous sommes appuyés sur un cas d'étude d'un atelier de type job shop pour illustrer cette démarche. La résolution analytique nous a permis de cibler très rapidement des populations de solutions proches de l'optimum. Les difficultés de la modélisation analytique se situent dans la phase de modélisation, puisque le problème doit être décrit par un système d'équations. Ensuite, l'utilisation de la simulation a permis non seulement de vérifier les résultats fournis par la résolution analytique, mais aussi d'apporter des informations complémentaires en tenant compte de la dynamique des flux et pas seulement des capacités statiques. Par ailleurs, la simulation permet de prendre en compte des phénomènes aléatoires, ce qui montre la robustesse du modèle proposé en variant les cas d'utilisation.

Pour le pilotage en temps réel, nous avons choisi d'utiliser la simulation à événement discret, mais cette fois *en ligne*. Nous avons mis en évidence la nécessité de disposer d'une base de données permettant de collecter les informations provenant du terrain. Ceci peut être réalisé en utilisant la base de données du MES ou le standard de communication OPC. Afin de se projeter dans le futur proche pour évaluer les conséquences d'événements, nous avons

donc choisi d'utiliser un logiciel de simulation. L'application de la simulation en ligne permet aussi d'analyser et de comparer plusieurs scénarios pour corriger les variables de pilotage du système de production dans le cas où des événements tels que l'apparition d'une panne, l'arrivée d'une commande urgente, etc. provoqueraient des écarts par rapport aux objectifs fixés.

Après un état de l'art sur la simulation *en ligne*, la simulation *en temps réel*, la simulation de type *Hardware In the Loop*, la simulation *Look Ahead* et l'*émulation*, nous avons proposé une modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide de la simulation en ligne. Nous avons proposé les trois fonctions principales qui permettent de décrire le processus de pilotage : la fonction *Observer*, la fonction *se Projeter* et la fonction *Décider*. Cette modélisation nous a permis de caractériser ces fonctions et de décrire les différentes utilisations de la simulation en ligne pour supporter ces fonctions comme la simulation *en temps réel*, la simulation *de projection* et la simulation *de correction*. Le processus de pilotage à l'aide de la simulation s'applique sur un intervalle de temps qui commence à la détection d'un événement critique sur le terrain jusqu'à la correction des valeurs des variables de pilotage à mettre à jour dans le processus opérationnel réel.

Nous avons aussi étudié la chronologie des événements du processus de pilotage. Cela nous a permis de comparer les différentes stratégies possibles d'utilisation de la simulation en ligne. Nous avons comparé la stratégie d'utilisation de deux modèles de simulation avec une stratégie utilisant un seul modèle. Nous avons aussi présenté une méthode d'initialisation du modèle sur un état unique ou sur des états successifs. Nous proposons d'utiliser plutôt la stratégie avec un seul modèle de simulation, à la fois en temps réel et en temps accéléré avec initialisation sur un état unique. L'avantage le plus important de l'application d'une telle stratégie est de simplifier le processus de pilotage, mais elle présente une difficulté pour la reprise de la simulation en temps réel, après avoir corrigé le système réel. Parmi les perspectives, nous pensons que ces stratégies liées à l'utilisation d'un ou de deux modèles sont intéressantes à développer.

Nous avons proposé une architecture pour le pilotage en temps réel d'un système de production. Ce pilotage est basé sur le couplage entre un outil de simulation en ligne à événements discrets et un système d'exécution des fabrications de type MES en spécifiant les besoins pour ce couplage. Nous avons démontré la faisabilité technique de solutions pour la réalisation de la simulation en ligne en nous appuyant sur une plateforme expérimentale de production qui est constituée de convoyeurs automatisés permettant de transférer des palettes portant les produits en cours d'assemblage vers différents postes de travail. Pour cela, nous avons choisi de nous appuyer sur le logiciel de simulation de flux Witness. L'outil de développement complémentaire à Witness, appelé SIMBA, nous a permis de synchroniser les événements réels avec le simulateur. Pour obtenir une connexion avec le processus réel, nous nous avons utilisé un client OPC, un standard d'échange de données afin d'accéder en temps réel aux variables des automates. Ces travaux se limitent à la réalisation de la fonction [Observer] de notre proposition de modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide de la simulation. Dans les perspectives, cette expérimentation peut se poursuivre pour démontrer la faisabilité technique de la fonction [Se projeter] pour la simulation de projection et la fonction [Décider] pour la simulation de correction.

