



HAL
open science

Le kanban actif pour assurer l'interopérabilité décisionnelle centralisé/distribué: Application à un industriel de l'ameublement

Thomas Klein

► To cite this version:

Thomas Klein. Le kanban actif pour assurer l'interopérabilité décisionnelle centralisé/distribué: Application à un industriel de l'ameublement. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008. Français. NNT: 2008NAN10138. tel-01748399

HAL Id: tel-01748399

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748399v1>

Submitted on 29 Mar 2018

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Le kanban actif pour assurer
l'interopérabilité décisionnelle
centralisé/distribué**
Application à un industriel de l'ameublement

Thèse

Présentée et soutenue publiquement le 10 novembre 2008

Pour l'obtention du titre de

Docteur de l'université Henri Poincaré
En Automatique, Génie Informatique

Par
Thomas Klein

Composition du jury :

Rapporteurs :	Pierre Castagna	Université de Nantes
	Bernard Grabot	Ecole Nationale d'ingénieur de Tarbes
Examineurs :	Sophie D'Amours	Université de Laval, Québec, Canada
	Gérard Morel	Université de Nancy (Directeur de thèse)
	André Thomas	Université de Nancy (Directeur de thèse)
	Philippe Torineau	Groupe Parisot

Tables des matières

<i>Préambule</i>	6
<i>Introduction</i>	9
<i>1. Contexte industriel de la thèse</i>	12
<i>2. Contexte scientifique de la thèse</i>	14
<i>3. Proposition</i>	16
<i>4. Organisation du mémoire</i>	18
<i>Chapitre 1 : Contexte Industriel de la thèse</i>	21
<i>1. La société Parisot Meubles</i>	21
1.1 Les produits de Parisot Meubles	22
1.2 L'environnement de Parisot Meubles	24
1.3 L'organisation de Parisot Meubles	24
<i>2. Terrain d'application de notre travail : l'unité autonome de Production UGV</i>	26
2.1 Organisation de l'unité de production	26
2.2 Le procédé de fabrication des colis	27
2.2.1 Le processus de débit	28
2.2.2 Le processus d'usinage : l'îlot perçage.....	29
2.2.3 Le processus d'usinage : l'îlot usinage complémentaire	30
2.2.4 Le processus d'emballage : l'îlot emballage	30
<i>3. Analyse du système de production UGV</i>	31
3.1 Le processus de production Parisot Meubles.....	31
3.2 La planification de la production	32
3.3 L'exécution de la production	35
3.3.1 <i>L'optimisation du processus de débit</i>	36
3.3.2 <i>L'optimisation des flux de produits en cours d'usinage</i>	36
3.3.3 <i>L'alimentation continue de la ligne d'emballage</i>	37
3.4 Système initial : la production pilotée par un ordonnancement prédictif.....	37
3.4.1 <i>Le déclenchement de la production</i>	37
3.4.2 <i>L'exécution de la production</i>	37
3.4.3 <i>Faiblesses identifiées</i>	38
3.5 Système actuel : la production pilotée en kanban	39
3.5.1 <i>Le déclenchement de la production en Juste à Temps</i>	39
3.5.2 <i>L'exécution de la production en Kanban</i>	40
3.5.3 <i>Faiblesses identifiées</i>	42
3.6 Synchronisation des flux physiques et d'informations	43
3.7 Evaluation des performances du système de production.....	44
<i>4. Problématique de l'entreprise</i>	46
4.1 (Mesure) Les informations remontées sont fausses ou désynchronisées	46
4.2 (Méthodes) Le processus décisionnel n'assure pas l'optimalité.....	47
4.3 (Management) L'organisation hiérarchique crée de l'inertie	47
4.4 (Moyens) Les contraintes de productivité des différents îlots sont divergentes...47	

4.5	(Milieu) La demande client est diversifiée et versatile	48
4.6	(Maturité) La solution retenue doit être éprouvée	48
4.7	Formulation de la problématique	48
Chapitre 2 : Contexte Scientifique de la thèse		51
1.	<i>Le pilotage centralisé des systèmes de production.....</i>	52
1.1	La fonction ordonnancement dans les systèmes centralisés.....	53
1.2	L'ordonnancement robuste face aux aléas	54
1.3	Ordonnancement réactif	56
1.4	Synchronisation flux physiques/ flux d'informations et de décisions : apports des technologies d'identification	57
2.	<i>Le pilotage distribué des systèmes de production</i>	60
2.1	La philosophie Juste À Temps et le Kanban	60
2.2	Les systèmes de pilotage hétérarchiques	63
3.	<i>Le pilotage hybride des systèmes de production</i>	65
3.1	L'approche holonique	65
3.2	Le contrôle par le produit	67
4.	<i>Synthèse des approches.....</i>	70
4.1	(Mesure) Les informations remontées sont fausses ou désynchronisées	70
4.2	(Méthodes) Le processus décisionnel n'assure pas l'optimalité.....	71
4.3	(Management) L'organisation hiérarchique crée de l'inertie	71
4.4	(Moyens) Les contraintes de productivité des différents îlots sont divergentes...72	
4.5	(Milieu) La demande client est diversifiée et versatile	72
4.6	(Maturité) La solution retenue doit être éprouvée	72
5.	<i>Conclusion.....</i>	75
Chapitre 3 : Problématique.....		77
1.	<i>Définition du problème.....</i>	77
1.1	Périmètre.....	78
1.2	Environnement et fonctions.....	79
1.3	Définition des objectifs et problématique scientifique.....	80
1.4	Définition des indicateurs de performance	81
1.5	Démarche.....	82
2.	<i>Objet de l'étude : le système de production UGV</i>	83
2.1	Finalité du système de production UGV	84
2.2	Environnement du système de production UGV	86
2.3	Vue informationnelle du système de production UGV	89
2.4	Transformation du flux physique finalisant.....	90
3.	<i>Modèle AS IS : le pilotage de la production par un ordonnancement centralisé</i>	90
4.	<i>Modèle AS IS' : le pilotage de la production en Kanban</i>	96
5.	<i>Analyse.....</i>	98
5.1	(Mesure) Les informations remontées sont fausses ou désynchronisées	98
5.1.1	<i>L'intelligence</i>	98

5.1.2	<i>La conception</i>	99
5.1.3	<i>La sélection</i>	100
5.1.4	<i>L'implémentation</i>	100
5.2	(Méthodes) Le processus décisionnel n'assure pas l'optimalité.....	101
5.3	(Management) L'organisation hiérarchique crée de l'inertie	101
5.4	(Moyens) Les contraintes de productivité des différents îlots sont divergentes.	102
5.5	(Milieu) La demande client est diversifiée et versatile	102
5.6	(Maturité) La solution retenue doit être éprouvée	103
6.	<i>Modèle TO BE : le pilotage de la production par Kanban actif</i>	104
6.1	Le système d'information.....	104
6.1.1	<i>Capter les événements de production</i>	105
6.1.2	<i>Agréger les données de production</i>	106
6.1.3	<i>Stocker une représentation de l'état du système physique</i>	106
6.1.4	<i>Accéder aux informations</i>	109
6.2	Architecture décisionnelle	110
6.2.1	<i>Un cadre de décision fixé de manière centralisée</i>	111
6.2.2	<i>Des adaptations locales</i>	112
6.2.3	<i>Interopérabilité décisionnelle centralisé/distribué</i>	113
	<i>Chapitre 4 : Architecture de validation</i>	117
1.	<i>Architecture de validation</i>	118
1.1	Le modèle d'émulation.....	119
1.2	Système d'information	122
1.3	Exécution	124
1.4	Validation	127
2.	<i>Implémentation des modèles de systèmes de pilotage</i> .	129
2.1	Ordonnancement Centralisé.....	129
2.1.1	<i>Implémentation</i>	129
2.1.2	<i>Validation</i>	131
2.2	Kanban.....	131
2.2.1	<i>Implémentation</i>	132
2.2.2	<i>Validation</i>	133
2.3	Kanban Actif.....	134
2.3.1	<i>Implémentation</i>	134
2.3.2	<i>Validation</i>	135
	<i>Chapitre 5 : Résultats</i>	139
1.	<i>Protocole expérimental</i>	140
1.1	Définition de la performance à mesurer	140
1.2	Définition du moyen de mesure	140
1.3	Recensement des facteurs agissant sur la réponse	141
1.4	Sélection des facteurs significatifs et choix des modalités.....	142
1.5	Choix du plan d'expériences	144
1.6	Organisation et réalisation des essais	145
2	<i>Analyse des résultats et discussion</i>	147
2.1	Effets des facteurs sur les performances	147
2.1.1	<i>Effets sur le niveau d'en-cours</i>	147

2.1.2	<i>Effets sur le temps d'écoulement</i>	148
2.1.3	<i>Effets sur la production globale</i>	149
2.1.4	<i>Effets sur la productivité</i>	150
2.1.5	<i>Validation des résultats</i>	151
2.2	<i>Discussion sur les modes de pilotage</i>	152
	<i>Conclusion et perspectives</i>	157
1.	<i>Retour sur la problématique industrielle</i>	158
2.	<i>Retour sur la problématique scientifique</i>	160
3.	<i>Perspectives</i>	160
	<i>Bibliographie</i>	163
	<i>Publications relatives à nos travaux</i>	169
	<i>Communications sans comité de lectures</i>	170
	<i>Webographie</i>	171
	<i>Glossaire</i>	172

Préambule

La thèse défendue dans ce mémoire est le résultat d'un partenariat entre, d'une part, le groupe Parisot et plus particulièrement la société Parisot Meuble, et d'autre part, l'équipe de recherche technologique TRACILOG du Centre de Recherche en Automatique de Nancy.

Le travail scientifique présenté s'appuie sur des problématiques industrielles réelles et les propositions sont validées par une application à l'échelle industrielle.

Introduction

Le mode de consommation des biens et des services a évolué au cours des dernières années, avec notamment l'émergence du e-commerce. Si jusqu'alors les consommateurs étaient satisfaits de produits faiblement différenciés à bas coûts, la tendance est désormais à leur personnalisation, impliquant une augmentation de la diversité et des exigences du client final en termes de coûts, qualité, fonctionnalités et délais. Les systèmes de production qui avaient été conçus pour être efficaces dans un contexte de production de masse doivent désormais évoluer pour s'adapter à ce nouveau type de marché. Ils doivent *gagner en flexibilité* pour être capables de répondre aux diverses demandes des clients. Il leur faut également *être réactifs*, afin de les satisfaire rapidement. Enfin, l'entreprise dans sa globalité doit *devenir agile*¹, capable de se reconfigurer en fonction des évolutions de son environnement ou de son marché (Koren *et al*, 1999),(Nof *et al*, 2006).

Les industries qui produisent en grandes séries des produits personnalisables, et notamment *l'industrie du meuble*, subissent particulièrement cette évolution : le nombre de références ne cesse d'augmenter et les volumes par référence diminuent. Ainsi, l'un des enjeux majeurs de l'entreprise Parisot Meubles (Entreprise dans laquelle nous avons effectué notre thèse CIFRE) est de *flexibiliser un système industriel* initialement dimensionné pour produire des quantités importantes de produits avec une faible différenciation, afin de *répondre aux exigences des clients*, tant en terme de diversification des produits que de qualité, coûts et délais. Les investissements dans les infrastructures de production étant récents et importants, les efforts pour améliorer la flexibilité doivent d'abord s'appuyer sur une *évolution des structures de pilotage*.

Les *systèmes de pilotage centralisés et hiérarchisés*, initialement développés pour répondre à un marché de consommation de masse, ne permettent pas l'agilité du système de production. En effet, si de telles architectures se montrent performantes en régime nominal, de nombreux auteurs (Duffie *et al*, 1986)(Valckenaers *et al*, 1997) ont souligné leur *manque de robustesse* aux perturbations (gestion d'urgences commerciales, pannes, ruptures d'approvisionnements) et leur *rigidité* (pénibilité de la reconfiguration lors de l'introduction de nouveaux produits par exemple). Ce constat a conduit beaucoup d'entreprises à se tourner vers des stratégies de pilotage de type *Juste À Temps*, reposant sur une production tirée par la demande du client et un système de pilotage des flux physiques par le terrain, généralement à l'aide d'étiquettes kanban « papier » (Ohno *et al*, 1981), (Monden, 1981),(Shingo, 1988).

(Gunasekaran, 1999) définit l'*agilité* comme la capacité d'un système de production à prospérer dans un environnement compétitif en constante évolution.

S'ils satisfont aux contraintes de réactivité, ces systèmes ne proposent pas une gestion optimale des flux, et rendent celle-ci complexe par la difficulté à disposer d'une vue globale de la situation. Cette *désynchronisation* entre le monde physique et celui de la décision/information génère souvent un manque d'adéquation entre les décisions prises et la réalité du terrain, perturbant ou empêchant la mise en œuvre des solutions finement optimisées (Plossl, 1993).

Les récents progrès dans le domaine des *technologies d'identification automatique (Auto-ID)*, comme par exemple l'identification par radiofréquence (*RFID – Radio Frequency Identification*), rendent envisageable leur utilisation au profit de la production en permettant la collecte, le stockage et la communication d'informations précises et en temps réel pour chacun des produits. Ces technologies d'identification offrent des opportunités prometteuses (McFarlane *et al*, 2003) comme *l'amélioration de la visibilité sur le flux de produits* en minimisant les interventions humaines (Parlikad *et al.*, 2007).

Ces technologies infotroniques apportent les outils concrets permettant la mise en œuvre de systèmes automatisés de pilotage dans lesquels il devient réaliste d'imaginer que le « *produit informant* » participe à la synchronisation du flux d'objets physiques du procédé avec le flux des objets logiciels du système d'information représentant ce procédé. Cette substitution d'une partie des procédures manuelles de terrain par le produit informant (instrumenté à l'aide de technologies RFID) complète l'interface entre MES (Manufacturing Execution System) et Process, comme proposé notamment par Rockwell Automation ou Siemens ou sous la forme de e-kanbans par (Barkmeyer *et al*, 2007), (Thomas *et al*, 2008).

Au-delà d'une plus grande visibilité du flux de produits, rendre le « *produit actif* » en lui conférant des capacités d'information, voire de décision, permet de reconsidérer les architectures conventionnelles orientées processus. Mc Farlane (McFarlane *et al*, 2003) a montré que l'instrumentation du produit et l'augmentation de la visibilité inhérente permettent un apport en ce domaine, tant pour les systèmes classiques de gestion de production que pour les systèmes émergents (Figure 1). La disponibilité d'informations à la fois sur le procédé et sur le produit lui-même conduit à une amélioration de l'observabilité dans l'espace des états de l'opération contrôlée. L'Auto ID est donc un complément aux informations capteurs provenant directement du procédé. La possibilité de disposer d'informations précises et en temps réel sur l'identité, le statut et les spécifications du produit aide à réduire les délais et les risques d'erreurs dans la gestion des stocks de matières premières, les opérations de production et la gestion des produits finis.

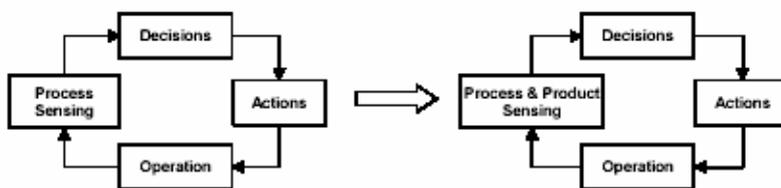


Figure 1. Impact de l'instrumentation du produit sur la boucle de contrôle (McFarlane *et al*, 2003)

En réalisant le *lien entre flux physique et flux d'informations*, l'identification automatique permet la mise en œuvre de nouvelles générations de systèmes de pilotage basées sur un « *Produit actif* », comme prôné par l'initiative internationale IMS-HMS (Intelligent Manufacturing System)(<http://www.ims-noe.org>). Cette décentralisation des capacités de décision assure une grande réactivité face aux perturbations, le comportement du système étant synchronisé par les événements du flux physique. Cependant, cette distribution des capacités de décision rend complexe l'optimisation globale des solutions mises en œuvre.

Il apparaît donc pertinent de coupler *un système centralisé et prédictif* permettant d'assurer les fonctions tactiques de planification de la production à *un système distribué et réactif d'exécution* de la production, pilotant les flux physiques en temps réel. Valckenaers l'a d'ailleurs énoncé dans (Morel *et al*, 2003a) : « *These recent and ongoing developments finally promise to deliver the best of both worlds: the planning ability of centralized older solutions and the ability to cope with the real-factory dynamics of the self-organizing multi-agent systems* ». Ce couplage nécessite cependant de définir, développer et déployer un outil logiciel pour assurer la cohérence des décisions prises sur le terrain, à la fois entre elles et avec les cadres fixés de manière optimale par le système centralisé.

Cependant, malgré des expériences en laboratoire prometteuses dans les domaines des systèmes multi-agents ou holoniques, *peu d'applications industrielles* existent à l'heure actuelle (Marik *et al*, 2007). (Valckenaers *et al*, 2006a) souligne qu'un important chemin reste à parcourir avant de disposer de tels systèmes de pilotage validés et efficaces dans un contexte industriel réel. Il existe un réel besoin de *preuve de concept* et de démonstration de la pertinence des nouvelles approches, notamment par des études comparatives (Pannequin, 2007). Or la complexité inhérente aux systèmes distribués rend inutilisables les méthodes analytiques permettant de prouver l'optimalité d'une solution dans le cadre d'une résolution centralisée prédictive. Il est donc techniquement difficile d'évaluer de façon quantitative les performances des systèmes réactifs d'exécution de la production, et par conséquent de les comparer à d'autres systèmes.

Une *analyse dynamique des systèmes*, et plus particulièrement l'utilisation de techniques de simulation à événements discrets et des pratiques de benchmarking, représentent une solution intéressante et reconnue de mener des études quantitatives et comparatives des systèmes de pilotages émergents (Brennan *et al*, 2005), (Valckenaers *et al*, 2006b), (Mönch, 2006), (Pannequin, 2007). Ces approches reposent sur un modèle d'émulation du système opérant couplé à un modèle des règles de décision.

Les enjeux actuels du domaine sont donc relatifs à la proposition de cadres de modélisation et de développement de systèmes de production agiles, à la preuve du concept et de la pertinence et de l'efficacité de tels systèmes à l'échelle industrielle et au transfert de ce concept par application sur des cas réels du monde industriel.

Nos travaux ont pour but d'étudier les nouvelles opportunités apportées par les technologies d'identification dans le pilotage des flux de production, et plus particulièrement les technologies d'identification automatique dans un système de production contrôlé par un kanban actif. Ainsi, comme introduit précédemment, dans le cadre d'une thèse CIFRE, nous adressons la problématique de gestion des flux de produits au sein de l'entreprise Parisot Meubles.

Au cours de ce travail de thèse, nous avons *étudié le système de production* dans son ensemble (système physique et système de pilotage), afin d'identifier les problématiques

industrielles de pilotage de la production. A partir de ces problématiques industrielles, nous avons *induit une problématique* plus générale de recherche. Nous avons ensuite pu *valider les propositions* que nous avons formulées par l'application au cas industriel réel. La démarche suivie au cours de ce travail de thèse est présentée sur la Figure 2.

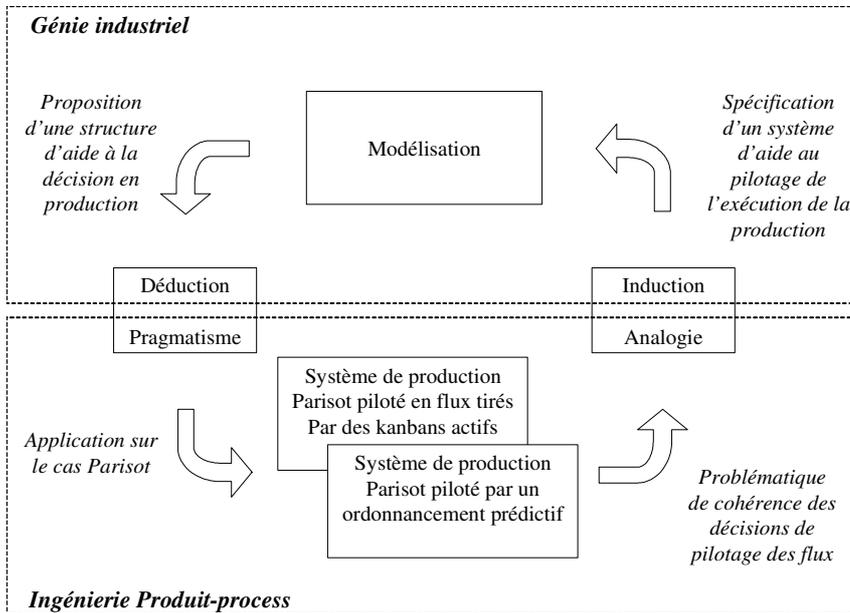


Figure 2. Démarche de la thèse

1. Contexte industriel de la thèse

Nos travaux s'appuient donc sur un cas industriel particulier pour induire une problématique spécifique de décisions logistiques et de pilotage de flux, au sein de *l'atelier UGV de l'entreprise Parisot Meubles*.

Dans la suite de ce document, nous désignerons par « produit » un bien et/ou un service associé à une production qui est censé satisfaire un besoin. En ce sens, les produits de Parisot Meubles sont des *meubles en kits livrés à ses clients à la date demandée, dans la quantité souhaitée, avec la qualité souhaitée, et au coût souhaité* par le client.

Le métier de l'entreprise Parisot Meubles est la *production en grandes séries de meubles en kits en panneaux de particules*, à destination des distributeurs spécialisés de l'ameublement. La nature des produits, ainsi que le système de production en usage ont conduit à la mise en place d'une gestion de production sur stock.

Au niveau de la chaîne logistique en aval (Figure 3), les disparités d'exigences des différents clients rendent complexe la gestion de la distribution. En effet, les distributeurs

traditionnels français, qui représentent une part importante du chiffre d'affaires disposent de centrales d'achats, mais pas de structures logistiques centralisées adaptées aux plus gros fournisseurs ; par conséquent, les fournisseurs importants comme le Groupe Parisot doivent livrer chacun des points de vente de manière hebdomadaire. Le développement de nouveaux portefeuilles clients, tels que la grande distribution ou les spécialistes internationaux du meubles, exige d'autres modes de traitement (enlèvement en sortie d'usine ou livraison et montage chez le client final). Afin de faire face à la nécessité d'alimenter régulièrement chacun des points de vente, le groupe Parisot s'est doté d'une structure basée sur 12 *plates-formes logistiques réparties en France*. Le nombre important de références ne permet pas d'envisager un stockage déporté de l'ensemble des produits finis, par conséquent ces plates-formes jouent le rôle de « hubs » logistiques (cross-docking), en concentrant les flux des différentes usines du groupe pour alimenter les points de vente. Le recentrage du groupe sur les activités de conception, de production et de commercialisation des meubles en kits a conduit à externaliser la fonction de distribution. Ce recours à des prestataires engendre une perte de visibilité sur les flux de produits en distribution, ce qui complexifie leur gestion et complique la relation client.

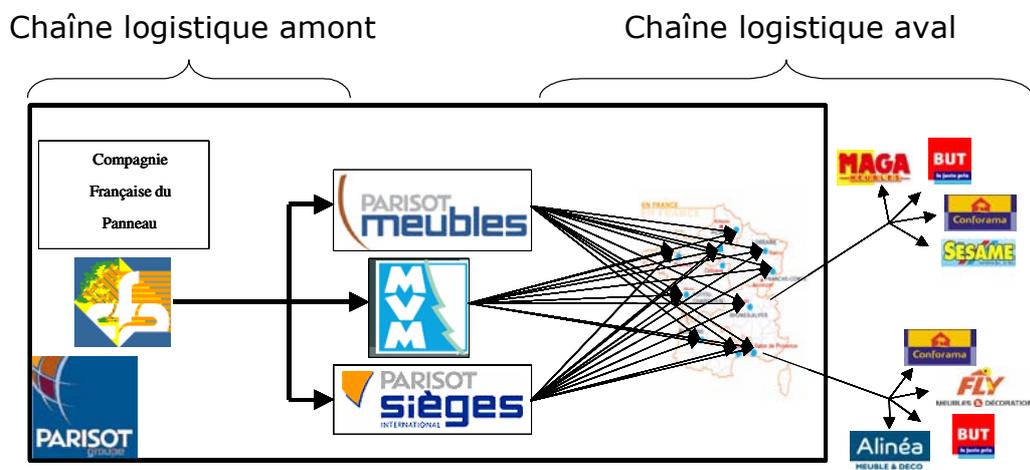


Figure 3. La chaîne logistique Parisot Groupe

D'un point de vue industriel, la diversification des clients pousse à produire des *produits complexes à forte valeur ajoutée et en petite quantité*, alors que le système de production a été conçu et initialement dimensionné pour répondre à un marché de consommation de masse caractérisé par des gros volumes de produits peu diversifiés. Cette évolution du « mix-produits » augmente le nombre de paramètres à prendre en compte pour la gestion des flux de production et des stocks d'en-cours. *L'exécution de la production* apparaît alors comme un enjeu crucial de la compétitivité. Afin d'optimiser ses flux de produits, l'entreprise a d'abord mis en place un système de pilotage reposant sur un outil d'ordonnancement prédictif (Figure 4). Alors que l'ERP (Enterprise Resources Planning) gère les échanges d'informations avec les autres acteurs de la chaîne logistique (fournisseurs et clients), le système d'ordonnancement a pour rôle la réalisation de la production planifiée dans l'ERP pour répondre au besoin du client. La lourdeur des processus d'échange entre le système d'ordonnancement et l'ERP a imposé la mise en place de relations transactionnelles entre ces deux sous-systèmes. Le processus d'ordonnancement est long et consommateur de

ressources humaines, et la difficulté à l'alimenter en données en « temps-réel » ne permet pas d'en tirer le meilleur parti. En effet, beaucoup d'énergie est consommée pour générer un ordonnancement finement optimisé souvent rendu caduque par les aléas du terrain.

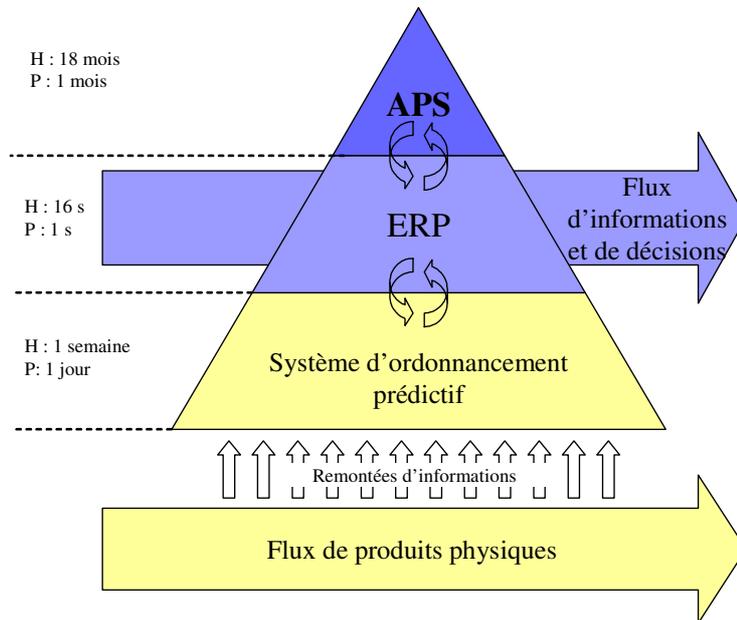


Figure 4. *Système de pilotage de la production Parisot Meubles reposant sur un ordonnancement prédictif (Situation initiale 1)*

Dans un double objectif d'améliorer la flexibilité et de rationaliser le stock de produits finis, une organisation de type *Juste À Temps* a été mise en place via des cartes *Kanban*, avec un déclenchement de la production piloté par la consommation réelle du client.

S'il allège considérablement les processus de contrôle de l'exécution en distribuant les décisions de pilotage à même le flux, un tel système n'améliore pas la visibilité du flux de produits et permet *difficilement l'optimisation globale* du système de production. En effet, les opérateurs prennent des décisions de pilotage sur le terrain sans une vision globale de la situation, et sans pouvoir évaluer a priori l'impact de leurs décisions. De plus, les responsables ne disposent pas d'une vision globale rendant difficile la gestion de la charge sur les différentes ressources et l'estimation des délais.

2. Contexte scientifique de la thèse

Dans le but d'améliorer l'agilité des systèmes de production, les activités de recherche se sont orientées ces dernières années vers des *systèmes de pilotage hybrides* combinant un *système de décision centralisé prédictif* avec un horizon à moyen ou long terme et un *système distribué* où les décisions sont prises en temps réel à même le flux sur un horizon court terme.

La qualité et la complémentarité des deux approches, centralisées et distribuées, laisse entrevoir des bénéfices considérables pour les architectures hybrides qui concilieraient les capacités d'optimisation globale des systèmes hiérarchiques avec la réactivité et la robustesse potentielle des systèmes hétérarchiques (toutes les entités du système décisionnel sont de même niveau hiérarchique (Trentesaux, 2007).

Il devient alors intéressant de proposer que le « *produit actif* » participe aux décisions concernant la fabrication, et de le considérer comme le pivot du système de pilotage, assurant la synchronisation et la cohérence entre un système centralisé assurant l'optimisation globale de la production au niveau de l'entreprise et l'ensemble des centres de décisions distribués en charge de l'exécution de la production (Figure 5). Ainsi, une première boucle de pilotage incluant les niveaux ERP et MES traite la dimension tactique de la production de manière prédictive : un programme directeur de production (PDP) est établi par l'ERP et transmis au MES, qui informe périodiquement de l'avancement de la réalisation de ce PDP. Cette boucle de pilotage est focalisée sur la dimension « service » du produit, comme sa mise à disposition du client au moment souhaité.

Une seconde boucle réactive intègre le produit actif, permettant la mise à jour en temps réel de l'ERP et le traitement avec le MES des événements de production, tels un réordonnancement ou la réaction à un aléa. Cette seconde boucle s'attache, quant à elle, à mettre en œuvre les transformations physiques permettant la transformation de matières premières en produits finis.

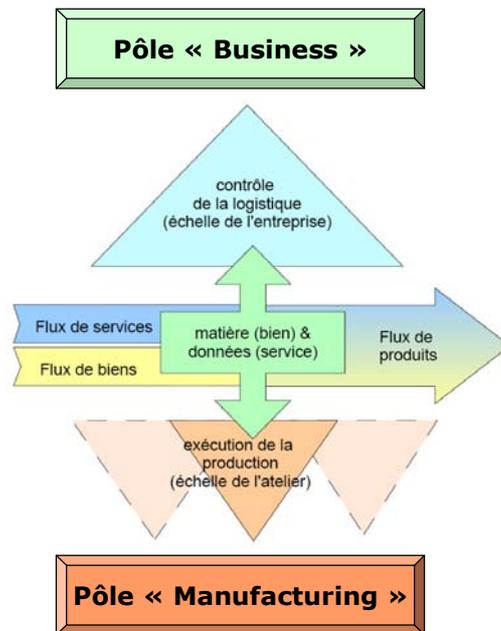


Figure 5. Proposition d'une architecture de pilotage centrée sur le produit (Morel et al, 2007)

Au sein du CRAN, l'équipe projet « Systèmes Contrôlé par le Produit » étudie l'opportunité d'allouer au produit un rôle actif dans l'organisation, assurant le lien entre les pôles « Business » et « Manufacturing » de l'entreprise (cf rapport d'activité du CRAN, 2004-

2007²). Placer le produit au centre du MES rapproche le projet SCP du projet international PABADIS-PROMISE. Les travaux de SCP visent également à assurer un écoulement fluide d'objets physiques hétérogènes et des services associés mixant des produits et composants variables tout au long de la chaîne de production et logistique.

Des outils méthodologiques ont été proposés pour utiliser le produit comme élément central de l'interopérabilité B2M (Business to Manufacturing), (Terzi, 2005), (Baïna, 2006).

(Gouyon, 2004) utilise les techniques de synthèse pour rendre actif le produit dans l'automatisation du système de production (commande des ressources et routage des produits), dans un contexte d'organisation à la demande de très petites séries (voire des séries unitaires).

Dans le but d'apporter la preuve du concept « SCP », un outil d'évaluation et de validation de systèmes contrôlés par le produit a été spécifié et mis en œuvre (Pannequin, 2007).

Notre travail quant à lui a été mené dans le cadre de l'équipe de recherche technologique *ERT TRACILOG*, qui a vocation d'éprouver le paradigme SCP au passage à l'échelle réelle d'applications industrielles dans les chaînes logistiques des entreprises de la filière fibres. Notamment, (Thomas *et al*, 2008) montrent la pertinence du concept de *contrôle par le produit* dans un contexte de production pilotée en Juste À Temps.

Le travail présenté dans ce mémoire a prolongé le travail de thèse de Rémi Pannequin dont l'objet était de démontrer la validité du concept de contrôle par le produit. Il a aussi été mené conjointement à la thèse de Hind El Haouzi (soutenue en 2008), qui exploite ce concept pour synchroniser les flux d'une ligne principale d'assemblage avec des lignes secondaires (feeders), dans un contexte de production unitaire. Par rapport à ces deux thèses, notre contribution s'appuie sur l'infotronisation des flux physiques pour aider à la gestion des différents points de découplage par rapport à un objectif global, dans un contexte de production de gros volumes « batchés ».

D'un point de vue national, ce paradigme a fait l'objet de la création d'un projet « Système Contrôlé par le Produit » au sein du *GDR MACS*.

3. Proposition

Le problème industriel identifié étant d'améliorer l'agilité du système de production, le contrôle par le produit semble être une piste de recherche intéressante. Compte tenu du contexte économique de production de gros volumes de produits à faible marge, l'instrumentation de chaque entité « produit » n'est pas envisageable à un coût raisonnable. Par contre, dans un système Juste À Temps, le kanban est initialement l'élément de synchronisation entre monde physique et monde informationnel, permettant de maintenir une représentation du flux de production par la circulation d'étiquettes sur des tableaux. Par conséquent, il apparaît pertinent afin de réduire les besoins d'investissement d'instrumenter les kanbans et non les produits. Notre interprétation du paradigme de système contrôlé par le produit appliquée au cas Parisot Meubles se traduit donc par l'instrumentation des étiquettes kanban, appelées « *kanbans actifs* »(Figure 6).

² Centre de Recherche en Automatique de Nancy, Rapport d'activité scientifique 2004-2007, 2007, pp 87-138.

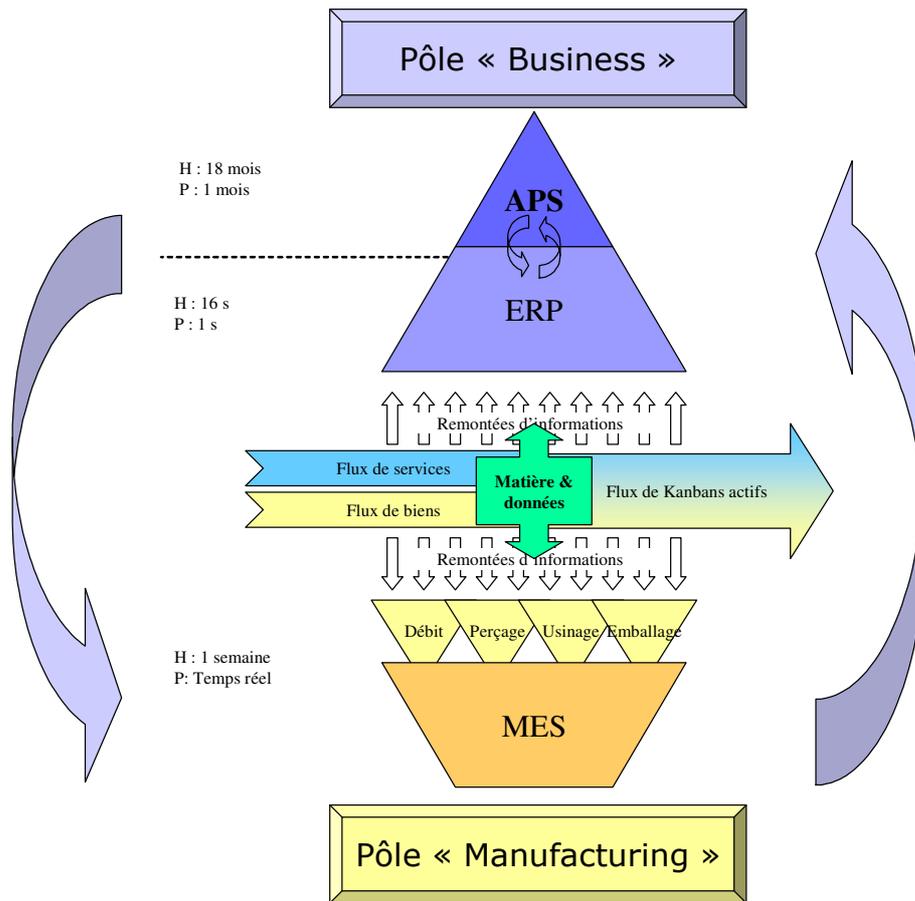


Figure 6. Notre interprétation du paradigme SCP au cas Parisot Meubles

Cette instrumentation des kanbans lui confère non seulement des fonctions d'information (tel le e-kanban), mais les kanbans actifs sont également acteurs du système de production ; ils assurent l'interopérabilité et la synchronisation entre un système de décision centralisé et les différentes entités décisionnelles distribuées, afin de coordonner l'ensemble des décisions. Ces entités décisionnelles impliquent les opérateurs de terrain qui contribuent alors, par leur expérience, au bon fonctionnement du système, ce qui conduit à les intégrer dans le processus de décision plutôt qu'à automatiser intégralement celui-ci. Un système d'aide à la décision, centré sur le produit, permettant aux décideurs de terrain d'évaluer la pertinence de différents scénarii par rapport à un objectif global nous semble donc une première étape réaliste pour améliorer la gestion des flux de produits.

Les risques industriels (économiques, techniques, humains, ...) qu'il y aurait de basculer d'un système de pilotage centralisé et prédictif vers un système distribué et réactif (ou un quelconque autre système de pilotage non éprouvé) nous amènent à analyser les performances du système de pilotage avec des kanbans actifs proposé. Cette validation est mise en oeuvre à l'aide d'une architecture d'émulation reproduisant l'échelle réelle des conditions industrielles d'utilisation. Par ailleurs, certaines structures proposées ont pu être validées sur le système de production réel.

Les contributions de ce travail de thèse reposent sur :

- La proposition d'un **système d'aide au pilotage des flux de production** permettant d'assurer la cohérence globale du système de décision.
- La proposition d'une **architecture d'évaluation par émulation** de systèmes de pilotage de la production à échelle industrielle ainsi que la méthodologie de construction de cet émulateur.
- L'**analyse quantitative des performances** du modèle de pilotage proposé par rapport aux approches plus classiques centralisées ou distribuées mises en œuvre dans le contexte industriel d'étude.

4. Organisation du mémoire

Le *premier chapitre* présente succinctement *l'entreprise partenaire et le procédé de production*. Les contraintes et objectifs de la fonction de pilotage de la production sont formalisées. Deux solutions de pilotage, successivement mises en œuvre dans l'entreprise partenaire, sont présentées et leurs forces et faiblesses sont analysées. Le premier mode de pilotage déployé reposait sur un outil d'ordonnancement centralisé prédictif, et consommait beaucoup de ressources pour optimiser un ordonnancement détaillé que les aléas survenant sur le terrain ne permettaient pas d'appliquer strictement. A l'inverse, le mode de pilotage actuellement déployé, reposant sur la circulation d'étiquettes kanbans, induit de la réactivité mais n'assure pas l'optimalité globale des solutions mises en œuvre. Ces constats permettent d'identifier une problématique industrielle récurrente de synchronisation du système de pilotage avec les flux physiques et d'optimisation globale du système.

Le *second chapitre* décrit deux typologies d'architectures de systèmes de pilotage. La première repose sur une répartition *hiérarchique* des capacités de décision et une intégration verticale du système de pilotage : les décisions sont prises périodiquement et de manière prédictive (approche synchronique). La seconde approche repose sur l'émergence d'un comportement issu des interactions entre différents centres de décision, en temps réel et *sans considérations hiérarchiques*. L'antagonisme entre les points forts et les points faibles de ces deux typologies montre une complémentarité entre les deux approches qui est exploitée par les *systèmes hybrides*. Les systèmes hybrides, ainsi que leurs effets sur les sources de dysfonctionnements identifiées au premier chapitre sont étudiés.

Dans le *troisième chapitre*, *l'approche méthodologique* utilisée pour spécifier le système de pilotage de la production cible est décrite. Le système opérant est d'abord modélisé, ainsi que les deux systèmes de pilotage déjà utilisés. Les flux d'informations ascendants et descendants, ainsi que les constantes de temps induites par la structure, sont décrits. Une analyse de ces modèles au regard des forces et faiblesses précédemment identifiées permet d'alimenter la réflexion, en s'appuyant sur les éléments issus de la bibliographie, afin de proposer un modèle de système de pilotage autour du kanban actif permettant de tirer le meilleur parti des deux types d'approches mises en œuvre. Le système de pilotage par kanbans actifs est décrit, notamment la structure de stockage de l'information (modèle de données), ainsi que le processus de prise de décision.

Le *chapitre quatre* présente la *spécification et le développement* d'une architecture d'évaluation des systèmes de pilotage, reposant sur l'émulation du système opérant à l'aide d'un modèle de simulation à événements discrets. L'architecture générée repose sur une structure distinguant clairement l'émulation du système opérant et le système de contrôle mis en œuvre, ceux-ci étant interfacés par le biais d'un système d'information. Cette architecture permet ainsi d'exécuter différents systèmes de pilotage dans des conditions similaires afin de comparer leurs performances. La génération d'états de performances en fin de simulation permet de générer une base de données qui permet ensuite d'alimenter un processus d'analyse comparative des différents modes de pilotage mis en œuvre. La démarche d'implémentation des différents systèmes de pilotage à partir des modèles ainsi que la validation du réalisme de leur comportement par rapport aux systèmes décrits sont également présentées.

Enfin, le *cinquième chapitre* présente *l'étude expérimentale* réalisée en se basant sur la méthodologie des plans d'expériences de Taguchi. L'instrumentation mise en œuvre autour de l'architecture d'évaluation est décrite. Les différents facteurs impactant les performances du système sont identifiés, notamment la stratégie de pilotage utilisée. Enfin, après réalisation de la série d'essais, les résultats sont présentés et analysés. L'impact du mode de pilotage mis en œuvre sur les performances est discuté. Les autres facteurs influents préalablement définis sont également analysés afin d'identifier leur impact réel et les stratégies à mettre en œuvre pour les maîtriser. La réalisation du plan d'expériences permet ainsi d'identifier les différents scénarii issus de la réalité industrielle à injecter dans l'architecture pour l'évaluation de chaque situation

Chapitre 1 : Contexte Industriel de la thèse

Objectifs :

Dans ce chapitre, nous présentons le groupe Parisot, puis la société Parisot Meubles. L'objectif de notre travail est de proposer un système de pilotage adapté à la production de meubles « meublants » en kits, applicable aux différentes composantes du groupe. Cependant, dans un premier temps, nous nous sommes focalisés sur le pilotage des flux dans l'unité de production UGV.

L'objectif de ce chapitre est d'induire une problématique industrielle à partir de ce cas d'étude.

1. La société Parisot Meubles

La société **Parisot Meubles** appartient au **Groupe Parisot**. Le groupe Parisot a été fondé en 1936, à Saint-Loup sur Semouse, par Jacques Parisot, qui créait des meubles modernes en associant les principes de la fabrication traditionnelle à de nouvelles techniques de production. Il s'agissait alors d'une fabrique de meubles composée d'une dizaine de personnes. Aujourd'hui, le groupe Parisot est devenu une entreprise de taille internationale, employant environ 4500 personnes pour un chiffre d'affaire de l'ordre de 500 Millions d'euros. Le groupe produit six millions de meubles chaque année.

La société Parisot Meubles est le pôle « meubles meublants » du Groupe Parisot, située à Saint-Loup-sur-Semouse en Haute-Saône. Parmi les leaders européens du marché du meuble, c'est plus de 1000 personnes sur un site industriel de 49 hectares qui conçoivent, produisent et commercialisent des meubles en kit de style moderne à base de panneaux.

1.1 Les produits de Parisot Meubles

La société Parisot Meubles vend des meubles à ses clients. Ces meubles peuvent appartenir à une famille commerciale (par exemple une chambre assortie), ainsi qu'à une famille de production (par exemple armoires, chevets...).

La typologie de la production de Parisot Meubles peut être caractérisé comme suit :

- **un nombre important de références** (environ 2000 références de produits finis),
- **un taux de renouvellement important** (Durée de vie des produits comprise entre deux et trois ans, plus de 800 nouvelles références par an),
- **une grande variabilité du produit** (diversité de taille des produits, de nombre de composants, de séquences d'usinage),
- **des produits relativement volumineux et lourds par rapport à leur prix de revient**, induisant des coûts de transport et de stockage élevés, tant pour la matière première que pour les produits finis,
- **un faible prix de vente et une faible marge**, impliquant la nécessité de réaliser de gros volumes pour rentabiliser l'activité,
- **une saisonnalité des ventes importante**, avec un pic important à l'automne.
- **une variété d'organisation logistique des clients** : les grands distributeurs de meubles français.

Des contraintes d'encombrement et de poids maximum peuvent conduire à emballer les différents éléments d'un même meuble dans plusieurs colis. Parallèlement, une référence de colis peut être employée dans plusieurs références de meubles du fait d'initiatives de standardisation.

Un colis est un ensemble de composants qui peuvent être achetés (carton, polystyrène, notice), assemblés (sachets de quincailleries) ou fabriqués (pièces). La gamme est clairement définie, et les produits ne sont pas personnalisables. La possibilité de personnalisation dans un nombre limité de variantes des produits (choix entre différents décors, différentes largeurs...) se caractérise par la création d'autant de références. La nomenclature type d'un meuble est présentée sur la Figure 7.

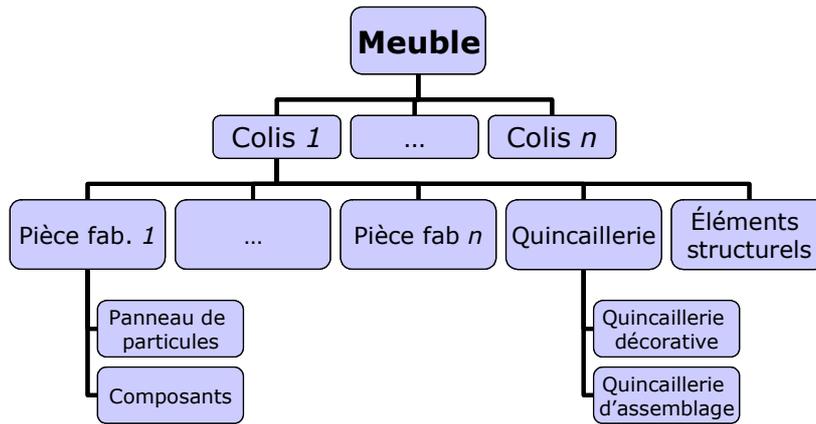


Figure 7. Nomenclature type d'un produit Parisot Meubles

La Figure 8 montre les lignes de flux des différents composants d'un colis et permet de mettre en évidence deux types de flux :

- **Les flux de pièces usinées et leurs composants** (panneaux de particules, chants, colle et éventuellement miroirs). Ces flux sont pris en compte dans le problème d'ordonnancement de l'usinage, la présence de l'ensemble des composants étant requise pour débiter une opération.
- **Les flux de composants achetés de niveau 1** (composants associés au colis lors de l'emballage). La synchronisation de ces flux avec la mise à disposition des pièces usinées est prise en compte par le magasin Matières Premières.

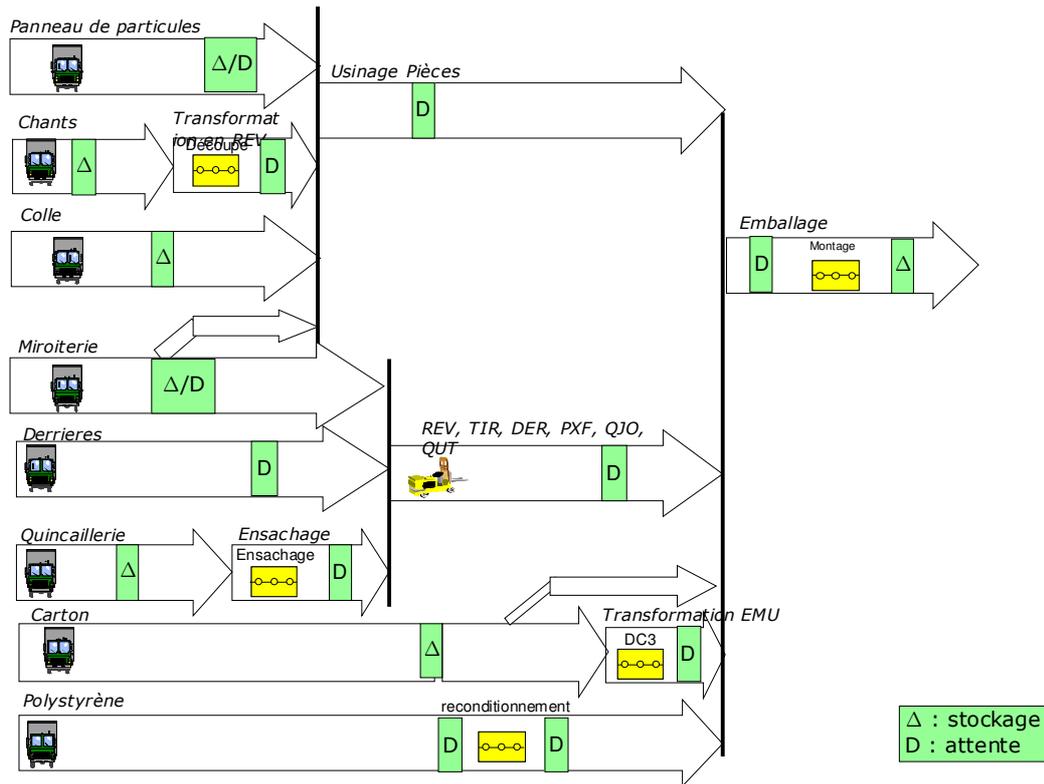


Figure 8. Lignes de flux des différents composants d'un colis

1.2 L'environnement de Parisot Meubles

Les *principaux clients* de Parisot Meubles sont les enseignes de l'ameublement en France (But, Conforama, Alinéa...). Pour répondre au besoin de ces clients de livrer chaque point de vente de manière hebdomadaire, le groupe Parisot s'est doté d'une structure de distribution constituée de douze plates-formes sur le territoire français (Figure 3). Ces plates-formes de cross-docking concentrent les produits des différentes sociétés du groupe pour les acheminer, de façon groupée, aux clients. Chacun des clients est livré une fois par semaine.