## Table des illustrations

Figure I.1 : cible et trajectoire .....	10
Figure I.2 : décomposition classique d'un système en trois sous-systèmes.....	12
Figure I.3 : fonction générale du pilotage dans la production.....	17
Figure I.4 : le positionnement des structures de pilotage.....	27
Figure I.5 : exemple de carte de contrôle pour la durée opératoire d'une machine .....	30
Figure I.6 : exemple de carte de contrôle pour un stock .....	30
Figure I.7 : différents pilotages selon la période de lancement en exploitation.....	31
Figure II.1 : comparaison des outils informatiques utilisés pour établir le lien entre la conception de produits et l'exploitation dans l'industrie d'après [Klingstam, 1999] .....	37
Figure II.2 : positionnement des outils de gestion industrielle .....	38
Figure II.3 : positionnement de la supervision et du pilotage par rapport aux principales fonctions .....	40
Figure II.4 : positionnement du MES dans l'entreprise .....	45
Figure II.5 : échange des informations entre le système contrôle-commande, le système d'informations de l'entreprise et le décideur grâce au système d'exécution de la fabrication ou MES .....	47
Figure II.6 : modèle opérationnel de la S95 (ORDINAL Technologies, d'après ANSI/ISA- S95) .....	48
Figure II.7: classification en fonction de la polyvalence et de la facilité d'utilisation [Pidd, 2004].....	51
Figure II.8 : répartition des applications de simulation en fonction de la phase du cycle de vie du processus .....	55
Figure II.9 : différentes gammes pour les deux pièces.....	62
Figure II.10 : présentation de la démarche combinée .....	63
Figure II.11 : processus détaillé de complémentarité par les résolutions statiques, séquencement et dynamique.....	64
Figure II.12 : exemple de programmation du problème sous LINGO .....	66
Figure II.13: un tableur pour générer le séquencement.....	67
Figure II.14 : niveaux des encours dans une simulation déterministe à horizon fini.....	69
Figure II.15 : niveaux des encours dans une simulation à horizon infini.....	69
Figure II.16 : niveaux des encours dans simulation stochastique à horizon infini.....	70
Figure III.1: principe d'utilisation de la simulation de type Hardware In the Loop d'après [Munteanu et al., 2006] .....	80
Figure III.2: principe d'utilisation d'une simulation de type « Hardware in the loop » .....	82
Figure III.3 : principe général d'une émulation .....	82
Figure III.4 : les connexions entre les différents outils d'après [Peters et Smith, 1998] .....	84

Figure III.5 : relation entre le processus de pilotage atelier en temps réel et le processus opérationnel et support de la simulation en ligne.....	88
Figure III.6 : échange des données en temps réel entre le processus opérationnel et le processus de pilotage.....	90
Figure III.7 : obtention de trois types de données pour présenter l’image actuelle de la production sur une demande périodique ou événementielle .....	90
Figure III.8 : modèle d’atelier simple de production .....	91
Figure III.9 : besoin d’informations complètes de tous les équipements.....	91
Figure III.10 : fonction principale [Piloter un atelier en temps réel] .....	92
Figure III.11 : modélisation niveau [A0] du processus de pilotage .....	93
Figure III.12 : données utilisables dans un modèle.....	95
Figure III.13 : modélisation niveau [A1] de la fonction [Observer] .....	96
Figure III.14 : exemple de la synchronisation sur le positionnement d’une palette.....	99
Figure III.15 : analyse fonctionnelle interne en utilisant la méthode FAST .....	100
Figure III.16 : le fonctionnement dans le processus [Observer] .....	101
Figure III.17 : décomposition de la fonction [se Projeter]au niveau [A2].....	103
Figure III.18 : différencier les événements survenant au cours de la production .....	104
Figure III.19 : les actions à réaliser après identification d’événement déclencheur et simulation de projection .....	105
Figure III.20 : décomposition de la fonction [Décider] et support de la simulation de correction.....	107
Figure III.21 : le processus de pilotage d’atelier en temps réel avec les trois principales fonctions remplies par la simulation en ligne.....	110
Figure III.22 : chronogramme de l’utilisation conjointe d’un observateur et d’un simulateur proactif selon l’application de [Cardin, 2007]- stratégie d’initialisation sur un état unique .....	111
Figure III.23 : chronogramme d’utilisation de deux modèles de simulation-stratégie d’initialisation sur des états successifs .....	113
Figure III.24 : chronogramme d’utilisation d’un seul modèle de simulation en mode temps réel et en mode accéléré pour la projection et la correction-stratégie d’initialisation sur un état unique .....	114
Figure III.25 : chronogramme présentant le problème de reprise de la simulation en temps réel suite à l’application de la stratégie d’utilisation d’un seul modèle de simulation.....	116
Figure III.26 : couplage entre MES et simulation en ligne .....	117
Figure III.27 : un système de simulation en ligne pour la planification, l’ordonnancement et le suivi [Drake et Smith, 1996] .....	118
Figure III.28 : architecture de fonctionnement [Kouiss et Najid, 2004] .....	119
Figure III.29 : informations provenant du processus opérationnel à appliquer au processus de pilotage .....	120
Figure III.30 : architecture de couplage Simulation-MES .....	121
Figure IV.1 : fonctions principales de la partie opérative .....	132
Figure IV.2 : architecture matérielle .....	133
Figure IV.3 : exemple de produit fini (réf. H7-2) obtenu à l’issue du processus d’assemblage .....	133
Figure IV.4 : exemple de gamme d’assemblage.....	133
Figure IV.5 : architecture du système d’information.....	134
Figure IV.6 : architecture du système d’information.....	135
Figure IV.7 : paramètres généraux du code d’une étiquette RFID .....	137
Figure IV.8 : structure de l’étiquette RFID pour le codage d’une phase .....	137
Figure IV.9 : règle d’accès sur un poste de travail en dérivation .....	139

Figure IV.10 : règle de fonctionnement d'un poste en dérivation .....	140
Figure IV.11 : plan côté de l'ensemble du système expérimental .....	141
Figure IV.12 : emplacement des butées sur un poste de travail en dérivation .....	142
Figure IV.13 : photo de l'arrivée d'une palette sur une butée (sur le dessous) avec son détecteur (à droite) .....	142
Figure IV.14 : photo de l'entrée d'un poste de travail avec au premier plan le détecteur (à droite) et la tête de lecture/écriture (TLE).....	143
Figure IV.15 : vue de la simulation du processus expérimental avec Witness .....	144
Figure IV.16 : modélisation de la règle d'accès d'une palette sur un poste de travail.....	145
Figure IV.17 : exemple de statistiques obtenues avec Witness.....	145
Figure IV.18 : dispositif d'acquisition de données par client et serveur OPC.....	146
Figure IV.19 : acquisition de données sur le processus expérimental réel .....	147
Figure IV.20 : exemple de données collectées pour le calibrage du modèle .....	147
Figure IV.21 : introduction des palettes dans le modèle .....	148
Figure IV.22 : exemple de comparaison données réelles / données simulées.....	149
Figure IV.23 : résultat après calibrage .....	149
Figure IV.24 : outils utilisés pour la simulation en ligne .....	151
Figure IV.25 : code SIMBA pour introduire des articles dans le modèle .....	151
Figure IV.26 : code SIMBA pour forcer l'état d'une machine .....	151
Figure IV.27 : exemple de code SIMBA pour introduire une palette dans le modèle de simulation .....	152
Figure IV.28 : contrôle de l'exécution de la simulation .....	152
Figure IV.29 : aperçu d'une simulation en temps réel (détection de la palette n° 8 à l'entrée du poste 4 et introduction de cette même palette dans le modèle de simulation) .....	153