En amont, il est possible de distinguer la *Compagnie Française du Panneau* (CFP) des *autres fournisseurs*. En effet, Parisot Meubles n'entretient pas une relation client-fournisseur standard avec la CFP, les deux sociétés appartenant au même groupe. La CFP fournit 95% du volume de panneau de particules consommé par Parisot Meubles, qui représente environ 50% des coûts matière.

1.3 L'organisation de Parisot Meubles

La société Parisot Meubles est organisée en Unités Autonomes de Production (UAP). Ces unités sont de deux types : les trois unités de production de colis et les unités « support ». Les différentes unités sont les suivantes (Figure 9) :

- **UVA (Unité à Valeur ajoutée)** : L'unité UVA produit les meubles à forte valeur ajoutée. Elle dispose d'une grande variété de savoir-faire, mais les cadences et les volumes sont faibles.
- **UGV (Usinage Grande Vitesse)** : L'unité UGV produit le cœur de gamme. Les évolutions du marché tendent à faire diminuer la taille des séries et à s'orienter vers des produits de plus en plus complexes, malgré un outil industriel dimensionné pour réaliser des grandes séries.
- **PMK** : L'unité PMK produit les meubles d'entrée de gamme. L'outil est dimensionné pour réaliser des grandes séries de meubles basiques à faible valeur ajoutée. Les flux sont simples et l'objectif est d'écouler de gros volumes. De même qu'UGV, les évolutions du marché poussent vers une production de moins en moins adaptée à l'outil (augmentation du nombre de références, baisse des volumes commandés par référence et besoin fort de réduction des stocks). L'augmentation de la valeur ajoutée passe par de la sous-traitance avec les autres unités de production, générant des flux complexes à gérer entre les unités.
- **UOR/UPFA (Unité Ornementation / Pièces en Forme)** : Ces unités produisent des composants de meubles, moulures en MDF (Medium Density Fiberboard) ou des pièces à usinage complexes en panneau de particules. Ces unités sont considérées comme des fournisseurs des unités de production.
- **MAF (Magasin Avancé Fournisseur)** : Le MAF a pour rôle de mettre à disposition des unités de production les composants nécessaires à l'assemblage des colis : polystyrène, cartons, éléments décoratifs, quincaillerie. Le MAF est en charge de la réalisation des sachets de quincaillerie en fonction des besoins des unités.
- **UDC (Unité de Distribution Client)** : L'unité UDC gère le stockage et l'expédition des produits finis vers le client. UDC est le client des unités de production.

Par ailleurs, des services centraux coordonnent et assistent les UAP :

- **le service commercial**, en charge de la relation avec le client,
- **le service logistique**, en charge de l'élaboration du Programme Directeur de Production (PDP),
- **le service Développement Nouveaux Produits**, qui intègre les fonctions de conception des nouveaux produits (bureau d'étude) et d'industrialisation.
- **la gestion des plates-formes de distribution groupes**,
- **le service de gestion des Ressources Humaines**,
- **le service Achats / Approvisionnements**,
- **le service Qualité**.

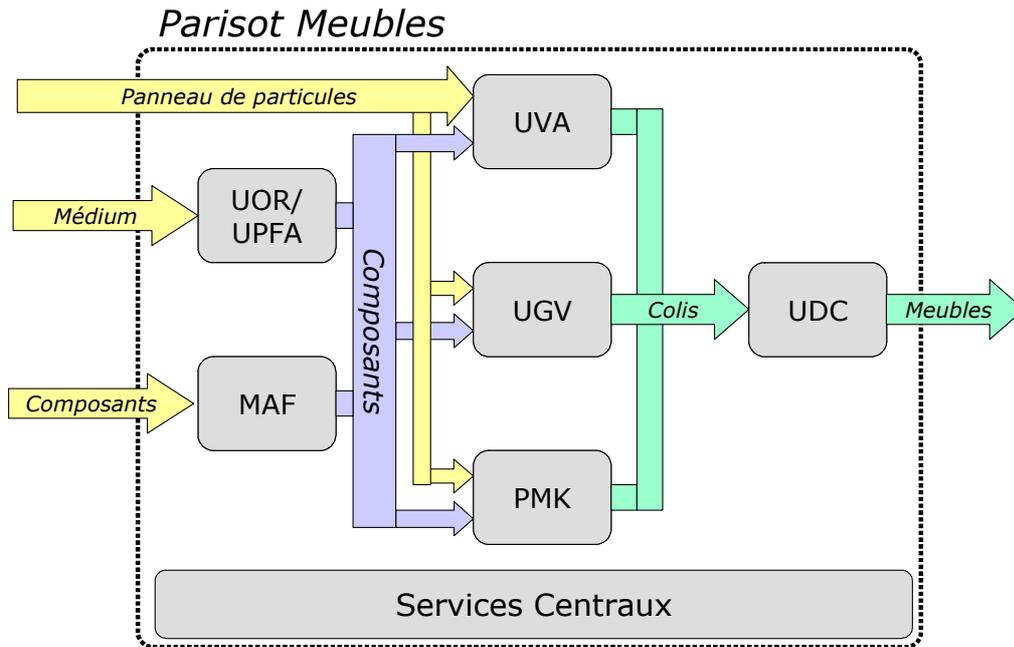


Figure 9. Organisation de Parisot Meubles et principaux flux physiques

2. Terrain d'application de notre travail : l'unité autonome de Production UGV

L'unité autonome de production UGV (Usinage Grande Vitesse) a été créée en 1996. Elle produit des colis à destination de l'unité de distribution UDC, à partir de grands panneaux de particules (GPP) reçus de la CFP et de composants en provenance d'unités sous-traitantes ou de fournisseurs extérieurs. Elle est composée de *quatre îlots de production*, et de services supports.

2.1 Organisation de l'unité de production

L'unité UGV est organisée en îlots. Chacun des îlots réalise des transformations afin de produire des meubles en kit. Ces îlots regroupent des familles de compétences du procédé de fabrication des meubles en kit, présenté précédemment. Par ailleurs, des processus supports de logistique et de maintenance permettent le bon fonctionnement du système de production. L'organisation de l'unité UGV est présentée sur la Figure 10.

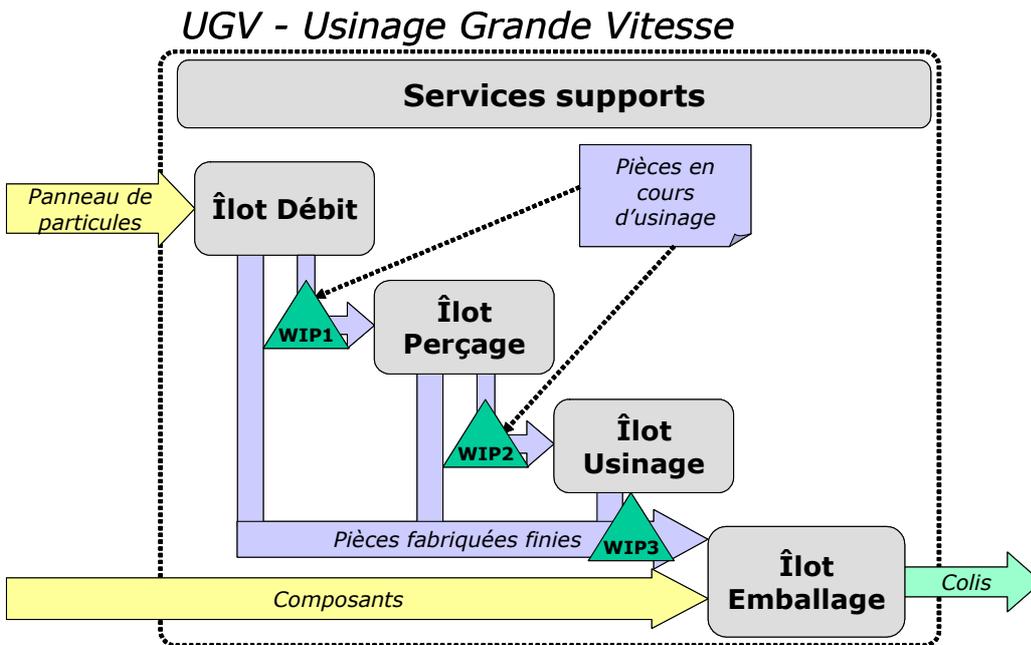


Figure 10. Organisation d'UGV et principaux flux physiques

2.2 Le procédé de fabrication des colis

Le procédé de fabrication des colis se décompose en trois grandes phases (Figure 11):

- **le débit**, qui consiste à découper des grands panneaux de particules (GPP) à la taille des pièces finies,
- **l'usinage**, qui regroupe l'ensemble des opérations permettant de transformer une pièce débitée en pièce finie (perçage, rainurage, pose de chant, calibrage, pose de miroir...). Le processus d'usinage est accompli par deux îlots, l'Îlot Perçage et l'Îlot Usinage Complémentaire (UC).
- **l'emballage**, qui est l'assemblage de l'ensemble des composants achetés ou fabriqués dans un colis.

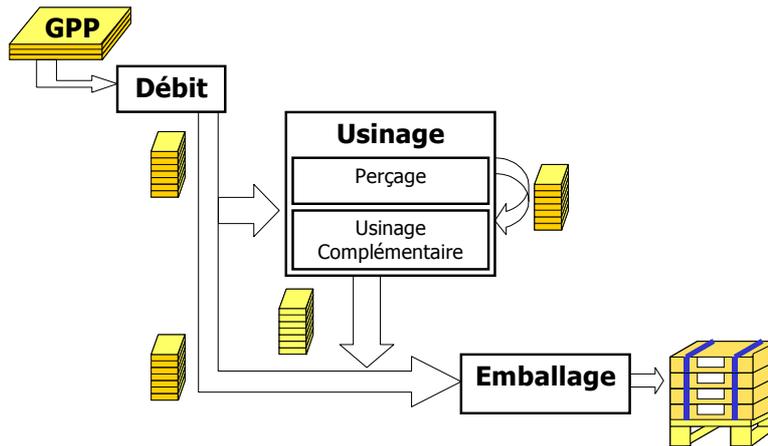


Figure 11. Le procédé de fabrication des colis

Chacun de ces processus poursuit des objectifs et subit des contraintes qui lui sont propres.

2.2.1 Le processus de débit

Le processus de débit est réalisé par une seule machine, qui réalise également un premier usinage longitudinal (pose de chants sur deux côtés des pièces). Ce processus transforme environ *150 m³ de panneau de particule par jour*, ce qui représente un total de 33 000 m³ par an.

Les plans de coupes sont similaires à ceux présentés sur la Figure 12 (a). La machine utilisée est une machine à coupe dite "guillotine" : les piles de GPP sont d'abord découpées en bandes (b), puis les bandes, après usinage, sont découpées en pièces (c).

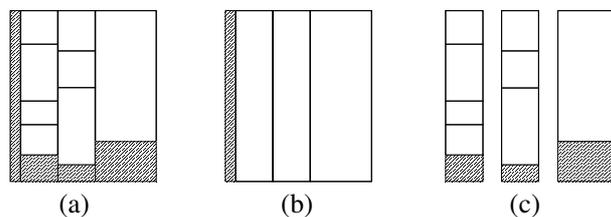


Figure 12 Exemple de plan de coupe

Le processus de la ligne de débit se décompose comme suit :

- les ponts de GPP sont chargés en entrée de la ligne de débit, en fonction du besoin,
- les charges (ensemble de GPP ayant le même plan de coupe Figure 12, b) sont constituées,
- les piles de GPP ayant le même plan de coupe (Figure 12, b) sont découpées en bande par la scie longitudinale,
- afin d'optimiser les réglages, les bandes sont regroupées dans le magasin de triage en fonction de l'usinage longitudinal qu'elles requièrent,
- les bandes sont dépilées avant de subir un usinage longitudinal,
- les bandes sont ré-empilées et regroupées par plan de coupe (Figure 12, c) et sont découpées transversalement,

- les opérateurs de sortie de ligne empilent les pièces par référence sur des panneaux martyrs (équivalents de palettes), et forment des « ponts » identifiés à l'aide de fiches suiveuses.

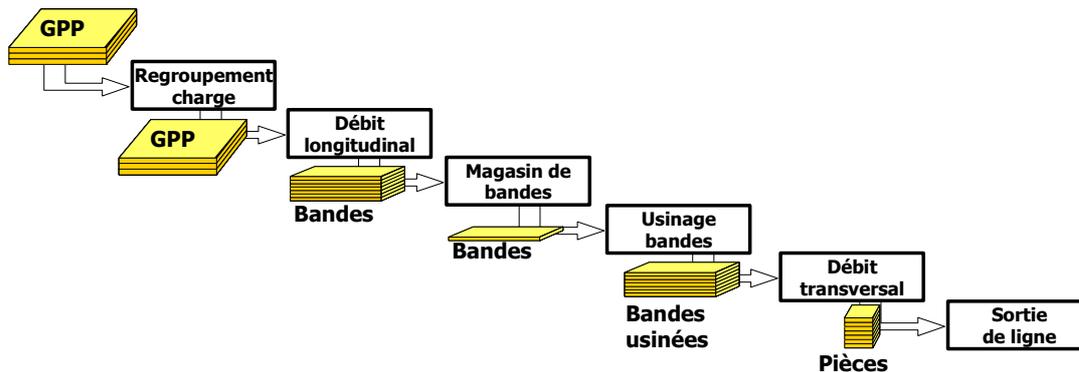


Figure 13. Le processus de débit

La gestion de l'outil de débit poursuit deux objectifs locaux :

- **Optimiser le rendement matière**, en réduisant le taux de chute. Pour ce faire, un logiciel d'optimisation permet d'assister le responsable de l'optimisation matière.
- **Maximiser le rendement de l'outil**, c'est-à-dire maximiser le débit. En effet, la ligne de débit est considérée comme le goulot de l'unité, le retard pris sur ce processus ne peut être rattrapé.

Ces deux objectifs sont parfois antagonistes. En effet, les plans de coupe permettant un bon rendement matière sont en général complexes et génèrent des pertes de productivité, alors que les plans de coupes maximisant la productivité permettent un faible rendement matière. La balance entre ces deux objectifs est réalisée en amont de l'exécution, au cours du processus d'optimisation matière.

Afin d'obtenir un taux de chute satisfaisant, l'ensemble des pièces fabriquées d'un même meuble sont débitées simultanément. Le volume généré par un lancement (« run ») au débit, et la diversité des gammes d'usinage des différentes pièces d'un même meuble entraînent un nécessaire point de découplage entre le processus de débit et les processus d'usinage (appelé WIP1 dans la suite du document). Ce mode de gestion fait également émerger une dualité au niveau des objectifs de performance globaux de l'unité de production, le rendement matière étant plutôt synonyme de taille de lots importante alors que l'écoulement est plus favorisé par des tailles de lot réduits.

2.2.2 Le processus d'usinage : l'îlot perçage

L'îlot perçage est constitué de *trois lignes d'usinage transversal*. Chacune de ces lignes est caractérisée par ses compétences propres : les opérations réalisables sont des perçages, rainurages et de la pose de chant. La complémentarité de ces machines rend possible certains délestages d'une machine sur l'autre, mais la diversité des savoir-faire ne permet pas une flexibilité totale.

L'objectif assigné aux conducteurs des machines de l'îlot perçage est de consommer au plus vite les pièces débitées, afin de maintenir suffisamment d'espace dans le stock d'en-cours pour ne pas perturber le fonctionnement du débit, tout en assurant l'alimentation des processus en aval.

Le *stock de découplage WIP1*, initialement mis en place pour absorber le volume généré par l'optimisation matière sur le processus de débit, permet également une certaine souplesse dans le respect de l'ordonnancement, notamment en effectuant des regroupements de pièces aux plans similaires afin de minimiser les temps de réglage. Ces ajustements, s'ils sont généralement bénéfiques en regard des indicateurs de performances locaux, peuvent perturber le flux de produits et générer des attentes supplémentaires, voire des ruptures sur les processus aval.

Un second stock d'en-cours WIP2 permet une attente et le reséquencement des différents lots de production avant les éventuelles opérations d'usinage complémentaire. Les pièces terminées sont directement envoyées dans le stock de semi-finis.

2.2.3 Le processus d'usinage : l'îlot usinage complémentaire

L'îlot usinage complémentaire regroupe des machines aux caractéristiques diverses permettant la réalisation de nombreux types de pièces :

- deux machines identiques de Reprise Perçage, capables de réaliser des perçages impossibles à réaliser au sein de l'îlot Perçage (perçage sur chant, gros diamètres),
- une machine de calibrage au défilé, permettant de réaliser des mises en forme sur les pièces,
- une machine de pose miroir.

De plus, les machines de calibrage et de pose miroir possèdent des savoir-faire uniques dans l'entreprise. Par conséquent, elles réalisent des opérations de sous-traitance pour les autres unités de production. Par exemple, la machine de pose de miroirs est la seule de l'entreprise : toutes les pièces qui doivent être dotées d'un miroir doivent passer sur cette ressource, quelle que soit l'unité dans laquelle elle sont débitées et usinées.

2.2.4 Le processus d'emballage : l'îlot emballage

L'îlot emballage est constitué de deux chaînes et réalise l'emballage des produits de l'unité UGV ainsi que ceux de l'unité UVA. Typiquement, une chaîne est affectée à chacune des deux unités, mais les deux chaînes sont identiques et des transferts de tâches peuvent être réalisés pour éviter des ruptures de charge (phénomène de famine), tant en termes de pièces fabriquées dans l'unité que de composants d'origine extérieurs (moules, quincaillerie, pièces sous-traitées...).

Ce poste est le plus gros consommateur de main-d'œuvre (la chaîne compte 8 à 12 postes en fonction de la référence emballée). Par conséquent, l'objectif de pilotage de cet îlot est d'éviter toute famine.

Le niveau d'en-cours de semi-finis peut permettre, lorsque l'ensemble des composants est disponible pour plusieurs colis, de reconsidérer le séquencement initialement prévu afin de

gagner en productivité sur la ligne d'emballage. Ces reséquences ne prennent pas en compte les contraintes relatives au service client et la priorité commerciale des différents lots de production.

3. Analyse du système de production UGV

3.1 Le processus de production Parisot Meubles

Le principal composant des produits est le panneau de particules. Les trois types de processus mis en œuvre pour la transformation des grandes plaques de panneaux de particules en meubles en kits poursuivent des objectifs différents et parfois contradictoires (Tableau 1).

Le coût de la matière panneaux de particules est l'un des principaux éléments de coût du produit fini. Par conséquent, le processus de débit a pour objectif la minimisation du taux de chute, tout en assurant une bonne productivité de l'outil. Comme exposé précédemment, la taille de série a un impact important et non-linéaire sur le temps de découpe et sur le taux de chute, ce qui rend le pilotage de l'outil complexe.

L'objectif de l'usinage est d'absorber le volume sortant de l'outil de débit, tout en assurant une charge continue à l'emballage. Pour ce faire, les conducteurs de machine modifient l'ordonnancement afin d'assurer l'approvisionnement de l'emballage tout en optimisant le rendement de leur machine, par exemple en effectuant des regroupements de pièces aux profils de réglages similaires.

Le processus d'emballage est un important consommateur de main-d'œuvre : l'objectif est de maximiser l'efficacité de cette main-d'œuvre, en évitant les ruptures de charge. Le seul levier d'action de l'emballage est la diffusion d'informations aux autres îlots afin d'obtenir les composants requis en temps et en heure. Si l'appel des composants au service approvisionnement est réalisé de manière informatisée dans l'ordre prévu d'emballage, la transmission d'informations entre les différents îlots de production est orale et informelle.

Ces objectifs hétérogènes, ainsi que le type des produits sont à l'origine des modes de fonctionnement différents :

- Le besoin de minimiser le taux de chute pousse à tendre vers des séries les plus importantes possible pour le débit. Les pièces sont donc débitées par meubles (les pièces pour un même lancement de meubles sont débitées en même temps). Ce mode de fonctionnement ne prend pas en compte les contraintes de flux aval. Par exemple, les pièces à gammes longues sont débitées en même temps que les pièces finies après débit (rayons), générant donc nécessairement des temps d'attente.
- Les plans d'usinage de chaque pièce étant différents, l'usinage se fait logiquement par référence pièce.
- L'emballage se fait par colis : l'intégralité des constituants d'un colis doit être disponible avant de commencer l'opération d'emballage.

Au-delà des objectifs locaux, propres à chaque îlot, évoqués précédemment, l'objectif global assigné à l'unité de production est de maximiser le throughput (Goldratt *et al*, 1986), c'est-à-dire le flux de produits finis sortant de l'atelier. L'objectif est de maximiser le nombre de colis produits (tant que l'installation sera sous-capacitaire face à la demande), de lisser la

charge sur les ressources d'emballage, et d'offrir un taux de service maximum (la production correspond à la demande).

Tableau 1. Les objectifs et leviers d'actions associés aux différents processus de transformation

Processus	Objectifs	Leviers d'action
Débit	<ul style="list-style-type: none"> - Minimiser le taux de chute, - Maximiser le rendement de l'équipement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Taille de série - Typologie des plans de coupe
Usinage	<ul style="list-style-type: none"> - Maximiser la productivité, - Absorber le volume sortant du débit, - Assurer une charge continue à l'emballage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Taille de série, - Ordonnancement (Regroupement par réglages, fractionnement de lots, gammes de substitution)
Emballage	<ul style="list-style-type: none"> - Maximiser l'efficacité de la main d'œuvre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ordonnancement de l'emballage. - Taille de série - Equilibrage de la ligne
UGV	<ul style="list-style-type: none"> - Produire les colis correspondant à la demande, à moindre coût, - Maximiser le taux de service client. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ordonnancement global, - Capacités mises en œuvre.

3.2 La planification de la production

Du point de vue de l'entreprise dans sa globalité, cette responsabilité est partagée entre les services logistique et production. Le fonctionnement de la fonction planification est détaillé sur la Figure 14.

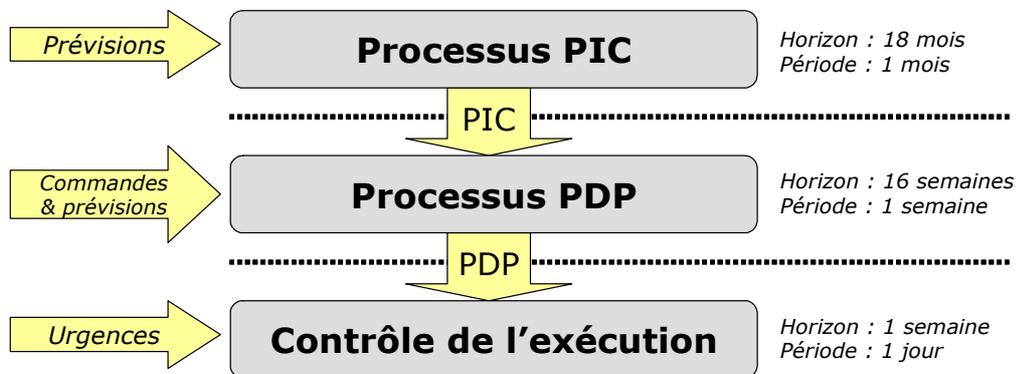


Figure 14. La planification de la production dans l'entreprise Parisot Meubles

Au niveau tactique, un processus PIC (Plan Industriel et Commercial) permet, sur un horizon glissant de 18 mois, de prévoir l'activité et d'anticiper les variations de charge, en

raisonnant à la famille de produits et en analysant la charge induite par les prévisions de ventes sur les ressources goulots. Ces PIC permettent également l'établissement de prévisions de volumes d'approvisionnement, communiqué aux fournisseurs afin de leur permettre d'adapter leur capacité à moyen terme.

Au niveau opérationnel, le Programme Directeur de Production (PDP) définit à capacité finie (avec sa fonction de gestion des capacités) la production hebdomadaire sur un horizon glissant de 18 semaines. Un horizon d'affermissement de 4 semaines permet d'ajuster la capacité pour les semaines à venir, en fonction des besoins de stock représentés par les commandes fermes et les prévisions, en définissant l'ouverture des ressources et en approvisionnant les composants à cycles longs. Tout écart dans les prévisions peut générer du stock, avec tous les risques et coûts engendrés, dans le cas de prévisions supérieures à la demande, ou des ruptures qui entraînent une diminution du Taux de Service Client lorsque la demande client est supérieure aux prévisions.

L'objectif de ces deux niveaux est de générer un programme directeur de production optimal, permettant d'optimiser l'adéquation de la production/demande tout en minimisant les coûts. Si la complexité et l'échelle du problème de planification rendent difficilement envisageable l'utilisation des techniques de programmation linéaire, la modélisation du problème sous la forme d'un problème d'optimisation sous contraintes permet d'explicitement l'objectif et les différentes contraintes.

On peut donc formaliser la fonction objectif de la fonction de planification comme la minimisation de l'écart entre le besoin client et la production réalisée, une surproduction ou une production inadaptée générant des coûts de stockage et des risques d'obsolescence alors qu'une sous-production entraîne des risques de ventes manquées, voire la perte de clients.

$$\text{Min} \left(\sum_{\text{horizon}} \text{production} - \sum_{\text{horizon}} \text{demande} \right)$$

Les contraintes de trésorerie poussent à minimiser les stocks, et donc à tendre vers une production à la demande, ce qui conduit à réduire le délai de production, celui-ci variant de deux à quatre semaines pour un délai de commande client de deux semaines. De plus, des installations dimensionnées pour de la production en gros volume contraignent la réactivité de l'outil de production (temps de changements de série relativement longs), limitant la réduction des tailles de série afin d'assurer la rentabilité.

L'objectif consistant à minimiser les coûts de production et à maximiser l'utilisation des ressources a été modélisé par les contraintes suivantes :

- Minimisation des coûts de stockage : $\text{Min} \sum_{\text{horizon}} \text{coûts_stockage}$

Les coûts de stockage intègrent les frais de possession et d'entretien des bâtiments de stockage détenus et les coûts de manutention associés. Par ailleurs, en fonction du volume de stock porté, l'entreprise peut avoir recours à des prestataires extérieurs, ce qui génère également des coûts de transports et un risque de casse supplémentaires.

- Minimisation des coûts de main-d'œuvre : $\text{Min} \sum_{\text{horizon}} \text{coûts_MO}$

Les coûts de main-d'œuvre représentent l'ensemble des frais relatifs à la main-d'œuvre directe. Les leviers d'action de la fonction planification concernent l'ouverture des ressources (durée de présence des employés) et l'efficacité, qui

peut être impactée par des tâches à non-valeur ajoutée telle la manutention due à un stock d'en-cours trop important.

- Minimisation des coûts de retard : $Min \sum_{horizon} \text{coûts_retard}$

Les coûts de retard représentent les pénalités contractuelles liées à des retards, les surcoûts de transport liés à la mise en œuvre de ressources supplémentaires.

- Minimisation des coûts matières : $Min \sum_{horizon} \text{coûts_matière}$

Le coût du panneau de particule représente entre un tiers et la moitié du prix de revient des meubles en kit. Par conséquent, son utilisation est particulièrement optimisée. Les tailles de lots peuvent donc être considérablement modifiées pour minimiser le taux de chute. L'impact sur les flux et sur la productivité est difficilement quantifiable de façon statistique mais il semble avéré qu'un volume d'en-cours trop élevé ou trop faible entraîne des baisses de productivité.

- Saturation des ressources goulots : $Max \sum_{goulots} \text{Charge}$

Le système de production étant globalement sous-capacitaire, il est important d'exploiter au maximum les ressources goulots. Le mix-produits, de part la grande diversité des gammes de fabrication, influe énormément sur les déséquilibres de charge et sur la fluidité des en-cours. Son évolution est difficilement maîtrisable et le volume important de données et l'échelle du problème le rend difficilement prévisible par des moyens statistiques classiques.

Les variables de décision du problème de planification concernent la production à déclencher, pour les différentes ressources, pour chacune des périodes considérées, ainsi que la capacité à mettre en œuvre pour les ressources. Un plan d'approvisionnement est également établi et transmis aux principaux fournisseurs afin de leur permettre de planifier efficacement leur propre production et d'assurer la disponibilité des composants. Les données sont agrégées par famille de produits avec une périodicité mensuelle au niveau PIC et par référence produit avec une périodicité hebdomadaire au niveau PDP. C'est à ce niveau que l'affectation de produits ou familles de produits aux différentes unités de production est décidée.

Nous pouvons formaliser ces variables sous la forme suivante :

- Plan de production : $Q(p,t,r)$:
Quantité de produits p à produire durant la période t avec la ressource r .
- Plan de capacité des ressources critiques (Rough cut capacity planning) : $C(r,t)$
Capacité à mettre en œuvre sur la ressource r durant la période t .

3.3 L'exécution de la production

La fonction d'exécution de la production concerne le pilotage à court terme. Ses leviers d'actions sont l'ordonnancement détaillé et l'affectation des opérateurs présents sur les différentes ressources en fonction de leurs compétences.

Les fonctions du système d'exécution de la production en place sont :

- la gestion des ressources,
- l'ordonnancement,
- le routage des produits en cours de fabrication,
- l'acquisition des événements de production.

Les données d'entrée sont donc constituées des plans de production et de capacité présentés au paragraphe précédent. La performance du niveau d'exécution de la production est donc évaluée au regard de l'écart entre la production réalisée par rapport à la production planifiée dans le plan directeur de production, appelé *Taux de Respect PDP* :

$$\text{Min} \left(\sum_{\text{horizon}} \text{production_réalisée} - \sum_{\text{horizon}} \text{production_planifiée} \right)$$

La fonction d'exécution de la production a pour rôle de maximiser l'utilisation des ressources engagées. Son principal levier d'action est l'ordonnancement, permettant de minimiser les temps de réglages et d'assurer une charge continue aux ressources ouvertes. Les contraintes fixées à l'exécution de la production peuvent être formalisées comme suit :

- Maximiser le taux d'utilisation des machines :

$$\text{Max} \sum_{\text{ressource}} \frac{\text{Nb_pièces_bonnes_réalisées}}{\text{Nb_pièces_bonnes_théorique}(\text{capacité_engagée})}$$

- Maximiser l'efficacité de la main-d'œuvre :

$$\text{Max} \sum_{\text{ressource}} \frac{\text{capacité_MO_utilisée}}{\text{capacité_MO_engagée}}$$

L'expérience a montré que le niveau d'en-cours impacte directement la performance. En effet, un niveau d'en-cours trop élevé entraîne un surcroît de manutention et est générateur de non qualité, impliquant des relances et des réparations. Les capacités de stockage limitées peuvent également pousser à arrêter une ressource, éventuellement le goulot, pour des raisons de manque de place où stocker les produits. Inversement, un niveau d'en-cours trop bas fait courir le risque de ruptures de charge sur des ressources en cas de panne du processus précédent ou d'un mix-produits défavorable (le niveau de stock d'en-cours = Work-In-Process ou WIP) Par conséquent, nous pouvons également formaliser une contrainte de maintien du niveau d'en-cours entre un seuil haut et un seuil bas de bon fonctionnement déterminés par expérience :

$$\text{Seuil_bas_WIP} \leq \text{WIP}(t) \leq \text{Seuil_haut_WIP}$$

Par ailleurs, les objectifs de satisfaction client poussent à minimiser le temps d'écoulement à travers l'atelier appelé Lead Time. De plus, la réduction du temps d'écoulement entraîne de fait une réduction du niveau d'en-cours (Loi de Little).

$$\text{Min} \sum_{OF} \text{date}_{fin} - \text{date}_{début}$$

Ces contraintes et objectifs peuvent être désagrégés pour chacun des îlots en fonction des différents critères présentés précédemment.

3.3.1 L'optimisation du processus de débit

Le pilotage de l'outil de débit représente le problème le plus complexe dans la production de meubles : il poursuit deux objectifs qui peuvent être contradictoires :

- optimiser le rendement matière,
- faciliter l'écoulement des flux.

En effet, le panneau de particules représentant de 30 à 50% du prix de revient du meuble en kit, l'optimisation de son usage est cruciale, et un pour cent de taux de chute gagné représente un impact considérable sur la rentabilité du processus de production. L'optimisation du rendement matière tend vers l'augmentation de la taille des lots de production. La taille de série habituellement retenue permet d'atteindre un rendement matière au débit de l'ordre de 90%. Par ailleurs, la production « batchée » de lots importants pose en aval des problèmes d'écoulement de flux et d'encombrement des en-cours.

Le compromis choisi par l'entreprise pour traiter ce problème dual consiste à débiter les pièces « au meuble » : l'ensemble des pièces composant un même meuble est débité simultanément, dans un même plan de coupe, pour chaque lancement. Les tailles de lot sont donc étudiées en début de vie du produit, en prenant en compte les contraintes logistiques (adéquation avec la demande, écoulement des flux en production) et d'optimisation matière.

3.3.2 L'optimisation des flux de produits en cours d'usinage

La résolution des problèmes d'ordonnement a fait l'objet de nombreux travaux. La complexité des problèmes et le phénomène d'explosion combinatoire rendent impossible l'exploration exhaustive de l'ensemble des solutions possibles. Des algorithmes de programmation linéaire ou de type méta heuristiques permettent d'obtenir des résultats satisfaisants en terme d'optimalité. Cependant, comme l'illustre l'échec de l'implantation d'un outil d'ordonnement prédictif centralisé, l'échelle du problème d'optimisation de la production dans ce système rend délicate une résolution efficace par programmation linéaire : les évolutions du système de production durant leur élaboration diminuent la pertinence des solutions proposées. L'enjeu crucial aujourd'hui repose sur la fonction d'exécution de la production, qui a pour mission de permettre la mise en œuvre des solutions et d'alimenter avec des données pertinentes le système d'optimisation.

Le système d'exécution de la production de l'entreprise Parisot Meubles a été radicalement modifié au cours de ce travail de thèse. Le besoin d'optimiser la disponibilité de trésorerie a conduit à remplacer le système initial reposant sur un ordonnancement prédictif par un système réactif de type Kanban dans le but de maîtriser le niveau d'en-cours et de

réduire les temps d'écoulement. Ces deux systèmes d'exécution sont détaillés dans les paragraphes suivants.

3.3.3 L'alimentation continue de la ligne d'emballage

La performance de l'îlot emballage, ainsi que celle de l'unité UGV, dépendent essentiellement de l'efficacité main-d'œuvre : tout arrêt de chaîne génère une perte de performance coûteuse. Cependant, les leviers permettant d'assurer une alimentation continue de la ligne d'emballage ne sont pas directement actionnés par l'îlot emballage, mais par la logistique et par les îlots en amont.

3.4 Système initial : la production pilotée par un ordonnancement prédictif

Dans sa configuration initiale, les couches tactiques et opérationnelles de planification de la production étaient organisées en suivant un schéma de type MRP2.

3.4.1 Le déclenchement de la production

Un Programme Directeur de Production (PDP) définit la production hebdomadaire sur un horizon glissant de 18 semaines gelée à 4 semaines. Ce programme est établi par le service de logistique industrielle central et fixe le cadre de travail de chacune des unités de production, dont la performance est évaluée par un *Taux de Respect PDP*. Cet indicateur représente la part du PDP de la semaine *S* effectivement produit pendant la semaine *S*. Il permet de mesurer la performance de la production mais n'est toutefois pas représentatif de la satisfaction du client. Celle-ci repose sur la qualité du PDP, qui dépend pour partie des prévisions de vente fournies par le service logistique.

3.4.2 L'exécution de la production

Afin de mettre en œuvre ce PDP, l'unité utilise un logiciel d'ordonnancement de la production. Le calcul des besoins nets produit des OFs dits « de tête », qui représentent desancements de colis, et des « OF pièces » grâce à l'éclatement de la nomenclature, ce qui permet l'ordonnancement des opérations de production à l'aide des gammes de fabrication de chaque référence pièce. Il en résulte pour chaque machine d'un programme de production ordonnancé avec un horizon glissant d'une semaine. Cet ordonnancement est rafraîchi quotidiennement afin de prendre en compte les aléas tels que pannes, retards ou non-qualité, et de recalculer le planning afin d'assurer au maximum une charge continue à la ligne d'emballage, et d'assurer le respect du PDP, colis par colis.

Malgré ce rafraîchissement quotidien, les aléas survenant sur le terrain peuvent imposer des modifications de l'ordonnancement en temps réel, sur le terrain, par les opérateurs de production qui ne disposent pas d'une vue globale de la situation dans l'atelier. L'information est diffusée sur le terrain par trois vecteurs :

- les données techniques sont diffusées par le biais des Bons de Travail (BTs) qui accompagnent les lots de production et qui contiennent les informations telles que la gamme, les plans de perçage ou les programmes d'usinage.

- le planning de chaque machine est affiché sur un terminal d'atelier, également utilisé pour réaliser les déclarations d'événements de production (Début de lot, réglage, aléas, quantités produites et rebutées)
- les ajustements d'ordonnancement se font par voie orale : le responsable de l'îlot emballage ajuste l'ordonnancement proposé « sur le papier » et diffuse l'information oralement afin d'obtenir les bonnes pièces au bon moment.

Dans la réalité, les opérateurs sont autonomes dans le pilotage de leur machine, et chacun prend les décisions relatives à sa machine en fonction de sa perception de la situation (stock d'en-cours avant et après machine, lot en cours sur sa machine) et des objectifs (performance de sa ressource). Ainsi, il peut arriver que la chaîne d'emballage soit arrêtée par suite d'un mauvais choix d'ordonnancement sur une machine amont, par exemple dans le but de réduire les temps de réglage de cette machine.

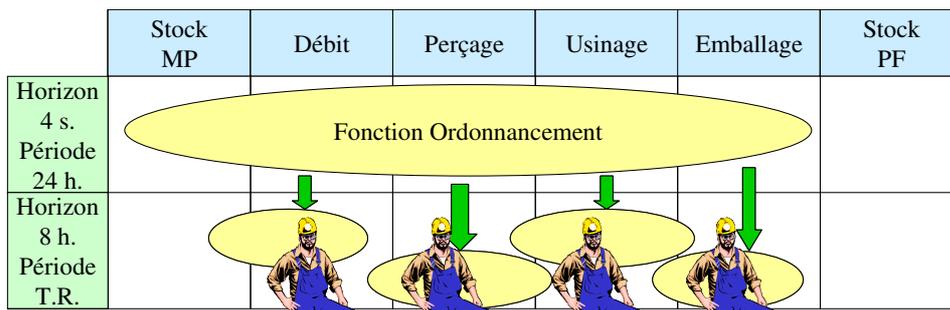


Figure 15. La visibilité dans le système de production piloté par un ordonnancement prédictif

3.4.3 Faiblesses identifiées

Les principales faiblesses liées à cette typologie de pilotage sont les suivantes :

- **Pertes de performance des ressources** dues à des décisions d'ordonnancement prises localement sans visibilité sur la situation ou sur l'impact global.
- **Manque de visibilité à court terme** : Les opérateurs, qui prennent une partie importante des décisions de pilotage sur le terrain, ne disposent que des informations qu'ils perçoivent visuellement ou leur parviennent oralement.
- **Manque d'outils d'aide à la décision sur le terrain** : en plus d'une perception partielle de la situation, les opérateurs ne disposent pas d'outils leur permettant d'évaluer la pertinence des différentes alternatives lors d'une décision. Cette pertinence n'est donc associée qu'au vécu et à l'expérience des opérateurs, et les choix effectués diffèrent d'une équipe à l'autre.
- **Manque de fiabilité des informations remontées du terrain** : les saisies étant entièrement manuelles, on constate des erreurs d'horodatage (événements déclarés en retard), de quantité ou de nature (nature des aléas).
- **Manque de granularité des informations remontées du terrain** : les événements de production étant déclarés manuellement, et cette saisie représentant une tâche à non-valeur ajoutée, celles-ci sont limitées.

- **Manque de fiabilité de l'ordonnancement prédictif** : l'incertitude de la production et les écarts entre la situation considérée par le système d'ordonnancement et la réalité du terrain réduisent la pertinence de l'ordonnancement prédictif.
- **Manque de réactivité à moyen terme** : le PDP figé à quatre semaines interdit de positionner un nouvel ordre de production au sein de cet horizon. Le temps de réponse à une commande imprévue est de 5 semaines.
- **Un important stock de produits finis**, qui génère des risques d'obsolescences et d'importantes immobilisations financières. Ce stock est en partie dû à la production sur prévisions et aux règles de lotissement implémentées, mais permet également d'absorber la forte saisonnalité des ventes.

3.5 Système actuel : la production pilotée en kanban

Dans un système Juste-à temps, la production est tirée par la consommation du client et non plus déclenchée en prévision des commandes client. Le système d'ordonnancement implanté est inspiré du kanban : la production est tirée par la consommation réelle du client, et l'ordonnancement est géré par la circulation d'étiquettes physiques associées à chacun des lots. Cependant, le fonctionnement ne s'apparente pas à un kanban traditionnel, une seule boucle étant définie, entre le stock de produits finis et le système de production. Ce mode de pilotage s'apparente à l'approche CONWIP (McClain *et al*, 1992) (Framinan *et al*, 2006). Le nombre important de références de pièces rentrant dans les différents colis (environ 8500), l'encombrement important des produits et les tailles de lot induites par les contraintes de rendement matière rend peu réaliste la mise en œuvre d'un stock supermarché de pièces. Le bon fonctionnement d'un tel outil repose sur une réactivité accrue du système de production, permettant de satisfaire la demande du client dans le délai convenu. Le fonctionnement est stable, des procédures figées définissant clairement les règles de gestion des flux. Une procédure spécifique permet la gestion des urgences basée sur des lots prioritaires, ce qui autorise la production rapide d'un lot. Le système peut se décomposer en un sous-système de gestion de stock, déclenchant la production et un système de pilotage de la production permettant la fabrication des produits dans les délais.

3.5.1 Le déclenchement de la production en Juste à Temps

Un système appelé Pilotek surveille la consommation client et déclenche les lots de production à partir du PDP en suivant le principe du remboursement de la consommation. Chaque référence est produite en quantité fixée pour toute sa durée de vie (elle peut éventuellement être ré-ajustée en fin de vie).

La consommation du stock de produits finis d'un lot déclenche automatiquement la production d'un nouveau lot (les lots de production sont déclenchés une fois par jour, le séquençage des différents lots au sein d'une même journée n'est pas contraint). Le nombre de lots à avoir en stock et en cours de production (correspondant au nombre d'étiquettes kanban) permettant la satisfaction du client est ré-évalué chaque mois en fonction des évolutions de la consommation.

Lors d'opérations spéciales ou pour générer de la charge dans les périodes d'activité faible, le service logistique peut déclencher des Avances de Production (AVP), qui généreront un surcroît du stock de produits finis.

3.5.2 L'exécution de la production en Kanban

Le pilotage de la production est assuré par un système basé sur des cartes Kanban. Bien que le déclenchement des lots de production soit tiré par la consommation client, les flux sont poussés dans l'atelier.

Une carte Kanban est affectée à un colis, c'est-à-dire que lors des opérations d'usinage, une carte kanban est associée à l'ensemble des pièces constituant un colis. Par conséquent, un Suko accompagne chacune de ces cartes. Le Suko, équivalent à un Bon de Travail, regroupe l'ensemble des informations nécessaires à la production des différentes pièces : nomenclature, gammes, numéros de plan (Figure 16). En parallèle, chaque îlot est doté d'un tableau, sur lequel est représenté un « train » : les étiquettes sont séquencées dans ce train, la plus prioritaire se trouvant en tête de train.

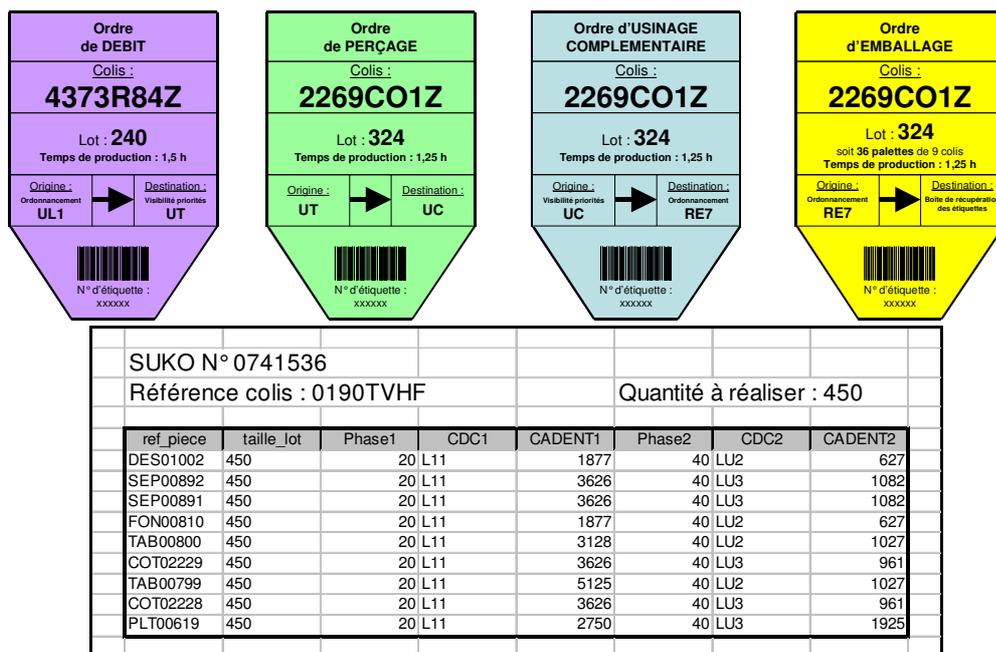


Figure 16. Exemples d'étiquettes et de suko

Lors du déclenchement d'un lot de production par le système d'accumulation virtuelle, l'agent planning de l'atelier va positionner, en queue du train de chacun des îlots, une étiquette représentant le lot à usiner. Une fois l'ensemble des tâches à réaliser au sein d'un îlot accompli, l'opérateur va recouvrir l'étiquette correspondante sur le tableau de l'îlot suivant, afin de signaler la réalisation de l'opération et la disponibilité de la matière au stade suivant (Figure 17). La disponibilité de l'ensemble des pièces terminées à l'emballage est matérialisée par la présence de l'ensemble des étiquettes, qui recouvrent l'étiquette d'emballage correspondante.

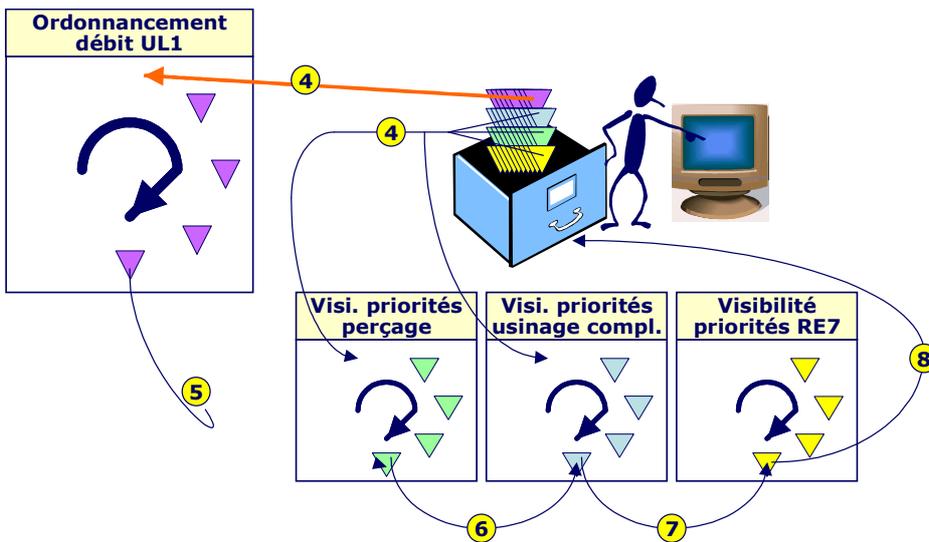


Figure 17. Circulation des étiquettes

Dans l'îlot Débit, les lots sont débités dans l'ordre du train, sous-réserve de disponibilité matière (panneau de particules et chants). L'horizon du train de 7 jours permet habituellement d'approvisionner la matière première (le temps de cycle panneau est de 5 jours, le temps de cycle du chant de 2 jours). Au cas où un approvisionnement manque, un symbole visuel (appelé magnet) signale l'anomalie et l'étiquette reste en tête du train jusqu'à ce que l'opération puisse être réalisée. Afin d'assurer des performances correctes, tant en terme de rendement matière que d'écoulement de flux, un fonctionnement à taille de lots fixés permet d'optimiser finement les différents paramètres lors de la création du produit.