# Table des matières de la thèse

<b>Introduction et problématique.....</b>	<b>1</b>
<b>I. Pilotage des systèmes de production .....</b>	<b>7</b>
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>9</b>
<b>I.2. Pilotage d'un système.....</b>	<b>9</b>
<b>I.3. Pilotage des systèmes industriels.....</b>	<b>11</b>
<b>I.4. Fonctions génériques du pilotage de la production .....</b>	<b>14</b>
I.4.1. Planification .....	15
I.4.2. Programmation.....	15
I.4.3. Ordonnancement ou séquençement .....	15
I.4.4. Conduite .....	16
I.4.5. Commande .....	16
<b>I.5. Finalités des systèmes de pilotage de la production .....</b>	<b>18</b>
I.5.1. Répondre à la demande client .....	18
I.5.2. Fournir aux ateliers des conditions de travail satisfaisantes .....	18
I.5.3. Donner à l'entreprise les moyens financiers qui lui sont nécessaires .....	19
<b>I.6. Évolution des systèmes de production et de leurs objectifs .....</b>	<b>19</b>
I.6.1. Modèle de « production de masse ».....	19
I.6.2. Modèle de « production au plus juste » .....	20
I.6.3. Modèle de « production personnalisée » .....	21
<b>I.7. Flexibilité et réactivité.....</b>	<b>22</b>
<b>I.8. Typologie des structures de pilotage.....</b>	<b>24</b>
I.8.1. Structure centralisée.....	24
I.8.2. Structure hiérarchisée.....	25
I.8.3. Structure coordonnée .....	25
I.8.4. Structure distribuée .....	26
I.8.5. Structure distribuée supervisée .....	26
I.8.6. Structure décentralisée .....	26
<b>I.9. Structure retenue par la suite .....</b>	<b>26</b>
<b>I.10. Typologie du pilotage selon l'origine de perturbation et selon la période de lancement .....</b>	<b>28</b>
I.10.1. Pilotage prédictif.....	28
I.10.2. Pilotage proactif.....	28
I.10.3. Pilotage réactif ou pilotage en temps réel .....	29
I.10.4. Pilotage correctif.....	30
<b>I.11. Conclusion.....</b>	<b>31</b>

<b>II. Les outils d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier</b> .....	<b>35</b>
<b>II.1. Introduction</b> .....	<b>37</b>
<b>II.2. Les progiciels existants pour le pilotage d'une unité de production</b> .....	<b>37</b>
II.2.1. Supervision .....	38
II.2.1.1. Quelques définitions de la supervision.....	39
II.2.1.2. Positionnement de la supervision dans le pilotage.....	39
II.2.1.3. Outils de supervision dans l'industrie .....	41
II.2.1.4. Principales fonctionnalités des outils de supervision.....	41
II.2.2. Ordonnancement « Scheduling » en temps réel .....	43
<b>II.3. Choix des outils pour le pilotage en temps réel d'atelier</b> .....	<b>44</b>
II.3.1. MES « Manufacturing Execution System » .....	44
II.3.1.1. Définition et positionnement dans l'entreprise .....	45
II.3.1.2. Norme S95 et fonctions du MES.....	47
II.3.1.3. Contrainte du MES pour le pilotage.....	49
II.3.2. Simulation de flux à événements discrets (SED) .....	49
II.3.2.1. Évolution des outils de simulation pour l'ingénierie .....	50
II.3.2.2. Classification de la simulation selon différents critères.....	52
II.3.2.3. « SED » dans le cycle de vie d'un système de production.....	53
II.3.2.4. Contraintes d'utilisation des outils de simulation .....	55
II.3.2.5. Simulation hors ligne, usage le plus courant pour le pilotage.....	57
<b>II.4. Optimisation en couplant les méthodes simulateur/analytique dans un atelier de fabrication intermittente</b> .....	<b>58</b>
II.4.1. Optimisation en théorie .....	58
II.4.1.1. Les méthodes analytiques.....	58
II.4.1.2. Les méthodes simulateurs .....	59
II.4.1.3. La combinaison des deux approches dans la théorie.....	61
II.4.2. Application pratique .....	61
II.4.2.1. Description du job shop.....	62
II.4.3. Résolution par couplage des deux approches.....	63
II.4.3.1. Modélisation analytique .....	64
II.4.3.2. Séquencement.....	67
II.4.3.3. Modélisation simulateur.....	68
II.4.3.3.1. Simulation déterministe à horizon fini .....	68
II.4.3.3.2. Simulation déterministe à horizon infini.....	69
II.4.3.3.3. Simulation stochastique à horizon infini.....	70
<b>II.5. Conclusion de cette optimisation</b> .....	<b>70</b>
<b>III. Simulation en ligne couplée à l'exécution</b> .....	<b>77</b>
<b>III.1. Introduction</b> .....	<b>79</b>
<b>III.2. Simulation en ligne</b> .....	<b>79</b>
III.2.1. Les différentes formes de la simulation en exploitation .....	79
III.2.2. État de l'art sur la <i>simulation en ligne</i> .....	83
<b>III.3. Proposition de modélisation du processus de pilotage en temps réel à l'aide de la simulation en ligne</b> .....	<b>87</b>
III.3.1. Échange de données entre les processus de pilotage et opérationnel.....	89
III.3.2. Analyse de la fonction principale niveau [A-0] du processus de pilotage en temps réel.....	92
III.3.3. Fonction [A1] - <i>Observer</i> le processus opérationnel en utilisant une <i>simulation en temps réel</i> .....	93
III.3.3.1. Caractérisation des données nécessaires .....	94
III.3.3.1.1. Disponibilité des données .....	94
III.3.3.1.2. Acquisition de données .....	94