Une fois l'opération de débit terminée, l'ensemble des pièces brutes est disponible pour l'usinage. Un opérateur de l'îlot débit va recouvrir l'étiquette correspondante du tableau de visibilité des priorités de l'îlot perçage afin de signaler la disponibilité matière. Les opérateurs de l'îlot perçage traitent les tâches dans l'ordre des étiquettes dans le train. Lors de la fin de l'usinage d'un lot, l'opérateur va parcourir le tableau afin de trouver la première opération disponible réalisable sur sa machine.

Le fonctionnement de l'îlot usinage complémentaire est similaire.

Lorsque l'ensemble des pièces à fabriquer pour un colis est terminé, et que les approvisionnements extérieurs sont disponibles, le lancement devient « Prêt à emballer ». Le responsable de la ligne d'emballage emballe donc les différents colis disponibles dans l'ordre du train.

Une fois l'opération d'emballage terminée, la déclaration de production est effectuée, les colis sont rangés en stock et les étiquettes classées dans un tiroir en attendant la prochaine utilisation.

La grande variété des produits et de la charge qu'ils induisent sur les différentes ressources, ainsi que les différences de temps d'écoulement entre les composants ne permettent pas toujours de respecter l'ordre du train. Les approvisionnements extérieurs étant calés sur le train d'ordre de la chaîne d'emballage, un écart trop important par rapport à celui-ci peut générer des ruptures liées au manque de composants.

Par ailleurs, les délais d'approvisionnements, généralement plus long que le délai de fabrication des semis-finis, conduit à une gestion asynchrone des approvisionnements. Les approvisionnements sont déclenchés à partir de prévisions, alors que la consommation est déclenchée par rapport à la consommation du client. Les écarts entre les prévisions et la consommation réelle peuvent induire l'absence des composants d'origine extérieure, ne permettant pas la production du colis, ou l'approvisionnement de composants qui ne sont finalement pas consommés en production et peuvent générer un stock de matière première obsolète.

3.5.3 Faiblesses identifiées

La mise en place d'un système de gestion des flux Kanban, s'il clarifie les flux sur le terrain et introduit un cadre de prise de décision, n'assure toutefois pas l'optimalité du fonctionnement global du système, notamment en terme de productivité (Matta et al, 2005).

Les lots de production sont déclenchés une fois par jour par Pilotek. A ce moment, l'agent planning de l'unité doit positionner un ensemble d'étiquettes en queue de train du tableau d'ordonnancement. Ces étiquettes sont équiprioritaires vis-à-vis de la demande client : l'ordonnancement peut donc prendre en compte les contraintes de la production. L'agent planning cherche donc intuitivement l'ordre qui permettra d'équilibrer au mieux les charges tout en respectant l'ordre d'emballage. La complexité importante du problème (entre cinq et dix lots de colis sont déclenchés quotidiennement, chacun constitué de sept pièces en moyenne avec des gammes différentes), ainsi que l'absence d'une vue globale des en-cours rendent cette tâche délicate.

Les étiquettes circulant sur les différents tableaux de visibilité des priorités représentent l'ensemble des lots de pièces correspondant à un lancement de colis. De plus, chaque tableau est affecté à un îlot, il regroupe donc plusieurs machines. La présence d'une étiquette dans le train représente donc l'ensemble des tâches à réaliser dans l'îlot pour l'ensemble des pièces correspondant à ce lancement colis. Le Suko associé permet d'identifier les tâches à réaliser grâce à la nomenclature du colis et aux gammes des différentes pièces. Les conducteurs de machines décident donc, dans cet ensemble de tâches à réaliser, l'ordre dans lequel les pièces seront usinées. Ils prennent cette décision en fonction des objectifs de performances de leur machine. L'absence de visibilité globale ne leur permet pas de prendre en compte la problématique globale d'écoulement des flux. La seule information relative au flux dont ils disposent est le nombre d'opérations restant à effectuer pour chaque pièce.

Le principal apport sur le fonctionnement global réside dans l'émergence de l'ordonnancement. Auparavant, la génération de l'ordonnancement occupait pleinement une personne pour produire un planning détaillé difficilement réalisable sur le terrain. Avec le système Kanban, l'ordonnancement se fait sur le terrain et les aléas sont traités directement sur le terrain. Cependant, ce nouveau système n'est pas parfait et un certain nombre de pistes d'amélioration subsistent :

- **L'ordonnancement réalisé n'est par optimal** : le système de circulation des étiquettes n'assure pas l'optimalité de la solution en terme de lead time notamment. Par exemple, il serait intéressant d'accélérer les pièces à gammes longues ou utilisant la ressource goulot afin de réduire le temps de cycle global du colis et le niveau de stock d'en-cours des pièces finies avant emballage, mais la rigidité apportée par l'application stricte des procédures ne permet pas de telles

solutions. Par ailleurs, le manque de visibilité globale ne permettrait pas aux opérateurs de prendre une décision globalement optimale.

- **La priorité entre boucles n'est pas gérée :** certaines ressources réalisent des tâches de sous-traitance en usinant des pièces pour les autres unités de production. Le délai de réalisation souhaité de ces opérations est inférieur à l'horizon des tableaux. Par conséquent, ces flux sont gérés comme des urgences, et les perturbations engendrées peuvent générer des ruptures de charge sur les chaînes d'emballage de l'unité fournisseur ou des unités clientes.
- **Pertes de performance :** Le logiciel d'ordonnancement utilisé précédemment permettait grâce à sa vision à une semaine d'effectuer des regroupements sur cette période afin d'optimiser les temps de réglage. Dans la logique Juste À Temps, la priorité client prime sur la productivité. Le manque de visibilité globale sur le terrain ne permet pas d'autoriser sur le terrain des regroupements de plusieurs colis afin de limiter les perturbations du flux.
- **Manque de visibilité :** comme évoqué précédemment, le manque de visibilité sur le terrain ne permet pas une optimisation au cours de l'exécution. De plus le système est peu interprétable, de par l'ordonnancement émergeant de l'écoulement des flux et de la demande client, et il est par exemple difficile d'évaluer une date de production. L'évaluation par simulation a été envisagée, mais l'absence d'une connaissance fine et précise de l'état du système de production en temps réel ne permet pas l'initialisation d'un modèle de simulation dans un état suffisamment proche du réel.

3.6 Synchronisation des flux physiques et d'informations

Le système d'information centralisé nécessite de disposer d'une image exacte des paramètres espace/temps/forme de l'état du système de production. Si le système de pilotage des flux physiques par étiquettes kanban permet la coordination des flux physiques et flux d'informations sur le terrain, le problème de synchronisation du système informatique reste entier : les responsables ont l'impression de piloter une boîte noire, n'ayant d'informations que sur les entrées et les sorties du système. Une application particulière permet la collecte, l'analyse et la synthèse des déclarations de production réalisées par les opérateurs à l'aide de terminaux de saisie (Figure 18). La saisie se fait par codes à barres afin d'accélérer et de fiabiliser la saisie.

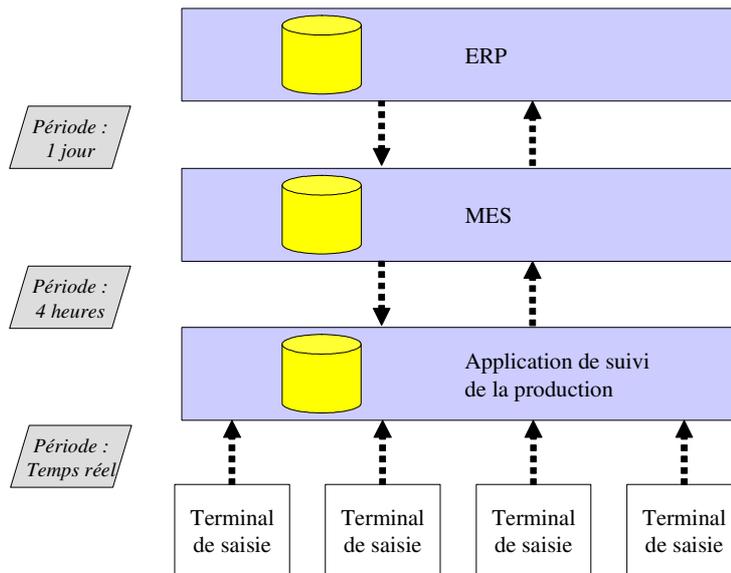


Figure 18. Architecture de collecte des données

L'application repose sur une base de données et des processus de synchronisation, d'analyse et de mise en forme des données pour l'ERP. L'intégration est faible : la transmission de données à l'ERP se fait par des fichiers de type csv (*comma separated value*) échangés quotidiennement.

La saisie manuelle, bien que partiellement automatisée, reste source d'erreurs :

- quantitatives : les quantités produites déclarées, comptées manuellement, peuvent être fausses,
- qualitatives : des erreurs de saisie peuvent survenir, les déclarations étant réalisées sur la mauvaise référence,
- temporelles : les déclarations ne sont pas réalisées de manière synchrone avec les événements survenant sur le terrain.

Ces imprécisions nuisent à la cohérence de la représentation informationnelle du système physique et perturbent les processus de gestion, notamment la relation avec le client pour la communication de dates de disponibilité.

3.7 Evaluation des performances du système de production

Afin d'évaluer la performance du système de gestion de la production, la définition d'un système d'indicateurs pertinents par rapport aux objectifs est nécessaire. Les contraintes évoquées dans les paragraphes précédents permettent de synthétiser l'objectif du système de production comme suit : produire en adéquation avec la demande, à moindre coût.

Le processus PIC en lui-même n'est pas évalué. La qualité des prévisions et leur pertinence par rapport à la demande client sont mesurées afin de perfectionner le système de prévisions.

La qualité du PDP n'est pas évaluée, cependant le processus d'élaboration assure le respect des contraintes de capacité finie des ressources et le respect du cadre fixé par le PIC.

La fonction d'exécution de la production est évaluée dans sa globalité par rapport au respect du cadre fixé par le PDP à l'aide d'un indicateur appelé Taux de Respect PDP.

Différents indicateurs de performance permettent de suivre en temps réel la production et de prendre les décisions d'exécution en accord avec les objectifs de coût :

- *Le Taux de Rendement Synthétique (TRS) :*

$$TRS = \sum_{\text{Horizon}} \frac{\text{Temps}_{\text{passé}}_{\text{à}}_{\text{réaliser}}_{\text{des}}_{\text{pièces}}_{\text{bonnes}}}{\text{Temps}_{\text{d'ouverture}}}$$

Le TRS permet de mesurer l'utilisation effective d'une ressource par rapport à son ouverture. Il est calculé quotidiennement sur le terrain. L'objectif est de maximiser le TRS, et les efforts sont particulièrement portés sur les ressources goulots.

- *Le taux d'efficacité main-d'œuvre :*

$$\text{Efficacité}_{MO} = \sum_{\text{Horizon}} \frac{\text{Effectif}_{\text{engagé}}}{\text{Effectif}_{\text{théorique}}}$$

Le taux d'efficacité main-d'œuvre permet d'évaluer la bonne utilisation des ressources humaines mises en œuvre. L'efficacité MO permet essentiellement de mesurer l'efficacité du processus d'emballage, fort consommateur de main-d'œuvre. En revanche, une grande partie des baisses de performance constatées sur cet indicateur sont le reflet de dysfonctionnements plus globaux : en effet, les arrêts de la chaîne d'emballage sont généralement dus à des problèmes sur d'autres processus : erreurs d'ordonnancement ne permettant pas d'alimenter la chaîne ou erreurs d'approvisionnements.

- *Le taux de remplissage des stocks d'en-cours :*

$$\text{remplissage}_{WIP} = \sum_{\text{Stocks}} \frac{\text{Palettes}_{\text{en}}_{\text{stock}}}{\text{Capacité}_{\text{de}}_{\text{stockage}}}$$

Le taux de remplissage des en-cours reflète l'état d'encombrement de l'atelier. Ce paramètre influe indirectement sur les indicateurs de productivité. Il est mesuré en continu et l'objectif est de le maintenir dans une fourchette permettant un bon fonctionnement de l'atelier.

- *Le temps d'écoulement moyen :*

$$\text{lead}_{\text{time}} = \frac{\sum_{\text{lancements}} \text{date}_{\text{début}} - \text{date}_{\text{fin}}}{\text{horizon} \cdot \text{Nb}_{\text{lancements}}}$$

Le temps d'écoulement moyen permet de mesurer la fluidité dans l'atelier. L'objectif est de le minimiser, afin d'augmenter la réactivité du système de production et donc de permettre de satisfaire le client dans un délai court en minimisant le niveau de stock de produits finis.

Cet ensemble d'indicateurs permet au quotidien de piloter l'exécution de la production, et également d'évaluer dans sa globalité l'efficacité du système de production.

4. Problématique de l'entreprise

L'état des lieux réalisé dans l'entreprise a permis d'identifier un certain nombre de problèmes que rencontre Parisot Meubles et qui rendent la gestion des flux non optimale. Les différentes causes identifiées impactant la performance logistique de l'entreprise sont synthétisées sur la Figure 19.

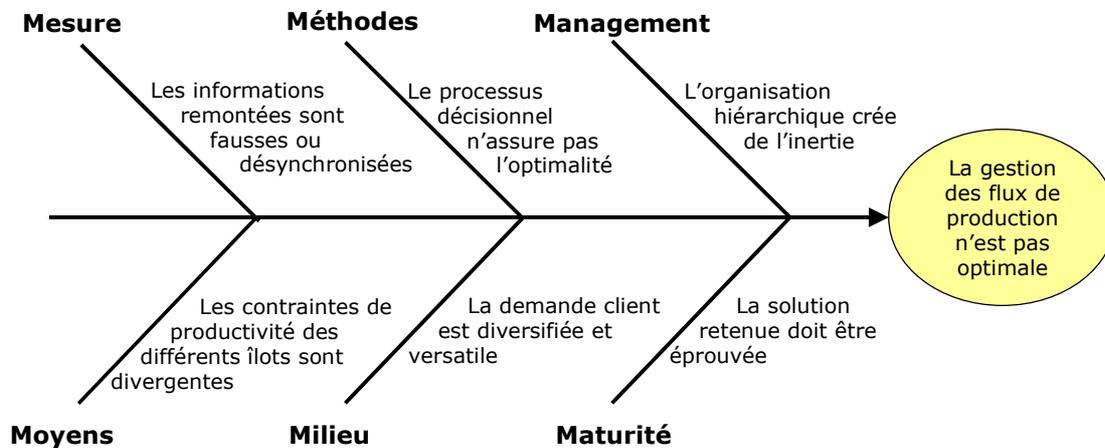


Figure 19. Diagramme causes-effets : causes identifiées de non optimalité du pilotage des flux

4.1 (Mesure) Les informations remontées sont fausses ou désynchronisées

Le maintien d'une représentation du système physique portée par le système d'information repose intégralement sur des saisies manuelles ou semi-automatiques (utilisation de codes à barres), en plus d'être consommateur de ressources humaines, entraîne des divergences entre l'état réel du système de production et l'image utilisée pour la prise de décision. Ces divergences peuvent être de trois types :

- qualitatives : déclaration d'une mauvaise référence
- quantitatives : erreur dans la quantité déclarée
- temporelles : décalage temporel entre la survenue d'un événement et sa déclaration.

Si des solutions technologiques apparaissent, l'impact de la justesse des informations remontées est difficilement quantifiable, ce qui rend délicate la justification d'un investissement.

4.2 (Méthodes) Le processus décisionnel n'assure pas l'optimalité

Le système d'ordonnancement par cartes kanban n'assure pas l'optimalité de la solution mise en œuvre. En effet, l'application stricte des procédures impose de respecter scrupuleusement l'ordre des étiquettes. Dans certaines situations, l'inversion de l'ordre des étiquettes permettrait d'éviter des ruptures de charge à l'emballage. Les décisions prises sur le terrain sont généralement prises sans capacité à évaluer finement leur impact. Les décisionnaires de terrain n'ont parfois pas conscience des contraintes plus globales. Par exemple, l'interversion d'ordre pour éviter une rupture à l'emballage peut générer une autre rupture, quelques heures plus tard, et de plus grande ampleur. Cependant, les règles ne sont pas définitivement figées et les bonnes pratiques peuvent être entérinées dans le but d'améliorer la performance globale du système. Il est cependant difficile d'évaluer a priori l'impact de modifications des règles de fonctionnement. Des évaluations sont généralement réalisées de manière statistique, et les phénomènes dynamiques rencontrés lors de la mise en œuvre (variabilité des temps opératoires et du mix-produits, phénomènes liés au flux tels que le niveau d'en-cours, aléas) peuvent parfois entraîner des résultats très différents de ceux attendus.

4.3 (Management) L'organisation hiérarchique crée de l'inertie

Si la mise en œuvre d'un système kanban, dans lequel beaucoup de décisions de pilotage sont prises à même le flux, réduit considérablement l'inertie du système, la gestion des aléas nécessite généralement l'intervention des niveaux hiérarchiques supérieurs. Typiquement, une modification de l'ordre d'emballage doit être validée par le responsable de l'emballage, après s'être assuré de la disponibilité des composants. Ce processus génère de l'inertie, d'une part par le nombre d'étapes à mettre en œuvre, et d'autre part car il fait appel à des ressources qui ne sont pas disponibles en permanence (les responsables ne sont pas présents 24 heures sur 24, et pas disponibles en permanence en bord de ligne).

4.4 (Moyens) Les contraintes de productivité des différents îlots sont divergentes

Chacun des îlots poursuit des objectifs différents propres au processus mis en œuvre. Ces objectifs différents ne sont pas toujours en adéquation avec les objectifs globaux fixés pour l'atelier dans son ensemble. Notamment au niveau de l'îlot débit, la recherche de performances optimales en termes de productivité et de rendement matière conduirait à des tailles de lots très importantes, ce qui perturberait considérablement l'écoulement des flux et par conséquent les performances des îlots aval. De même, l'optimisation de l'usinage (entre autre le regroupement permettant de minimiser les changements de série) peut générer des ruptures de flux à l'emballage. De plus, lors de la prise d'une décision sur le terrain, les seules informations dont disposent les décideurs de terrain sont la perception qu'ils ont de la situation et les échanges oraux avec les autres acteurs. Le système d'information en place, s'il satisfait aux exigences des fonctions de contrôle de gestion et de pilotage logistique à court ou moyen terme, ne permet pas de diffuser, en temps réel sur le terrain, les décisions d'ordonnancement prises.

4.5 (Milieu) La demande client est diversifiée et versatile

La demande client a évolué vers plus de différenciation et de service, entraînant une augmentation importante du nombre de références et une compression des délais. De plus, les pressions économiques poussent à réduire le volume de stock, que ce soit en composants, en en-cours ou en produits finis, afin de réduire la trésorerie immobilisée. Cette évolution des contraintes se traduit, dans le système de production, par une complexification des processus de transformation (augmentation du nombre de phases dans une gamme de fabrication, utilisation de ressources spécialisées), et par la réduction de la taille des séries. Les installations (ressources de production, de manutention et de stockage) sont, quant à elles, dimensionnées pour produire de grandes quantités d'un nombre limité de références. Cette divergence entre les critères de conception du système de production et la réalité complexifie la gestion en introduisant des contraintes fortes de productivité (temps de réglage élevés, stocks d'en cours limités).

4.6 (Maturité) La solution retenue doit être éprouvée

Le choix d'un système de pilotage de la production doit répondre à certaines exigences, notamment liées au fait que le système physique de production est existant, et pas totalement flexible, et doit également apporter des preuves de robustesse et de performance avant d'être mis en œuvre : en effet, la rentabilité de l'entreprise est directement impactée par la performance du système de production, et un arrêt pour cause de défaillance du système de pilotage n'est pas envisagé. L'enjeu que représente le changement du mode d'exécution de la production ne donne pas droit à l'erreur. Si une perte de productivité est acceptable pendant une durée maîtrisée permettant d'affiner les paramètres du système, la performance et la fiabilité de l'approche proposée doit être validée a priori. Les avantages mis en avant comme la réactivité ou la baisse du niveau de stock d'en-cours doivent être préalablement quantifiés afin de justifier l'investissement nécessaire au changement de mode de pilotage.

De plus, le système de pilotage doit pouvoir traiter les problèmes d'échelle inhérents à la taille et à la complexité du système de production. En effet, certaines propositions affichent des résultats très prometteurs sur des cas d'écoles, ou sur des plates-formes de laboratoires simples, mais leurs performances à l'échelle d'un système industriel réel ne sont pas démontrées. Compte tenu de l'enjeu évoqué précédemment, l'industriel souhaite un système de production éprouvé, dont les caractéristiques de robustesse, de stabilité et de performances sont montrées à l'échelle réelle,

4.7 Formulation de la problématique

Afin de piloter efficacement ses flux de produits, l'entreprise est passée d'un système de pilotage centralisé dont la principale lacune était le manque de réactivité aux aléas, à un système kanban réactif mais ne permettant pas une vision globale sur l'état du système de production. L'ensemble des unités de production du groupe Parisot admet des similarités, et la solution de pilotage de l'un peut être assez simplement transposée aux autres. Par conséquent, l'unité UGV a été choisie comme archétype du problème. Notre objectif est donc de définir une architecture de pilotage pour l'unité UGV, qui sera transposable aux autres unités de production.

La formalisation des objectifs et contraintes du et contraintes du système de production présentée dans ce chapitre nous permet de déduire la problématique industrielle suivante :

- Comment *optimiser la gestion des flux*, notamment comment maîtriser au mieux le niveau d'en-cours pour faire face à la complexification du mix-produits ?
- Comment obtenir et exploiter une représentation juste de l'état du système de production en *temps réel* ? Quelles *informations* permettraient d'améliorer la *pertinence des décisions* prises sur le terrain et leur *cohérence* par rapport aux objectifs ?
- En quoi l'« *activation* » *du produit* dans les processus décisionnels permettra-t-elle d'optimiser les performances ?
- Comment montrer la *pertinence* et la *maturité* d'une proposition d'architecture de pilotage ?

Synthèse :

Ce premier chapitre décrit le système industriel objet de l'étude, et notamment les problèmes de pilotage des flux rencontrés et les différentes solutions déjà mises en œuvre. Notamment, les forces et faiblesses d'un système de pilotage centralisé prédictif et d'un système de pilotage distribué réactif sont mises en évidence.

Cette formalisation des objectifs et contraintes de pilotage du système de production permet de faire émerger une problématique industrielle globale au groupe Parisot. Cependant, dans ce travail de thèse, nous nous focaliserons sur le problème propre à l'unité UGV de Parisot Meubles.

Chapitre 2 : Contexte Scientifique de la thèse

Objectifs :

Le contexte industriel a fait émerger une problématique d'exécution de la production : comment assurer la performance globale tout en étant réactif aux aléas ? Dans ce chapitre, différentes approches de résolution du problème de pilotage de la production sont présentées et leurs forces et faiblesses sont analysées en regard des problèmes et exigences soulignés dans le chapitre précédent.

Ces dernières décennies ont vu émerger dans le domaine de la recherche de nombreuses propositions concernant le pilotage des systèmes de production, tant sur des aspects organisationnels que sur les stratégies de pilotage. Cependant, ces approches « classiques » ont en commun de se focaliser sur les ressources et de ne pas considérer le produit comme une entité active dans la boucle de contrôle.

Par système de pilotage de la production, nous entendons l'ensemble des processus, ressources et acteurs d' « action sur » et d'observation de la production, afin d'assurer la réalisation des produits souhaités, au meilleur coût, dans les délais impartis et avec la qualité souhaitée.

Dans ce chapitre, les approches présentant des réponses aux questionnements évoqués dans le premier chapitre sont étudiées, notamment quant à leur applicabilité industrielle, en montrant le cheminement qui a amené certains chercheurs à proposer des modèles de pilotage plus hétérarchiques considérant le produit comme un agent potentiellement actif.

1. Le pilotage centralisé des systèmes de production

La complexité des problèmes traités et la lourdeur des méthodes d'optimisation mises en œuvre ont initialement conduit à décomposer le système de pilotage de la production en différents niveaux, en fonction de l'horizon de la décision (pilotage stratégique, tactique ou opérationnel) et du niveau d'agrégation des données manipulées (famille de produits, produit, composant). La structure à cinq niveaux MPCS – Manufacturing Planning and Control System du MRP2 (Vollman, 1992)(Figure 20) est la structure la plus répandue de planification de la production, qui a pour but de répondre aux questions « *Que produire ? quand ? et combien ?* ».

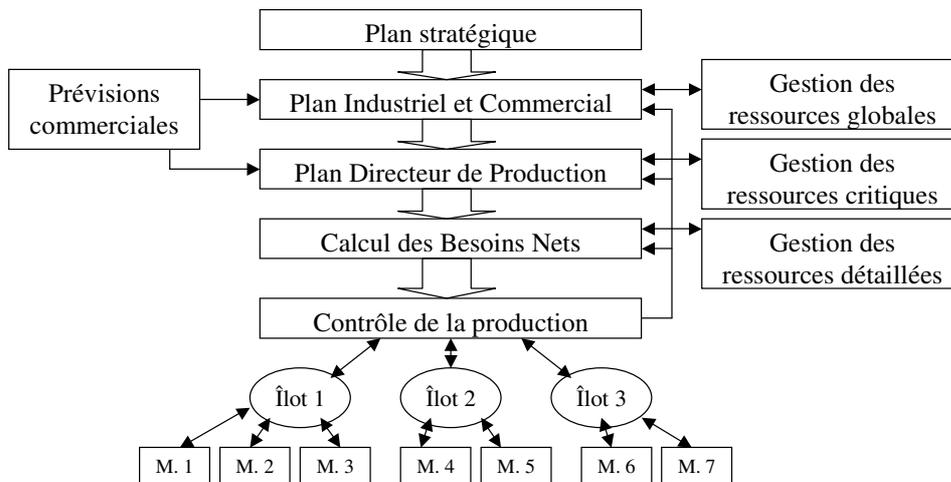


Figure 20. La structure Manufacturing Planning and Control System (Vollman, 1992)

Les différents niveaux de décision se distinguent par d'autres caractéristiques que la seule étendue de leur horizon (du long terme au très court terme). Parmi les autres facteurs importants permettant de différencier ces niveaux, on citera par exemple (Crama, 2002):

- le degré d'irréversibilité des décisions,
- la diversité des fonctions de gestion impliquées,
- le degré d'agrégation des informations, des catégories de produits et de ressources,
- le degré d'incertitude,
- la prise en considération ou l'abstraction de certains détails, etc.

Dans une architecture de ce type, la cohérence de l'ensemble est apportée par le biais d'une intégration par l'information (Integration in Manufacturing). Les niveaux de décisions supérieurs engendrent des contraintes qu'il est nécessaire de prendre en compte aux niveaux inférieurs et, réciproquement, les informations utilisées lors de toute prise de décision remontent généralement de niveaux inférieurs. La complexité des traitements, le manque de

souplesse des applications et les difficultés d'intégrations conduisent à échanger des volumes importants de données, en utilisant des mécanismes lourds de mise à jour.

La mise en œuvre de systèmes de pilotage de type MPCS nécessite une importante alimentation en données afin de fournir aux fonctions de gestion des données valides sur l'état de la production. Ce besoin permanent d'informations a conduit au développement d'architectures intégrées basées sur l'utilisation de l'informatique, comme par exemple le paradigme CIM (Computer Integrated Manufacturing) (ENV, 1990), (Kosanke 1995).

Les architectures intégrées assurent la cohérence globale du système, en intégrant les différentes fonctions de gestion de l'entreprise autour d'une base de données commune au sein des Progiciels de Gestion Intégrés (PGI – ERP Enterprise Resource Planning). L'organisation hiérarchique permet d'avoir une vision globale du problème de pilotage, ce qui procure la stabilité ainsi que la capacité à optimiser globalement les décisions prises. Cependant, de telles architectures introduisent de la lourdeur dans la prise de décision et fait perdre de la réactivité au système de production. L'introduction des outils de planification avancée (APS – Advanced Planning System) a permis de planifier l'ensemble des flux de la chaîne logistique (matières, informations et financiers) et de synchroniser et d'optimiser les activités et leurs interfaces, de façon globale et collaborative, en fonction d'objectifs globaux (Forget et al, 2007)(Thomas, 2004). Cependant, si les APS permettent de réduire l'inertie du système décisionnel, ils nécessitent tout de même pour être efficaces de disposer d'une vue complète, juste et en temps-réel de la situation du système de production.

La fonction ordonnancement dans les systèmes centralisés

Le premier chapitre a fait état de difficultés à piloter efficacement les flux sur le terrain en réponse aux aléas, afin de rester au plus près de la solution optimisée établie a priori. Les leviers dont disposent les décideurs de terrain pour atteindre leurs objectifs de satisfaction client et de productivité sont du domaine de l'ordonnancement : un problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement) et de contraintes portant sur la disponibilité des ressources requises.

La fonction d'ordonnancement est généralement supportée par des outils informatiques permettant d'établir un ordonnancement prédictif, ré-évalué périodiquement (généralement une ou plusieurs fois par jour) et assurant une solution optimisée par rapport aux objectifs fixés.

De très nombreux travaux traitent des problèmes d'ordonnancement. Si la complexité des problèmes traités ne permet pas d'assurer l'optimalité de la solution (un problème d'ordonnancement à l'échelle industrielle est généralement NP complet), de nombreux outils permettent d'établir des solutions satisfaisantes au regard de critères particuliers, comme la minimisation du temps total de réalisation de l'ensemble des tâches (makespan), la minimisation du nombre d'ordres réalisés en retard, la maximisation de la satisfaction client, la maximisation de la production (throughput), la maximisation du profit ou la minimisation des coûts de production. Les mécanismes permettant d'établir des solutions optimales sont lourds, et les temps de calcul sont très importants, par rapport à la dynamique du système considéré. Pour pallier à ce défaut, des méthodes approchées, ou permettant l'identification rapide d'un optimum local ont été développées, comme les méta-heuristiques, les algorithmes génétiques ou l'utilisation de modèles réduits focalisés sur les goulots par exemple. Ces solutions établies a priori sont lourdes à mettre en œuvre à l'échelle du problème traité, considèrent généralement les paramètres comme figés, et ne prennent pas en compte des

phénomènes tels que la variabilité des temps opératoires ou les pannes machines, événements pourtant fréquents lors de l'exécution des ordonnancements.

Le principal problème soulevé par notre problématique ne réside pas dans la génération d'une solution optimisée, mais plutôt dans la non-optimalité des solutions adaptées sur le terrain en fonction des aléas et réellement mises en œuvre. Différentes approches permettent de prendre en compte les phénomènes dynamiques, soit en les prenant en compte dès la construction de l'ordonnancement afin de proposer un ordonnancement robuste, soit en permettant de reconsidérer en temps réel une partie de l'ordonnancement pour prendre en compte des événements imprévus. Ces approches peuvent être classifiées comme « hors-ligne » pour les premières et « en ligne » pour les secondes.

L'ordonnancement robuste face aux aléas

La robustesse de l'ordonnancement représente sa capacité à rester réalisable malgré la survenue d'événements imprévus. Un premier type d'approche consiste à intégrer lors de la génération de l'ordonnancement des paramètres de variabilité des grandeurs réelles (taux de panne des machines, variabilité des temps opératoires, taux de rebuts), afin de prévoir des marges d'erreurs permettant de maintenir la pertinence de l'ordonnancement, sous réserve que les phénomènes stochastiques soient correctement modélisés.

(Artigues et al, 2005) proposent d'améliorer la flexibilité de la solution proposée, en ne proposant plus un seul ordonnancement, mais une famille d'ordonnements réalisables. Une famille d'ordonnement représente l'affectation ordonnée de groupe de tâches à chacune des ressources, l'ensemble des tâches d'un même groupe étant totalement permutable. La Figure 21 montre un exemple de famille d'ordonnements, chacun des quatre ordonnancements présentés permettant de satisfaire la demande client. Un algorithme polynomial permet d'évaluer le temps de réalisation dans le pire des cas. Le problème est ensuite décomposé en autant de problèmes plus simples d'ordonnement à une machine (séquençement) que le système compte de ressources, avec un objectif global de minimisation du temps total (makespan).

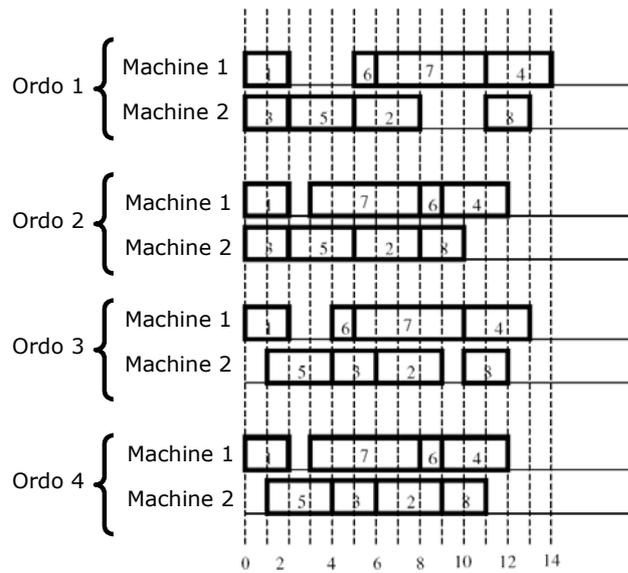


Figure 21. Un exemple de famille d'ordonnancement (Artigues et al, 2005)

Une seconde approche consiste à utiliser un modèle stochastique du système de production étudié, plutôt qu'un modèle déterministe, permettant d'intégrer a priori l'incertitude des variables. Par exemple, (Balasubramanian et al, 2002) utilisent un modèle de programmation linéaire en nombres entiers afin de prendre en compte la variabilité des temps opératoires.

L'approche stochastique présentée précédemment implique d'identifier au préalable les lois de variabilités des paramètres du système, c'est-à-dire de disposer d'un historique significatif de l'ensemble des paramètres. La collecte et l'analyse de ces données sont un processus particulièrement long et parfois impossible si l'historique est inexistant. De plus, le temps de calcul des moteurs d'optimisation, dans le cas d'utilisation de modèles stochastiques, est souvent long. Dans de telles situations, l'utilisation de la théorie des ensembles flous représente une alternative pour modéliser l'imprécision et l'incertitude des données d'entrées, en disposant de peu de détails sur la variabilité des paramètres, et avec des temps de calcul plus courts. (Balasubramanian et al, 2003) modélisent l'incertitude dans les temps d'exécutions à l'aide d'ensembles flous. Un programme linéaire en nombres entiers permet d'évaluer le temps total de réalisation, dans le pire des cas et dans le meilleur des cas. (Yimer et al, 2007) utilisent une approche similaire, prenant en plus en compte les temps de réglage et leur variabilité, mais en se basant sur un algorithme génétique afin de réduire le temps de calcul. Toutefois, l'utilisation de la théorie des ensembles flous pour résoudre des problèmes d'ordonnancement est assez récente et la pertinence de ces approches sur des problèmes de dimension industrielle n'a pas encore été prouvée. (Geneste et al, 2003) s'appuient également sur la théorie des ensembles flous pour prendre en compte l'incertitude des ordres de production eux-mêmes : le système prend alors en compte l'incertitude dans le déclenchement ou non des ordres pour proposer une date de disponibilité prévisionnelle.

Si les techniques présentées précédemment permettent de générer un ordonnancement robuste ou flexible, il est également possible d'analyser a priori la performance et la robustesse dans un contexte incertain d'un ordonnancement généré à l'aide d'outils déterministes classiques en utilisant la simulation. La simulation, habituellement utilisée pour

la conception et le dimensionnement des systèmes industriels, devient un outil permettant d'évaluer son comportement à court terme. (Cardin, 2007) utilise une simulation en ligne dite pro-active dans une démarche d'aide au pilotage en temps réel d'une cellule flexible de production. Ce travail met en évidence une contrainte essentielle d'initialisation du modèle de simulation dans un état cohérent avec l'état du système réel afin de donner des résultats pertinents. Ce problème est traité en associant les technologies d'identification automatique et un observateur également basé sur un modèle de simulation. Dans (Klein et al, 2008), nous présentons une structure permettant la collecte en temps réel des événements de terrain reposant également sur les technologies d'identification automatique, et permettant d'alimenter en temps réel un modèle de simulation afin d'évaluer différentes alternatives d'ordonnancement. Il est toutefois à noter que, comme pour les approches d'ordonnancement stochastique, l'utilisation de modèles de simulation peut parfois induire des temps d'évaluation des différentes alternatives assez longs. La technique de réduction des modèles de situation présentée dans (Thomas et al, 2005) permet, par exemple, de ne représenter que les goulots afin de réduire considérablement les temps de calcul.

Ordonnancement réactif

Une seconde approche permettant la robustesse aux perturbations consiste à reconsidérer régulièrement (de manière périodique ou événementielle) l'ordonnancement en fonction de l'évolution réelle du système de production. Les décisions de ré-ordonnancement peuvent être prises de façon centralisée ou distribuée. Les approches reposant sur une architecture décisionnelle seront présentées dans les paragraphes 2 et 3 du présent chapitre.

Les travaux recensés dans la littérature traitant du problème d'ordonnancement réactif en production traitent essentiellement de deux types de perturbations : la modification des ordres de production (changement de quantité, de référence, ajout ou suppression d'ordres) et l'indisponibilité des machines (pour cause d'absence, panne, ou maintenance). Le but de l'ordonnancement réactif est de donner une réponse immédiate aux événements imprévus en corrigeant de façon dynamique l'ordonnancement prédictif préalablement établi. Deux approches existent : la première consiste à ré-ordonner l'ensemble des tâches non-réalisées à partir du moment où survient l'événement (ré-ordonnancement), la seconde repose sur des techniques permettant de reconsidérer simplement et rapidement une partie de l'ordonnancement.

Les approches de ré-ordonnancement s'appuient sur des outils similaires à l'ordonnancement. Par exemple, (Ruiz et al, 2001) utilisent un système de surveillance des défauts (Fault Diagnosis System - FDS) couplé avec un module d'optimisation de l'ordonnancement afin de réagir aux aléas comme l'indisponibilité d'une ressource ou la variation des temps opératoires. Lorsqu'un aléa significatif survient, le FDS active le module d'ordonnancement, basé sur un réseau de neurones associé à un système expert, afin de minimiser l'impact de la déviation sur l'ordonnancement non-encore réalisé. (Kanakamedala et al, 1994) proposent une heuristique permettant de sélectionner l'alternative représentant le moindre impact sur l'ordonnancement d'origine, permettant le décalage temporel des ordres (time shifting) et l'utilisation de ressources alternatives.

Enfin, des méthodes permettent de reconsidérer partiellement l'ordonnancement afin de l'améliorer localement ou de maintenir sa cohérence en cas d'aléa. (Roslöf et al, 2001) proposent un algorithme basé sur la programmation linéaire en nombres entiers, modifiant l'ordonnancement d'origine en relâchant, de manière itérative, un ensemble de tâches et en optimisant leur allocation.

Synchronisation flux physiques/ flux d'informations et de décisions : apports des technologies d'identification

Les efforts de structuration et de standardisation, bien que permettant aux différents processus de pilotage de la production ou de gestion de disposer d'une vision commune du système, ne résolvent pas le problème majeur de synchronisation du système d'information/décision avec le système physique de production (Plossl, 1985),(Vollman et al., 1992).

En effet, le flux physique est généralement visible, lent et onéreux, alors que le flux d'informations est lui invisible, rapide et généralement peu onéreux (Thomas, 2004). Les informations considérées peuvent être verbales, informatiques, écrites... et plus ou moins structurées et formalisées. Cependant, la masse de données collectées de plus en plus importante, la structure de plus en plus complexe des systèmes d'informations et la complexité des traitements d'optimisation ont souvent conduit à mettre en place des transferts de données périodiques induisant une inertie dans le système d'information et ralentissant les flux d'informations (Figure 22).

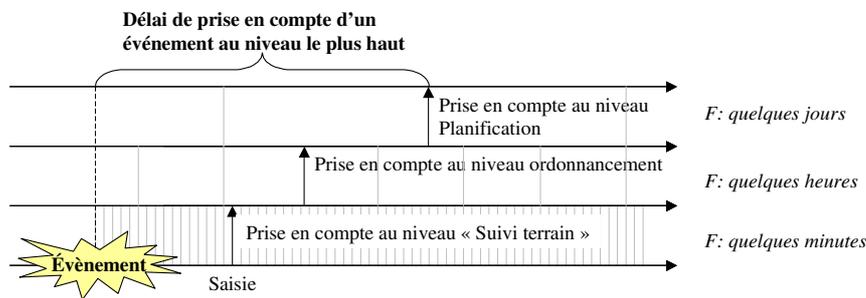


Figure 22. Désynchronisation ascendante des flux d'informations

La séparation de fonctions de routage, planification et ordonnancement par rapport à la réalité de l'atelier, mène à constater qu'il y a pas ou peu de correspondance entre les décisions prises et l'activité des ressources exécutant les tâches qui en résultent (Thomas, 2004). La synchronisation du système décisionnel avec le monde physique se fait de façon synchronique : l'échange de données est de type transactionnel, et les décisions de contrôle sont prises périodiquement sur un horizon donné (Figure 23). Le découpage entre niveau de gestion et niveau d'exécution fait cohabiter deux types de systèmes qui ne communiquent pas ou mal car leurs objectifs, leurs bases de temps, leurs utilisateurs et leurs technologies diffèrent alors qu'ils ont besoin de partager des informations communes (Iung, 2002).

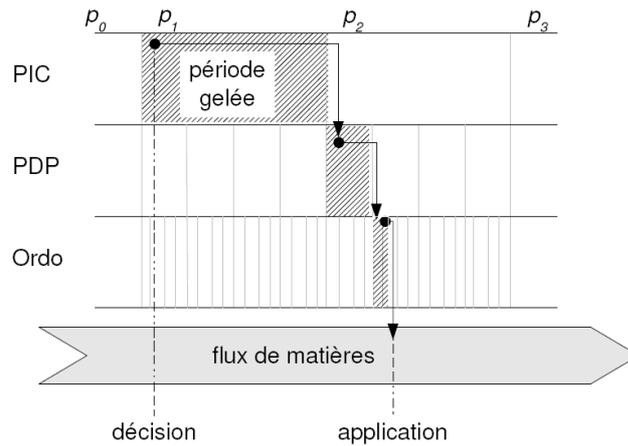


Figure 23. Désynchronisation descendante des flux de décisions dans un système MRP2 (Thomas, 2003)

L'émergence actuelle des technologies d'identification automatique apporte des réponses au problème de synchronisation des flux : en effet, il devient possible d'identifier instantanément chaque instance de produit, voire d'y associer des informations pertinentes. Cette assimilation du flux d'information au flux physique assure de fait la synchronisation.

Différentes approches permettent de mettre en oeuvre l'identification automatique des produits :

- **L'approche biométrique** : basée sur les empreintes chimiques et génétiques, cette technique permet d'identifier un produit à travers sa constitution ou sa structure génétique.
- **La technologie code à barres** : La technologie code à barres est la technologie la plus utilisée pour l'identification rapide de produits, notamment au travers du standard EAN 13 universellement utilisé dans les applications commerciales. Si le code à barres à une dimension n'est pas très adapté à une automatisation des opérations de lecture, le développement du code barre 2D, associé aux technologies récentes de vision, permet une lecture en masse et à distance. De plus, un code barre 2D améliore la robustesse (aux saletés, au déchirement) et augmente nettement la quantité d'informations stockable sur une même surface.
- **Les technologies de vision** : l'identification se fait par les caractéristiques morphologiques du produit (forme, couleurs). Les technologies de vision sont plus utilisées pour assister l'opérateur dans des opérations de contrôle visuel (par exemple l'appairage de planches de bois similaires en menuiserie, ou le contrôle de position de différents usinages) que pour réaliser l'identification des produits. En effet, l'identification par vision est peu robuste aux transformations du produit.
- **La technologie RFID** : La technologie RFID (Radio Frequency Identification) repose sur des puces électroniques, capables de stocker de l'information et de la transmettre à distance par ondes radio. Différentes technologies existent, offrant des caractéristiques particulières (distance de lecture, capacités de lecture ou lecture/écriture, capacité mémoire...)

Quelle que soit la technologie utilisée, la disponibilité d'informations à la fois sur le procédé et sur le produit lui-même amène à une amélioration de la visibilité (ou observabilité)

dans l'espace des états de l'opération contrôlée (McFarlane et al, 2003). L'identification automatique est donc un complément aux informations capteurs provenant directement du procédé (Figure 1). Si cette visibilité accrue permet incontestablement d'améliorer les performances des systèmes classiques d'exécution de la production, elle permet également d'envisager de façon réaliste la mise en œuvre de systèmes de pilotage de la production distribués, intelligents et réactifs.

La section précédente a mis en évidence l'important besoin d'informations justes et « fraîches » pour assurer la qualité du pilotage de la production. En règle générale, les fonctions de collecte de l'information sont orientées processus, et peu d'informations sur le produit lui-même sont collectées. La nomenclature est utilisée pour la préparation des composants, l'ordonnancement détaillé et l'exécution de la production est guidée par l'affectation de tâches aux différentes ressources.

L'introduction des technologies d'identification automatique dans un système classique de gestion de la production permet de l'alimenter constamment en données synchrones et justes sur les évolutions chacune des instances de produits, en complément des informations concernant l'état du système de production (Figure 24).

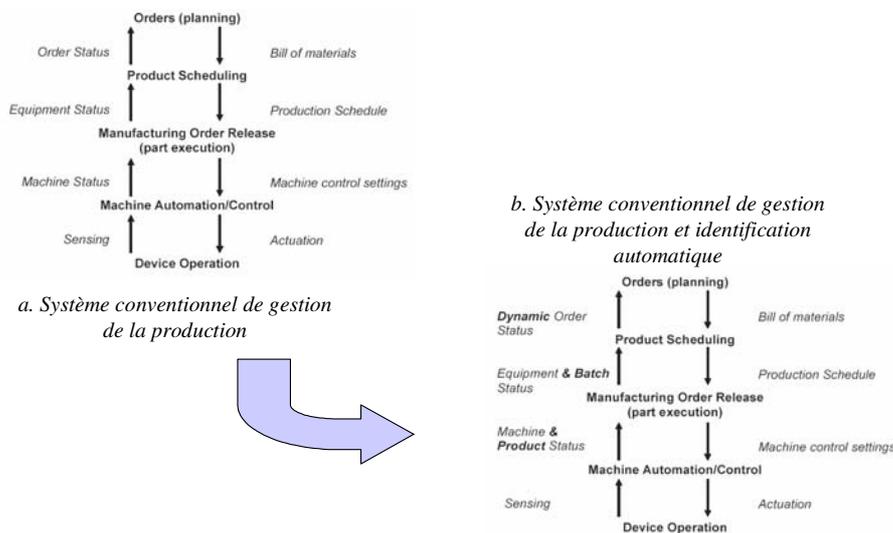


Figure 24. Impact de l'identification automatique sur les systèmes classiques de gestion de production (McFarlane et al, 2003)

La possibilité d'information précise et en temps réel sur l'identité, le statut et les spécifications du produit aide à réduire les délais et les risques d'erreurs dans la gestion des stocks de matière première, les opérations de production et la gestion des produits finis. McFarlane a fait les observations suivantes au sujet de l'impact des informations provenant de l'identification automatique des produits dans un système conventionnel (hiérarchique) de gestion de la production (McFarlane et al, 2003) :

- Généralement, dans les boucles de planification (*planning*) et d'ordonnancement (*Scheduling*), la collecte d'information permet de définir de manière approximative l'état d'un lot particulier de produit ou d'une commande client (en attente, débuté ou terminé). L'information sur l'état d'un lot est typiquement collectée de manière périodique, par des saisies manuelles ou par des moyens indirects. Ce type de collecte,

- résultant dans un ensemble de données hétérogènes, peut être intégralement remplacé par la collecte et l'analyse de données d'identification automatique des produits.
- L'état des équipements est le reflet des conditions d'opérations, qui permettent de suivre le respect ou non du planning. Ce suivi est grandement amélioré par une information d'état du produit qui indique sans ambiguïté la terminaison ou non d'un lot. Cette information améliore l'efficacité des fonctions de planification et d'ordonnement.
 - La disponibilité d'information sur les produits et leurs composants améliore de manière significative le processus de déclenchement de la production, par exemple en réduisant les retards dus à un manque de composants, et minimisent le risque d'erreur dans l'affectation de ceux-ci.

Malgré l'accélération des flux d'informations autorisée par les technologies d'identification automatique, un système de pilotage centralisée et hiérarchique reste inerte et peu réactif face à des perturbations comme des urgences commerciales ou des ruptures d'approvisionnements. Plus simplement, le découplage des fonctions de planification et d'ordonnement par rapport à l'état (évoluant dynamiquement) du système physique engendre souvent un écart important entre solution planifiée et solution réalisée. Cette typologie d'architecture ne permet pas de dépasser le niveau 3 : « Intégré » de la métrique EICM (Lung, 2002). C'est pourquoi, dans le but de proposer des approches agiles (Niveau 5), de nombreuses initiatives de recherche s'orientent vers des solutions plus distribuées, dans lesquelles les décisions de planification et d'ordonnement sont rapprochées du contrôle de l'exécution et du flux de produits (cf paragraphes 2 et 3 du présent chapitre).