III.3.3.1.3. Qualité et exactitude des données .....	94
III.3.3.1.4. Fréquence de synchronisation.....	95
III.3.3.2. Fonction [A11] - Calibrer le modèle.....	96
III.3.3.3. Fonction [A12] - Initialiser le modèle.....	97
III.3.3.4. Fonction [A13] - Adapter le modèle aux événements .....	97
III.3.3.4.1. Synchroniser les événements du modèle .....	98
III.3.3.4.2. Ajuster les paramètres.....	100
III.3.4. Fonction [A2] - <i>Se projeter</i> dans le court terme en utilisant une <i>simulation de projection</i> .....	101
III.3.4.1. Fonctions [A21] et [A22] - Sélectionner un critère de filtrage et Classifier les événements courants.....	102
III.3.4.2. Fonction [A23] – Filtrer les événements déclencheurs.....	103
III.3.4.3. Fonction [A24] – Simuler en accéléré .....	104
III.3.5. Fonction [A3] - Décider en utilisant une simulation de correction.....	105
III.3.5.1. Fonction [A31] – Évaluer la situation à $(t_i + \Delta t)$ .....	107
III.3.5.2. Fonction [A32] – Rechercher des solutions.....	107
III.3.5.3. Fonction [A33] – Évaluer les solutions.....	108
III.3.5.4. Fonction [A34] – Valider une solution adaptée .....	109
<b>III.4. Chronogramme d'utilisation de la simulation en ligne pour le pilotage en temps réel .....</b>	<b>109</b>
III.4.1. Processus général de pilotage à l'aide de la simulation en ligne .....	109
III.4.2. Comparaison entre différentes stratégies d'utilisation de la <i>simulation en ligne</i> .....	111
III.4.2.1. Stratégie d'utilisation de deux modèles de simulation et d'initialisation sur un état unique.....	111
III.4.2.2. Stratégie d'utilisation de deux modèles de simulation et d'initialisation sur des états successifs.....	112
III.4.2.3. Stratégie d'utilisation d'un seul modèle de simulation et d'initialisation sur un état unique.....	113
III.4.2.4. Problème de reprise de la simulation en temps réel.....	115
<b>III.5. Couplage entre Simulation et MES pour l'aide à la décision dans le pilotage ....</b>	<b>116</b>
III.5.1. État de l'art de la simulation couplée à l'exécution pour le pilotage d'atelier.....	117
III.5.2. Analyse du besoin et spécifications attendues pour le couplage.....	120
<b>III.6. Conclusion.....</b>	<b>122</b>
<b>IV. Démonstration de la faisabilité technique .....</b>	<b>129</b>
<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>131</b>
<b>IV.2. Présentation de la plateforme expérimentale.....</b>	<b>131</b>
IV.2.1. Caractéristiques générales.....	131
IV.2.2. Description de la partie opérative .....	131
IV.2.3. Description de la partie commande.....	134
IV.2.3.1. Commande bas niveau.....	134
IV.2.3.2. Commande de haut niveau.....	134
IV.2.4. Pilotage de la production par le produit .....	135
<b>IV.3. Construction du modèle de simulation hors ligne de la plateforme expérimentale         .....</b>	<b>141</b>
IV.3.1. Données réelles utiles à la modélisation .....	141
IV.3.2. Choix de l'outil de modélisation.....	143
IV.3.3. Modélisation des règles aux différents points de décision.....	144
IV.3.4. Résultats fournis par la simulation hors ligne.....	145