2. Le pilotage distribué des systèmes de production

L'organisation hiérarchique centralisée des systèmes de production conduit à un manque de réactivité sur le terrain (cf paragraphe 4) : la réaction à un aléa n'est pas traitée directement à même le flux et fait intervenir différents niveaux hiérarchiques, ce qui pénalise le temps de réaction. Afin de minimiser ce phénomène, les capacités de décision allouées aux acteurs de terrain sont accrues. Nous nous focaliserons dans ce paragraphe sur deux types de systèmes dans lesquels la construction de l'ordonnement est émergente et résulte des événements survenant sur le terrain : le juste à temps (qui repose sur des décisions prises par des opérateurs humains) et l'approche multi-agents (ou le processus de décision est entièrement automatisé).

La philosophie Juste À Temps et le Kanban

L'APICS (American Production and Inventory Control Society) définit le Juste À Temps comme suit : « In broad sense, JIT is an approach to achieving excellence in a manufacturing company based on the continuing elimination of waste (waste being considered as those things which do not add value to the product). In the narrow sense, JIT refers to the movement of material at the necessary place at the necessary time. The implication is that each operation is closely synchronized with the subsequent ones to make that possible ». Le principe de la philosophie Juste À Temps (JàT) est de mettre à disposition

le produit souhaité, au moment souhaité, dans la quantité souhaitée, tout en maîtrisant le niveau d'en-cours et ses fluctuations tout au long du processus de fabrication.

Un de ses moyens de mise en oeuvre le plus connu est la méthode kanban, qui est un outil de pilotage reposant sur l'association à tout lot en-cours de production d'une étiquette, dont le nombre fixé permet de réguler le niveau d'en-cours de production. Parmi les paramètres d'un système kanban nous trouvons donc la taille de lot et le nombre d'étiquettes à mettre en circulation pour chacune des références.

La taille du lot de production est généralement considérée comme une donnée d'entrée dans les études concernant les systèmes contrôlés en kanban. Cependant, dans le cas de systèmes produisant plusieurs références, et où les temps de réglages ne sont pas négligeables en regard des temps d'usinage, le choix des tailles de lot est un élément essentiel de la performance, basé sur un compromis entre la productivité d'une part, favorisée par des tailles de lots importantes, et les contraintes de stock d'autre part, qui favorisent une réduction des tailles de lot (le stock moyen induit par « l'effet taille de lot » correspondant à la moitié de la taille de lot plus le stock de sécurité).

(Chan, 2001) utilise la simulation pour quantifier l'impact de différentes tailles de lot sur les performances du système de production, afin de permettre à l'industriel de choisir le compromis adéquat.

Dans (Bicheno et al, 2001), un modèle de programmation linéaire permet de calculer la taille de lot optimale dans un atelier de presses de l'industrie automobile. L'objectif est de minimiser le niveau de stock global dans un contexte de capacité finie, en considérant les temps de changement de série pour chaque produit. L'approche proposée tend à uniformiser les temps de réalisation des différents ordres (Figure 25). Cependant, cette approche prend en compte les temps de réglage dans le temps de mise à disposition des produits, mais ne tend pas à les minimiser dans un objectif de productivité.

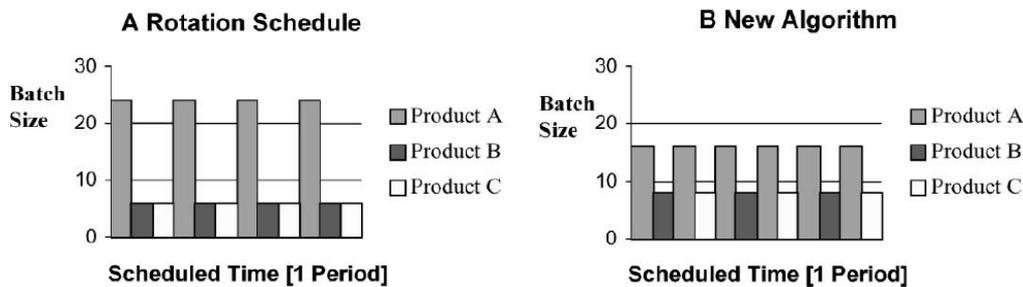


Figure 25. Lissage des temps d'écoulement (Bicheno et al, 2001)

Le fonctionnement du système kanban repose sur la définition de lots fixes de production. Chaque lot est associé à une étiquette, appelée kanban. Par conséquent, une fois les tailles de lot définies, le paramètre d'ajustement de la production est le nombre de cartes en circulation pour chaque référence, en fonction du niveau de stock souhaité et de la demande prévisionnelle. Dans l'article introduisant le concept de système kanban, (Monden, 1981) annonçait que, bien qu'intégrant notamment la notion de « Kanban urgent », cette typologie de système est prévue pour une faible variabilité de la demande, et n'est pas adaptée pour faire face à des variations brutales et importantes. En ce sens, plusieurs travaux tendent à augmenter la flexibilité des systèmes de production contrôlés en kanban en agissant sur le

nombre d'étiquettes kanban en circulation. (Framinan *et al*, 2006) a identifié deux approches différentes de l'ajustement du nombre de cartes en circulation :

- L'approche « **card setting** » : dans des conditions données de production (lead time, niveau de stock...), une procédure permet de définir le nombre de cartes à mettre en œuvre afin d'atteindre les niveaux de performance souhaités (taux de service, niveau de stock moyen). Le nombre de kanbans défini est fixe pour la période considérée (généralement de l'ordre du mois)
- L'approche « **card controlling** » : des règles sont définies permettant de maintenir ou d'ajuster dynamiquement le nombre de kanbans en circulation, en fonction de certains événements (comme par exemple une brusque modification de la demande ou l'atteinte d'un niveau d'en-cours critique).

De nombreuses contributions traitent du problème de « card setting », à commencer par (Monden, 1983), qui établit la formule suivante permettant de calculer le nombre optimal d'étiquettes à mettre en circulation en fonction de paramètres comme le stock de sécurité souhaité, le temps d'écoulement moyen et la consommation prévue par référence :

$$Nb_étiquettes = \frac{CMJ \times (t_w + t_{pc}) \times s}{UC}$$

- *CMJ* : consommation moyenne journalière prévisionnelle sur la période considérée
- *UC* : unité de conditionnement (nombre de produits finis par palette)
- *t_w* : temps de production d'un container
- *t_{pc}* : temps d'attente moyen
- *s* : facteur de sécurité

De nombreux travaux proposent des évolutions de cette formule d'établissement du nombre de kanbans optimal. Un second type d'approche, basée sur la simulation (Berkley, 1996), montre que le choix du nombre d'étiquettes repose sur un compromis entre le taux de service souhaité et le stock de produits finis porté. Les outils de simulation permettent d'étudier différentes solutions afin de sélectionner la plus adaptée aux objectifs de l'entreprise.

Parmi les différentes approches, le nombre d'étiquettes mis en circulation dans l'entreprise Parisot Meubles est défini mensuellement, pour chaque référence, à l'aide de la formule suivante :

$$Nb_étiquettes = ArrondiSup\left(\frac{CMJ * (HO + TE)}{UC * HJ} + \frac{TL}{UC} + \frac{SS}{UC}\right)$$

- *CMJ* : consommation moyenne journalière prévisionnelle sur la période considérée
- *UC* : unité de conditionnement (nombre de produits finis par palette)
- *HO* : horizon d'ordonnancement, temps que passent les étiquettes sur le tableau du premier processus (=visibilité)
- *TE* : temps d'écoulement, entre le début de la première opération et l'entrée en stock du produit fini
- *HJ* : horaire journalier d'ouverture du processus de production
- *TL* : taille du lot de production
- *SS* : stock de sécurité, en unités.

Quelques travaux traitent du problème de « card controlling » dans les systèmes Juste À Temps, généralement appliqués à des cas particuliers. Ces systèmes où le nombre de kanbans en circulation est réévalué dynamiquement sont appelés kanbans flexibles, kanbans réactifs ou kanbans adaptables.

Une première approche a été proposée dans (Rees et al, 1987), qui consiste à adapter le nombre de kanbans en circulation à partir de l'équation établie dans (Monden, 1981), en utilisant le temps d'écoulement réalisé sur la période en cours et non une estimation ou une moyenne de celui-ci.

Une procédure établie par (Gupta et al, 1997) permet de déterminer en fonction du nombre initial de kanbans en circulation et de la demande prévue sur la prochaine période, les instants où des kanbans devront être ajoutés ou retirés de la circulation.

(Takahashi et al, 2004) proposent un système kanban décentralisé réactif, où le nombre d'étiquettes en circulation dans chaque boucle est recalculé dynamiquement pour chaque boucle, en fonction de la variabilité de la demande, non seulement en terme de moyenne mais également de variance (« variabilité de la variabilité »). L'approche proposée par ces auteurs prend également en compte la variabilité du temps d'écoulement, celui-ci étant évalué par simulation : l'objectif de l'ajustement du nombre de kanbans en circulation est de maintenir le temps d'attente moyen au plus proche d'un temps d'attente cible.

(Tardif et al, 2001) développent une approche de contrôle des cartes kanbans dans un environnement de fabrication sur stock où la demande et les conditions d'approvisionnement sont variables. L'objectif est de minimiser le stock d'en-cours et par conséquent les coûts associés, en établissant un compromis entre le stock de produits finis et les commandes. Dans cette approche, une « extra carte » est ajoutée au système lorsqu'une demande arrive et que le niveau de stock est en dessous d'un certain seuil bas R. Un nombre maximum d'« extra cartes » en circulation permet de maîtriser le niveau d'en-cours. Ces « extra cartes » sont retirées de la circulation lorsque le stock de produits finis atteint un seuil haut C.

(Husseini et al, 2006) proposent d'améliorer la flexibilité en terme de volumes, en ajustant le nombre d'étiquettes en circulation dans chacune des boucles à l'aide d'une méthode de programmation linéaire en nombres entiers. La comparaison est réalisée avec un kanban traditionnel, et des performances supérieures sont montrées face à une variabilité importante de la demande. L'avantage financier d'une telle approche est d'autant plus important que la demande est incertaine et variable. Cependant, la validation et les comparaisons sont réalisées sur le cas très simple d'une unique ligne de production ne produisant qu'une référence.

(Shahabudeen et al, 2008) utilisent une combinaison d'un algorithme génétique et d'une heuristique de recuit simulé pour paramétrer leur proposition de kanban adaptatif, c'est-à-dire pour établir les seuils auxquels des cartes seront ajoutées ou retirées du système.

(Framinan et al, 2006) a constaté que ces différentes approches nécessitent parfois de nombreux paramètres et une quantité importante d'informations au sujet du système de production, bien que certaines approches pallient à cette difficulté en reposant sur des paramètres obtenus par simulation.

Les systèmes de pilotage hétérarchiques

Afin de répondre aux impératifs de réactivité et de flexibilité, les recherches se sont orientées vers les systèmes flexibles de production (Vogrig *et al*, 1987) pilotés par des systèmes à structure hétérarchique (Duffie *et al*, 1986)(Trentesaux, 2007). Ces systèmes de

production à intelligence distribuée sont souvent basés sur des systèmes logiciels de type multi-agents. (Jennings *et al*, 1998) donnent la définition suivante d'un agent : « *An agent is a computer system situated in some environment, and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objectives* ». Le concept des systèmes multi-agents repose sur l'intelligence émergente des interactions entre agents. La mise en œuvre de telles interactions suppose de doter les agents de capacités de perception et d'action sur l'environnement. Un système multi-agents de pilotage de la production est généralement composé d'agents représentatifs des centres de charge et des ordres de production, utilisant un protocole de négociation comme par exemple le Contract-Net Protocol (Smith, 1980), qui permet de planifier en temps réel la charge de travail des ressources.

Le pilotage est réactif, le comportement global du système émerge de l'interaction des centres de décisions locaux. Les décisions sont prises en temps réel, par collaboration entre les différents acteurs et au fur et à mesure que les événements de production surviennent sur le terrain : l'approche est diachronique.

Parmi les nombreuses approches hétérarchiques recensées dans la littérature, peu ont été éprouvées sur des applications industrielles réelles. (Bussmann *et al*, 2000) proposent une architecture totalement distribuée et automatisée, dans laquelle chaque ressource ou ordre de fabrication est lié à un agent informatique. Dans le processus d'affectation des tâches aux ressources et d'ordonnement, le système multi-agents proposé prend en compte non seulement les ordres en attente devant la machine, mais également les pièces précédemment usinées par cette ressource et en attente devant les processus suivant : le nombre d'ordres, en attente devant et immédiatement après chaque ressource, est limité. Ce mécanisme permet ainsi de maîtriser le niveau d'en-cours et d'équilibrer la charge en attente devant chaque centre de charge (dans la mesure où le mix-produits le permet), en propageant les contraintes d'en-cours dans le sens inverse du flux de produits. Par ailleurs, la charge représentée par l'ensemble des lots en-cours pour chacune des ressources est constamment mesurée, empêchant l'introduction dans le système de nouveaux ordres qui entraînerait une surcharge trop importante sur un goulot.

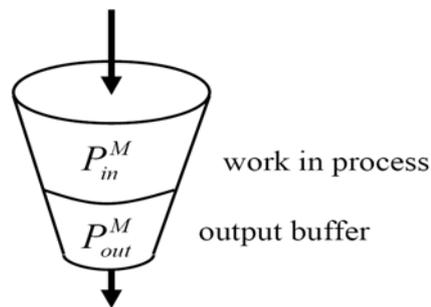


Figure 26. L'entonnoir virtuel (Bussmann *et al*, 2000)

Le principal avantage d'une telle approche mis en avant par les auteurs et la capacité à prendre des décisions d'ordonnement sans disposer d'une vue globale du système. Si cette absence de vue globale ne permet pas d'assurer l'atteinte d'un optimum global, l'ensemble des décisions est néanmoins pris par rapport à la situation courante réelle. Des simulations à grande échelle ont permis de montrer des améliorations de la productivité globale.

Le système a été évalué à l'aide de simulations à grande échelle, et permis de mettre en œuvre des solutions d'ordonnement proches de l'optimal théorique (99,7% de l'optimal

réalisé en terme de throughput). Le déploiement sur un pilote industriel Daimler-Chrysler a permis de valider les résultats de la simulation et de montrer la faisabilité industrielle de l'approche.

Le défaut majeur des architectures hétérarchiques réside dans le fait que chacune des décisions est prise de manière locale, par un ou plusieurs agents disposant chacun d'une vision partielle du système. Cette politique de prise de décision permet de simplifier le processus global de prise de décision mais n'assure pas l'optimalité de la solution. Comme souligné dans (Van Brussel *et al*, 1998): « *the independence of agents prohibits the use of global information (in heterarchical control systems making) central scheduling or resource planning impossible* ». De plus, l'absence de coordination dans les gros systèmes peut entraîner des phénomènes tels que l'inter blocage, ou une nervosité trop importante (changements intempestifs de l'ordonnancement, incapacité à donner un délai).

3. Le pilotage hybride des systèmes de production

L'approche holonique

Les défauts imputés aux approches de pilotage hétérarchiques mettent en évidence le manque de coordination des systèmes purement distribués et sont à l'origine des structures de pilotage hybrides. L'un des principaux paradigmes en ce sens est le concept de système holonique de production (HMS – Holonic Manufacturing System), (McFarlane *et al*, 2003), (Valckenaers *et al*, 2002), (Norrie *et al*, 2002), (Morel *et al*, 2003b). Le terme holon provient d'une combinaison du préfixe grec *holos*, qui signifie tout, et du suffixe *-on* qui signifie partie. Le concept d'holon a été proposé par (Koestler, 1967) pour décrire une entité basique d'une organisation biologique ou sociale, en partant du constat qu'il n'existait aucune entité non-communicante et n'appartenant à aucune communauté dans les organismes vivants ou dans les organisations sociales. Chaque entité organisationnelle identifiable est donc constituée d'entités plus basiques tout en représentant une partie d'une organisation plus vaste : « *Partly as wholes and wholly as parts* ».

Koestler définit également le concept d'*Open-Ended Hierarchy (OEH)* comme l'architecture formée d'holons, appelée holarchie, et dont les relations entre éléments n'intègrent pas seulement une dimension verticale (Figure 27). Le paradigme des systèmes holoniques de production repose sur la transposition de ces concepts aux systèmes de production, introduisant une notion de hiérarchie dans les systèmes distribués afin de combiner la réactivité face aux aléas des systèmes distribués et l'optimalité des solutions assurée par les systèmes hiérarchiques (Bongaerts *et al*, 1998). L'approche holonique est donc une approche hybride, combinaison de l'approche purement hiérarchique et de l'approche hétérarchique.

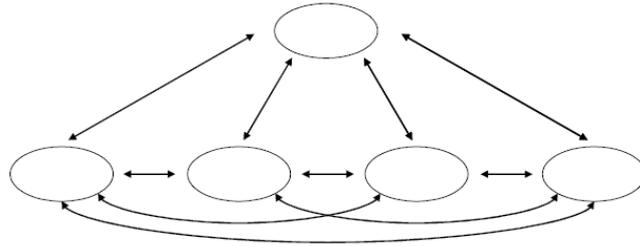


Figure 27. Forme de système holonique, combinaison de système hiérarchique et hétérarchique (Gouyon, 2004)

Le programme international de recherche IMS (*Intelligent Manufacturing Systems*), et plus particulièrement le projet HMS, a eu pour objectif de faciliter la production dans un contexte de personnalisation de masse, en proposant un système stable face aux perturbations, adaptable et flexible face aux changements de production et utilisant efficacement les ressources disponibles.

PROSA (Product Resource Order Staff Architecture) est l'une des architectures de référence pour la mise en œuvre du paradigme holonique, proposée par (Bongaerts *et al*, 1998), développée au sein de l'université catholique de Louvain. Cette architecture est basée sur des agents de quatre types : Produits, Ressources, et Ordres de fabrication, (Figure 28) représentatifs des différentes entités du système de production, et des agents Encadrement, qui assurent la cohésion et la cohérence du système global. Les holons Ordres, Produits et Ressources ont pour rôle respectivement la gestion des aspects logistiques, la gestion des informations techniques relatives au produit et aux ressources, et l'aspect de pilotage. L'holon Staff a pour rôle de coordonner les différentes entités en prenant en compte certains aspects du système de production comme par exemple la gestion dynamique des priorités.

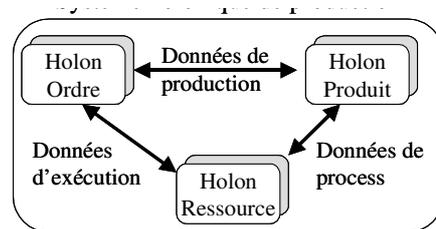


Figure 28. Constructeurs de base d'un système holonique de production et leurs relations (Bongaerts *et al*, 1997)

(McFarlane *et al*, 2003) ont caractérisé les systèmes de production intelligents distribués par les caractéristiques suivantes :

- les décisions du système de contrôle (généralement planification, ordonnancement, routage...) sont prises par plusieurs éléments décisionnels ;
- les entités décisionnelles interagissent de manière collaborative et flexible pour prendre une décision ;
- une seule entité décisionnelle n'a pas accès à toutes les informations nécessaires à une prise de décision efficace ;
- une entité décisionnelle est typiquement liée à un élément physique, tel que machine, produit, pièces et commandes clients.

Les travaux dans le domaine des systèmes holoniques de production adressent différentes problématiques, comme la modélisation et la conception, le contrôle en temps réel et la robustesse aux aléas, l'intégration B2M (Business to Manufacturing) ou la planification et l'ordonnancement de la production (Babiceanu et al, 2006). Nous nous intéresserons particulièrement aux travaux portant sur ce dernier point. Dans les systèmes holoniques de production, comme dans les systèmes purement hétérarchiques, l'ordonnancement émerge de la coopération entre différents holons, chacun représentant ses propres intérêts (l'holon produit va chercher à être produit à temps au moindre coût, l'holon ressource va chercher à maximiser sa productivité). La différence essentielle réside dans le fait qu'un ou plusieurs holons, avec des capacités d'influence plus ou moins fortes, vont pouvoir intervenir dans les processus de prise de décision en prenant en compte des critères de performance globaux. C'est par exemple le cas de l'holon *Staff* dans l'architecture PROSA, qui a un rôle uniquement consultatif dans la prise de décision.

L'architecture holonique de pilotage (*Holonic shop floor control architecture*) proposée par l'université de Porto, développée dans (Sousa et al, 1999), exploite la capacité qu'a un holon de faire simultanément partie de deux ou plusieurs holons. Ainsi, les holons *ressources* appartiennent simultanément à trois autres holons : l'holon de planification de la production (*Production Planning holon*), l'holon ordonnancement (*Scheduling holon*) et l'holon de planification du processus (*Process planning holon*), et les holons *tâches* appartiennent simultanément aux holarchies de planification de la production et d'ordonnancement.

L'architecture EtoPlan (Engineer-to-order Planning) a été développée au sein de l'université néerlandaise de Twente afin de piloter la production dans un environnement d'ingénierie à la commande (Giebels et al, 2001). Cette approche repose sur une multitude d'holarchies temporaires appelées AG (Activity Group), regroupant l'ensemble des ressources permettant la réalisation d'une tâche. Chaque tâche à réaliser est associée à un AG regroupant l'ensemble des ressources disponibles et un mécanisme permet de sélectionner au moment de la réalisation de manière coopérative le meilleur ensemble de ressources à mettre en œuvre.

Ces différentes approches sont encore à des niveaux de maturité bas (Niveaux 1 à 3, modélisés, émuloés ou implémentés sous la forme de prototypes). Peu d'applications des systèmes holoniques de production font l'objet de publications.

Dans sa thèse, (Blanc, 2006) propose un système de pilotage holonique de la production d'une usine de fabrication de vitres de sécurité feuilletées. L'architecture proposée, basée sur l'architecture de référence PROSA, permet de piloter de manière réactive la production, tout en garantissant un pilotage globalement optimisé en prenant toutefois en compte les contraintes locales de productivité de certaines ressources, comme par exemple l'optimisation matière du processus de découpe de verre. Cette approche n'est à l'heure actuelle pas implémentée, mais fait l'objet d'une validation par émulation du système contrôlé à l'aide d'un modèle représentatif du système réel. De plus, si les mécanismes d'automatisation ne sont pas encore déployés, l'étude a permis de définir une base de données permettant de mettre à disposition des opérateurs les informations pertinentes pour la prise de décision en temps réel.

Le contrôle par le produit

Les technologies infotroniques, en plus de rendre le produit informant, permettent de lui donner un rôle actif dans la prise de décisions affectant sa fabrication.

Des travaux de l'Institute for Manufacturing de Cambridge ((Mc Farlane et al. 2003; Wong et al. 2002) ont défini le profil du "produit intelligent", capable d'interagir avec son environnement pour contrôler par lui-même les opérations de transformation l'affectant, de sa production jusqu'au recyclage en fin de vie. Le produit intelligent a été défini comme présentant au moins une des caractéristiques suivantes :

- une identification unique ;
- l'aptitude à communiquer avec son environnement ;
- l'aptitude à enregistrer de l'information le concernant ;
- l'aptitude à exprimer ses caractéristiques et ses besoins à l'aide d'un langage ;
- l'aptitude à participer au processus décisionnel concernant son propre devenir.

(Wong et al, 2002) ont défini deux niveaux d'intelligence du produit, en fonction de ces fonctionnalités :

- **Intelligence de niveau 1** : le produit connaît son état (forme, emplacement...) et est capable de le communiquer. Le produit est « informant »
- **Intelligence de niveau 2** : en plus d'être informant, le produit peut influencer ou contrôler les différentes transformations le concernant. Le produit devient une entité décisionnelle.

Différentes approches récentes proposent de conférer au produit une intelligence de niveau 2. L'initiative OOONEIDA (Open Object-Oriented Knowledge economy in intelligent industrial automation) (Vyatkin et al, 2005) a pour but de proposer un système de pilotage de production (discrète ou continue) décentralisé et reconfigurable. OOONEIDA vise à créer une infrastructure technique pour des composants d'automatisation interopérables, à travers le développement de modules logiciels ré-utilisables et portables (blocs fonctionnels) et permettant la spécification, la conception, la validation, la réalisation et le déploiement de composants mécatroniques intelligents aux niveaux contrôle/commande et pilotage de la production.

Le projet Européen PABADIS'PROMISE (Product Oriented Manufacturing Systems for Re-configurable Enterprises)(<http://www.pabadis-promise.org/>) s'appuie sur une architecture de pilotage distribuée innovante qui intègre à la fois les ressources et les produits afin d'améliorer la flexibilité et la réactivité des systèmes de production. Le paradigme "L'ordre de fabrication est la fabrication" confère au produit un rôle actif dans le pilotage de sa fabrication. Les résultats attendus de ce projet sont le développement d'une nouvelle architecture de pilotage à base d'intelligence distribuée, la proposition d'une nouvelle ontologie de systèmes de production, une plateforme multi-agents temps réel pour le pilotage, une nouvelle génération d'étiquettes RFID, une nouvelle génération de contrôleurs programmables et des modules permettant l'intégration avec une nouvelle génération d'ERP, autour de l'ontologie définie. Les niveaux du MES et des contrôleurs de terrain sont entièrement distribués, répartis en agents logiciels mobiles stockés dans des étiquettes RFID attachées directement au produit. L'arrivée d'un produit à un poste de traitement déclenche la lecture des informations attachées et l'invocation de l'agent logiciel correspondant permettant la prise en compte des traitements à effectuer. Des agents résidentiels, fonctionnant comme des pilotes pour périphériques de PC, représentent les ressources et assurent leur gestion.