IV.3.5. Calibrage et validation du modèle de simulation hors ligne.....	145
<b>IV.4. Étude de la faisabilité technique pour réaliser des simulations en ligne .....</b>	<b>150</b>
IV.4.1. Simulation en temps réel et problème de l'initialisation du modèle.....	150
IV.4.2. Développement des fonctions techniques pour la simulation en ligne .	150
IV.4.3. Démonstration en vraie grandeur .....	153
<b>IV.5. Conclusion.....</b>	<b>153</b>
<b>Conclusions et perspectives.....</b>	<b>157</b>





**AUTEUR** : Samieh MIRDAMADI

**DIRECTEUR DE THESE** : Lionel DUPONT

**LIEU ET DATE DE SOUTENANCE** : École des Mines d'Albi - le 17 Juin 2009

---

## **Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution**

---

### **Résumé :**

Ce travail de recherche met en avant l'intérêt qu'offre la simulation en ligne comme outil d'aide à la décision, outil centré sur le pilotage d'atelier vis-à-vis d'événements se produisant en temps réel et pour un horizon à très court terme. Après avoir présenté le contexte général du pilotage des systèmes de production, nous avons étudié les outils existants et utilisés industriellement pour l'exploitation de la production, de même que les outils d'aide au pilotage permettant d'assurer le respect optimal des objectifs fixés. Après un travail préalable sur la simulation hors ligne, nous proposons de coupler un outil de simulation en ligne à un outil d'exécution d'atelier de type MES afin de piloter en temps réel le processus de production. Une démarche de modélisation faisant appel de façon complémentaire à deux approches, analytique et simulateur, est finalement mise en place. Nous mettons en exergue l'utilisation de la simulation de flux en ligne pour aider au pilotage d'un processus opérationnel. Ainsi nous modélisons le processus de pilotage en temps réel afin de décrire les fonctions requises. Pour cela, nous utilisons différentes stratégies d'utilisation des simulateurs en ligne pour le pilotage, avec un ou deux modèles et avec plusieurs méthodes d'utilisation de ces modèles. La simulation en ligne apporte alors des informations objectives sur les conséquences à court terme d'un événement, ainsi que sur les divers scénarii de correction envisagés. Pour mieux convaincre les industriels de l'intérêt de la simulation en ligne, nous présentons des solutions pratiques aux spécifications et besoins énoncés précédemment en nous appuyant sur une plateforme expérimentale.

**Mots-Clés** : Simulation en ligne, pilotage en temps réel, aide à la décision, MES, Supervision.

---

## **Decision-making aid for production activity control in production by the integration of manufacturing executive system and online discrete event simulation**

---

### **Abstract:**

This research work highlights the interest of online simulation as a decision support tool. This tool is focused on workshop control in relation with real time and short-term events. Online simulation enables to analyze and compare scenarios affecting the production, such as failures or unexpected orders. Moreover online simulation allows a very short term projection in the future in order to quantify the consequences of some unexpected event: we call it projection simulation. Finally, online simulation is helpful to choose the solution that will reduce the impact of a critical event, through the simulation of several scenarios. To conclude, online simulation is one the most interesting decision support tool in workshop piloting. However, there are few industrial applications in manufacturing systems.

The first part of this research work introduces the overall context of production system management. The different generic functions of controlling the production, the modes of piloting and the evolutions of workshop are detailed. We also explain piloting typologies according to their reactivity. In the second part, we study the existing software tools used in industry for the operation of production, and support tools that ensure optimal compliance in regard to the objectives. After a preliminary work on the offline simulation, we propose to couple an online simulation tool with a type MES delivery tool in order to control the production process in real time. A modeling approach using two complementary approaches, an analytical one and simulation, is then introduced. The objective of the third part is to emphasize the use of online flow simulation to assist in operating a production process. Thus we model the process in real time to describe the required functions. Therefore we try out different strategies of use of online simulators, through one or two models and several methods of using these models. Online simulation then provides realistic information on the short-term consequences of an event, as well as on the different ways of correcting the scenarios. To convince industry of the relevance of online simulation, the fourth part presents practical solutions to the specifications and requirements previously stated. An experimental platform helped us validate the concept of online simulation as piloting support tool, but also underline the difficulties of development.

**Keywords** : Online discrete event simulation, production activity control, real-time decision making, MES, Shop floor monitoring and control.

---

**DISCIPLINE ADMINISTRATIVE** : Systèmes Industriels

Institut National Polytechnique de Toulouse - Laboratoire Génie Industriel - École des mines d'Albi - France

<http://www.mines-albi.fr/>