Le projet de recherche exploratoire national SCP (Système Contrôlé par le Produit) du GDR MACS vise à étudier une approche "centrée sur le produit" autour du paradigme de "Système Contrôlé par le Produit" : le produit devient un élément actif participant aux décisions concernant les processus le concernant. La mise en œuvre d'une telle stratégie de

pilotage repose sur les nouvelles technologies dites ubiquistes comme la RFID et les réseaux de capteurs. Ce projet s'appuie notamment sur le rapport de prospective du comité d'experts productique du CNRS du 15 janvier 2007, qui fait état de : « *la difficulté à faire interopérer des objets de natures différentes en explorant les possibilités d'homogénéiser leurs capacités respectives d'interactions tout en maîtrisant l'émergence des propriétés issues de ces interactions multiples.* Un premier défi scientifique est ici de rendre interactif le comportement du procédé, et particulièrement du produit, en tirant parti des progrès des technologies infotroniques (RFID, communication sans fil, ...) pour le pilotage (ordonnancement et commande) en exécution (« on the fly ») d'un système de production. *Ce paradigme holonique du contrôle par le produit pour synchroniser logiquement les comportements du procédé et du pilotage en regard d'objectifs variants assignés au système ouvre des perspectives intéressantes d'intégration de micro et nano technologies (réseaux de capteurs, « smart technology », etc...) afin de rendre le produit actif dans la boucle cybernétique, ainsi que d'intégration de systèmes multi-agents pour rendre l'architecture de pilotage plus hiérarchique.* Le produit actif est notamment vu comme la passerelle permettant l'interopérabilité entre les outils centralisés de gestion logistique et des processus distribués de décisions locales relatives à l'exécution de la production (Figure 29), (Pannequin, 2007), (Gouyon, 2004). Ce projet exploratoire souligne également le besoin d'architectures d'évaluation permettant la simulation et l'évaluation des performances des systèmes contrôlés par le produit.

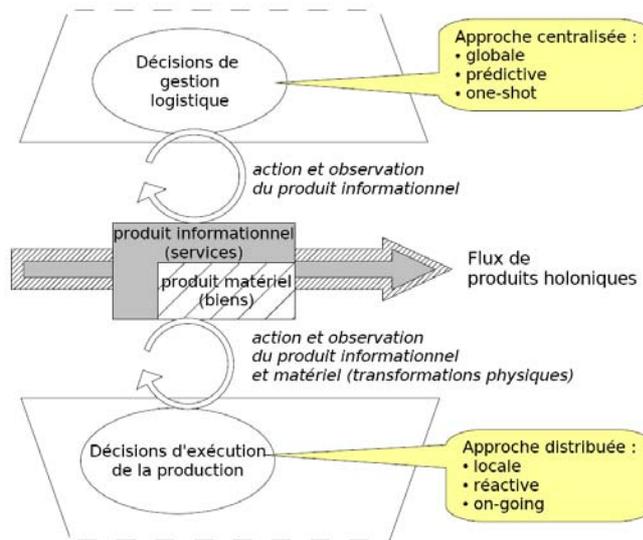


Figure 29. Architecture de décision centrée sur le produit (Pannequin, 2007)

4. Synthèse des approches

Cette section de synthèse fait le parallèle entre les problèmes industriels évoqués dans le premier chapitre et les réponses académiques présentées dans le second chapitre.

4.1 (Mesure) Les informations remontées sont fausses ou désynchronisées

La problématique de synchronisation du système de décision avec le système physique de production peut donc se décomposer en deux sous problèmes :

- synchroniser les flux d'informations avec les flux physiques, afin de disposer en temps réel d'une représentation pertinente de l'état du système de production,
- accélérer les processus de décision et d'implémentation des décisions prises, afin de minimiser les évolutions du système physique pendant la durée du processus de décision.

Plusieurs travaux ont eu pour but d'étudier l'opportunité d'utiliser les technologies d'identification automatique pour le pilotage des flux de produits. Différentes approches sont utilisées pour quantifier les bénéfices :

- *l'approche analytique*, basée sur une représentation statique du système de production ;
- *l'implémentation sur une plate forme de laboratoire*, représentant tout ou partie d'un système de production et permettant de reproduire à moindre échelle des problématiques de décision ou de synchronisation de flux ;
- *l'implémentation d'un pilote en production*, sur une partie représentative du processus ;
- *l'usage de la simulation*, permettant de reproduire la dynamique d'un système de grande échelle.

L'Auto-ID Lab de l'université de Cambridge utilise une plate forme de démonstration pour étudier un système de pilotage intelligent distribué, alimenté par des étiquettes RFID associées au produit. Cette initiative permet de montrer la faisabilité de l'amélioration du système de pilotage en utilisant des informations issues du produit, et traite différentes problématiques comme la gestion des erreurs de capture (généralement une non lecture de l'étiquette) (Brusey et al, 2003) ou la gestion de fin de vie des produits (démantèlement et recyclage) (Parlikad et al., 2007).

Chow (Chow et al, 2006) propose un système multi-agents de pilotage d'entrepôt basé sur l'identification des produits par des étiquettes RFID. Cette approche montre une amélioration des performances intéressantes, mesurées a posteriori. Cette application peut être utilisée comme un exemple pour montrer l'intérêt d'implémenter un système d'acquisition des données produit en temps réel pour la gestion de stocks, mais ne permet pas d'évaluer a priori l'impact qu'aura une application à un autre cas d'usage. Ce travail souligne l'importante part intangible d'une implémentation des technologies d'identification automatique, comme par exemple la capitalisation des connaissances du processus, difficilement quantifiable dans une analyse de retour sur investissement.

(Lee et al, 2004) ont montré que les études analytiques ne considéraient pas les effets dynamiques de la disponibilité et de la justesse de l'information. Ils ont montré en utilisant la simulation sur un cas particulier que l'amélioration de la précision de l'information liée à

l'usage de la technologie RFID permettait de réduire de moitié le stock moyen de produits finis tout en éliminant les ruptures de stock. (Joshi, 1998) a également utilisé la simulation pour évaluer la visibilité de l'information tout au long de la chaîne logistique.

De plus, les mécanismes d'optimisation mis en œuvre dans les progiciels de gestion d'entreprise de type ERP sont « datavores » : ils nécessitent une alimentation régulière en informations sur l'état du système de production et du flux de produits. Les ERP ne disposent pas systématiquement d'un module d'exécution et de suivi de la production, et l'échelle de temps des problèmes traités au niveau des ERP n'est pas toujours compatible avec les contraintes temps réel du suivi et du pilotage des flux sur le terrain.

4.2 (Méthodes) Le processus décisionnel n'assure pas l'optimalité

L'atout principal du système kanban utilisé est la robustesse de l'ordonnancement généré : en effet, l'ordonnancement s'établissant par le biais des cartes, au fur et à mesure de sa réalisation, assure de sa faisabilité ce qui n'était pas le cas du système utilisé précédemment. Cependant, l'optimisation globale du système n'est pas assurée et il est parfois possible de constater des ruptures non anticipées sur certains centres de charge éventuellement goulots, du à un mix-produits particulier. Des solutions hiérarchiques permettent de générer des ordonnancements plus robustes aux aléas. Le retour à un système d'ordonnancement prédictif irait à l'encontre des objectifs de l'entreprise. En revanche, les mécanismes d'ordonnancement réactif, permettant de ré-évaluer sur événement la pertinence de l'ordonnancement et de suggérer des améliorations semblent applicables au système d'ordonnancement kanban.

La disponibilité d'informations fiables et exhaustives en temps réel autorisée par l'identification automatique permet d'envisager l'utilisation d'outils d'aide à la décision permettant d'aiguiller les décisions de pilotage. Notamment l'utilisation de la simulation permet d'anticiper les phénomènes dynamiques et de les prendre en compte lors d'une décision d'ordonnancement.

Par ailleurs, les propositions de pilotage distribué comme les systèmes holoniques par exemple permettent d'obtenir des solutions globalement satisfaisantes en mettant en œuvre une collaboration entre holons de même niveau hiérarchique, chacun représentant ses propres intérêts.

4.3 (Management) L'organisation hiérarchique crée de l'inertie

Le système Juste À Temps, s'il repose en grande partie sur une responsabilisation des opérateurs et sur une réduction des niveaux hiérarchiques, nécessite toutefois l'intervention des niveaux hiérarchiques supérieurs pour déroger aux règles comme le respect strict de l'ordre imposé par les trains kanban. Cette implication de différents niveaux hiérarchiques pénalise la réactivité.

Les travaux sur les organisations hétéroarchiques ou hybrides montrent l'intérêt de prendre les décisions de pilotage à même le flux, voire de rendre le flux de produit acteur de son pilotage. Cette perspective est d'autant plus crédible que les technologies infotroniques permettent au produit de véhiculer les informations le concernant, assurant ainsi leur disponibilité et la synchronisation du flux d'informations. Si les mécanismes de prise de décision automatique ne sont pas encore totalement éprouvés, ils ne sont pas non plus totalement adaptés dans la mesure où le système de production n'est pas totalement automatisé. En revanche, les travaux sur le pilotage holonique peuvent conduire à la

définition d'une structure de données pertinente pour l'aide à la décision sur le terrain (Blanc, 2006).

4.4 (Moyens) Les contraintes de productivité des différents îlots sont divergentes

L'optimisation simultanée des contraintes des différentes cellules d'un système de production est une tâche complexe, et nécessite la mise en œuvre d'algorithmes lourds. Si différentes approches permettent d'optimiser une solution en fonction de plusieurs critères (optimisation multicritères), l'approche distribuée, consistant entre autres à décomposer un problème complexe en plusieurs sous problèmes simples, permet de mettre en œuvre parallèlement des algorithmes d'optimisation simples, et d'arriver à une solution globalement cohérente par la collaboration entre les différentes entités.

L'introduction dans les systèmes purement hétérarchiques d'entités de niveaux hiérarchiques supérieurs permet d'assurer la stabilité du système et de prendre en compte des objectifs de performance globaux. Notamment, les entités de type « Staff » peuvent être utilisées pour assurer le respect d'une trame de Programme Directeur de Production élaboré par le système centralisé.

4.5 (Milieu) La demande client est diversifiée et versatile

L'agilité du système de production est une réponse efficace à une demande client versatile. Dans les systèmes hiérarchiques et prédictifs, le nombre de niveaux hiérarchiques impliqués entre la prévision de la demande client, la prise en compte des commandes fermes, la planification de la production et son exécution induit de l'inertie.

Des initiatives comme PABADIS'PROMISE proposent une simplification du système de gestion en considérant le produit (physique) et l'ordre de fabrication (informationnel) comme une seule et même entité. Cette suppression de niveaux hiérarchiques associée à des capacités de décision réparties a pour but d'améliorer la réactivité du système, tant aux aléas de production (problèmes de ressources ou de produits) qu'à l'incertitude inhérente à la demande client (ordres urgents ou modification d'ordres existants)

4.6 (Maturité) La solution retenue doit être éprouvée

Afin de mesurer leur niveau de maturité, les différentes solutions étudiées seront comparées au regard de la métrique de maturité proposée par (Parunak, 1999), à l'origine destinée à comparer des approches multi-agents mais qui peut s'appliquer à tout système de pilotage de la production. Partant du constat que peu d'utilisateurs industriels veulent être les premiers à tester une nouvelle technologie en conditions réelles, mais que dès qu'une technologie a montré de bons résultats, chacun souhaite être le second, l'auteur propose de classer les différentes approches sur six niveaux (Figure 30), de celles qui ont seulement été modélisées à celles déjà dont la maturité permet d'être commercialisées :

- **Modeled** : les applications modélisées, les moins matures, sont celles qui existent seulement au stade de descriptions d'architectures et d'analyses théoriques. Il est très rare qu'un acteur industriel se tourne vers une technologie qui soit seulement à ce niveau de maturité.
- **Emulated** : les applications émulées ont été expérimentées dans un environnement simulé. Dans le domaine industriel, la pertinence des résultats émulés dépend

énormément de la pertinence du modèle utilisé, en terme de dimension, de complexité, et de représentativité des contraintes industrielles.

- **Prototype** : l'approche a été appliquée sur un système réel, physique, dans des conditions de laboratoire. Dans le cas d'applications intégrant l'Homme, ce « réel » inclut des personnes réalisant les tâches que le système est censé assister.
- **Pilot** : une application pilote a été appliquée sur un cas réel, en production, mais sur un périmètre limité de l'entreprise considérée, sur lequel un certain degré d'expérimentation et de défauts peut être toléré. L'implémentation pilote est généralement l'étape cruciale avant un déploiement global (ou non).
- **Production** : une application en production est utilisée quotidiennement dans des activités cruciales pour l'entreprise. Elle a convaincu le management et son utilisation fait partie des opérations quotidiennes.
- **Product** : de nouvelles applications de pilotage de la production sont généralement développées pour un cas particulier, et nécessitent un fort support pour fonctionner correctement. Au niveau « Product », l'application est suffisamment robuste pour être proposée à la vente à différents utilisateurs.

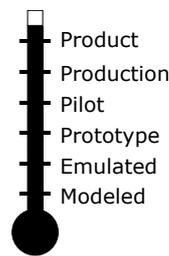


Figure 30. Métrique de maturité des applications de pilotage de la production, d'après (Parunak, 1999)

Les approches de pilotage distribuées présentées dans les paragraphes 2 et 3 du présent chapitre mettent en évidence les apports intéressants de la mise en œuvre de stratégies réactives et décentralisées de pilotage des flux de production, mais les solutions proposées se situent généralement au niveau émulé ou prototype de la métrique de maturité : peu de propositions ont fait l'objet d'une application à échelle réelle sur un système industriel. (Marik et al, 2006) et (Trentesaux, 2007) montrent également l'intérêt des approches décentralisées tout en mettant en avant le manque de maturité des approches proposées. D'après la revue de littérature, seule l'approche multi-agents proposée dans (Bussmann et al, 2001) a été implémentée sur un pilote industriel, ce qui a permis de consolider les résultats obtenus par simulation. Notons également une implémentation pilote de la plateforme multi-agents proposées par le FORAC pour piloter une scierie (Forget et al, 2007).

Il existe donc un besoin fort de validation à grande échelle des systèmes de pilotage. (Valckenaers et al, 1997) ont identifié trois approches permettant de valider et d'analyser quantitativement les performances d'un système de pilotage : une implémentation sur plateforme de laboratoire, une implémentation pilote ou un modèle de simulation. La mise au point et le paramétrage d'un système de pilotage nécessitent des conditions d'expérimentations stables et reproductibles. L'immobilisation de tout ou partie d'une installation industrielle à des fins de tests, ainsi que le risque inhérent aux essais en production (risque important de perte de compétitivité), rend difficilement envisageable l'implantation d'un pilote sans un minimum de garanties. De plus, comme mentionné dans (Valckenaers et al, 1997), les systèmes physiques sont difficilement maîtrisables et la reproductibilité des expérimentations

n'est pas garantie. La simulation, si elle peut générer des coûts de développement importants, représente donc un moyen peu risqué d'analyser préalablement à toute installation physique les caractéristiques d'un système de pilotage de la production. Enfin, seule la simulation permet de comparer deux systèmes de pilotage dans des circonstances identiques.

Au cours des dernières années, au sein de la communauté IMS, un besoin fort de preuve de concept a conduit à développer des architectures de benchmarking, basée sur la simulation, afin de valider les approches de pilotage émergentes et de comparer différentes approches. Ce besoin de comparaison souligne le besoin de modularité entre le(s) système(s) de pilotage à étudier et le système opérant à contrôler (Brennan et al, 2005), appelé émulation et définit comme suit dans (Pannequin, 2007) : « il s'agit de reproduire l'interaction du système à représenter avec son environnement. Le modèle d'émulation doit reproduire la réponse du système réel à des séquences d'entrées, afin d'être utilisé dans un système plus vaste. ».

(Cavalieri et al, 2000) ont comparé différents niveaux de délégation dans la prise de décision dans des systèmes multi-agents : la comparaison est réalisée à l'aide d'un modèle simple à deux machines, ce qui limite la complexité des problèmes étudiés et ne permet pas de valider la robustesse des systèmes étudiés aux problèmes d'échelle industrielle. (Mönch, 2006) décrit une architecture de benchmarking permettant la comparaison de plusieurs types de règles de décision et établit le constat suivant quant aux coûts de développement de modèles de simulation : "simulation modelling for complex manufacturing systems is a time consuming task because highly detailed simulation models are necessary". Ce constat a conduit à proposer des outils permettant de construire rapidement des modèles représentatifs de problèmes industriels réels. Le groupement d'intérêt SIG4 de l'IMS a proposé une structure de benchmarking en ligne afin d'établir une large base de cas, basés sur des problèmes industriels réels, et utilisable par la communauté. La lourdeur du développement et le besoin de compétences n'ont pas permis l'exploitation de cette structure. Cette initiative a toutefois conduit à la définition de trois primitives de modélisation, inspirées des ressources physiques du système de production :

- les postes de travail, réalisant des transformations de type temps-forme sur les produits, ainsi que des opérations d'assemblage ou désassemblage ;
- les stocks d'en-cours et les files d'attente d'entrée et de sortie des différentes ressources ;
- les ressources de transport, comme les chariots ou convoyeurs.

(Pannequin, 2007) définit un environnement d'évaluation, basé sur l'émulation et la distinction entre modèle d'émulation et système de pilotage, avec l'objectif de valider la faisabilité du contrôle par le produit. L'approche proposée, basée sur une analyse systémique du système opérant, repose sur une bibliothèque de composants d'émulation permettant de modéliser différents systèmes physiques de production. L'architecture permet l'analyse comparative de différentes stratégies de pilotage. Les travaux ayant été mené conjointement, plus de détails sur l'architecture d'émulation sont présentés dans le chapitre quatre du présent mémoire, ainsi que dans (Pannequin, 2007) ou (Klein *et al*, 2008)

5. Conclusion

Dans ce chapitre, différentes approches permettant d'améliorer la réactivité du système de production et d'améliorer la robustesse du pilotage par rapport aux perturbations, notamment dans un contexte Juste À Temps, ont été présentées. Les approches hybrides permettent d'apporter à la fois l'optimisation globale, par la prise en compte d'objectifs globaux et une vision sur l'ensemble du système, et de réagir rapidement et de façon pertinente en prenant en compte des critères locaux.

Les technologies d'identification automatique offrent un vecteur d'information permettant de capter précisément en temps réel les événements de production, mais également de véhiculer des informations permettant d'améliorer les décisions prises à même le flux. Une architecture informatique doit permettre la collecte, le traitement, le stockage, la mise en forme et l'accès aux informations ainsi collectées, afin d'améliorer la pertinence des décisions prises par les entités décisionnelles de terrain.

Cependant, les approches récentes, basées sur l'utilisation des technologies infotroniques et des capacités de décision distribuée manquent souvent de validation à l'échelle industrielle. La simulation, et notamment le concept d'émulation, permettent de mettre le système de pilotage dans des conditions proches du réel, sur des problèmes à échelle réelle.

Des réponses recensées dans la littérature à la problématique industrielle évoquée au premier chapitre émergent une problématique scientifique :

- Comment coupler la **réactivité** d'une **approche distribuée** et les capacités d'**optimisation globale** autorisées par une **approche centralisée prédictive** ?
- Comment le **produit actif** peut-il contribuer à l'**interopérabilité décisionnelle** entre un **système centralisé** et **entités décisionnelles distribuées** ?
- Comment démontrer la validité d'approches novatrices avant application industrielle ?

Synthèse :

Ce chapitre présente différentes approches centralisées, distribuées ou hybrides apportant des réponses aux problèmes industriels induits dans le premier chapitre.

De cette étude, il ressort que les approches centralisées et distribuées présentent des forces et faiblesses complémentaires, ce qui nous oriente vers une architecture de décision hybride, reposant sur un système de planification centralisé et une gestion de l'exécution décentralisée, à même le flux, intégrant le produit et son représentant dans le processus décisionnel. Les technologies infotroniques représentent un lien efficace entre le flux physique et le flux d'informations et de décisions.

Les approches novatrices étudiées souffrent en revanche d'un manque de maturité, et il existe un besoin fort de preuve du concept et de quantification des résultats avant toute implémentation. L'émulation semble être un moyen consensuel pour la validation des systèmes de pilotage dans un contexte industriel.

Chapitre 3 : Problématique

Objectifs :

Le premier chapitre a fait émerger un ensemble de problèmes et de questionnements industriels.

Le second chapitre identifie quant à lui un ensemble d'éléments de réponses du monde académique à ces questionnements industriels.

Ce chapitre a pour objectif de faire émerger une problématique scientifique à partir de l'analyse des questionnements identifiés au chapitre 1 et des éléments de réponses du chapitre 2, en s'appuyant sur la modélisation du système de production.

1. Définition du problème

Le premier chapitre identifie une problématique industrielle de pilotage réactif des flux physiques en assurant une cohérence et une optimisation globale du système de production, en intégrant toutefois les critères de performances locaux propres aux différents processus de transformation. Afin de fixer le cadre de l'étude, il est nécessaire de définir les objectifs du système cible et de définir les indicateurs qui permettront d'évaluer ses performances comparativement aux performances du système existant.

Afin d'assurer la généralité de l'approche, nous nous appuyons sur un standard. L'organisme de normalisation ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), a publié le standard s95 (ANSI/ISA-95.00.01-2000) dans le but d'appréhender le problème du pilotage de la production. Pour cela, elle établit un vocabulaire commun et propose une vision claire et un découpage simplifié (modèle hiérarchique, de flux, d'objets et d'activité). Elle définit également les différents domaines d'applications du MES et un modèle standard d'organisation des données.

Périmètre

L'analyse du système industriel a orienté l'étude vers une problématique de gestion de l'exécution de la production. Les propositions académiques ont mis en évidence l'intérêt des systèmes de pilotage réactifs et distribués alimentés en données temps réel émanant du flux de produits. Le manque de maturité de ces approches est également souvent souligné. Par contre, si le pilotage kanban est un système simple et efficace permettant de piloter la production au sens où il permet d'établir un ordonnancement réalisable, il n'assure pas l'optimalité et ne rend pas les flux de produits visibles pour le système d'information et les fonctions supports. Il est donc important de se focaliser sur une couche applicative permettant d'apporter une visibilité globale du système de production, tant à destination du système de gestion (ERP) que pour améliorer le pilotage des flux.

Ce positionnement au niveau de l'interaction entre les niveaux de gestion (Business) et la production (Manufacturing) et à la conduite de l'exécution nous rapporte au domaine du MES au sens défini par l'ISA, soit le niveau 3 (level 3) de la Figure 31.

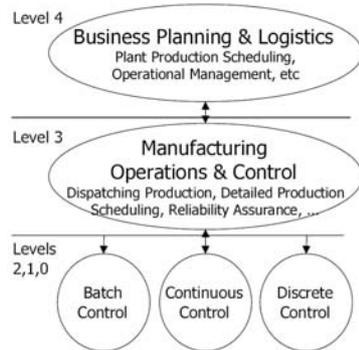


Figure 31. Positionnement du MES (level 3) (ISA, 2000)

Notre proposition repose donc sur une architecture de niveau MES permettant de rendre le flux de produits informant afin d'aider au pilotage des flux de produits en production et d'informer le système de gestion. Plus particulièrement, il s'agit d'assister dynamiquement à l'adaptation et à l'amélioration des solutions proposées par le système kanban, en considérant des décisions comme le choix d'une ressource ou la modification du séquençement pré-établi. Cette aide à la décision a vocation de permettre aux décideurs de terrain de prendre en compte, en plus des critères de performance locaux, des critères globaux de satisfaction du client.

Font partie de l'étude :

- l'architecture matérielle de collecte des données temps-réel sur le terrain,
- la structuration des données collectées et l'intégration avec un système centralisé de gestion,
- la mise à disposition des décideurs de terrain des informations pertinentes pour le pilotage des flux,
- l'aide à la décision pour les décisions de pilotage,
- la mise à disposition des fonctions de gestion des informations justes et en temps réel sur l'état du système de production ET du flux de produits/

Ne font pas partie de l'étude :

- la fonction de planification,
- la fonction de distribution et de stockage des produits finis.

Environnement et fonctions

L'une des finalités du MES étant d'assurer le lien entre le système de production et le système de gestion, son environnement se compose évidemment de ces deux entités. La norme ANSI-ISA 95 (ISA, 2000) propose un modèle hiérarchique de pilotage de la production (Figure 31).

Le niveau 4 de ce modèle correspond au domaine des ERP, le niveau 3 au domaine du MES, et les niveaux 2,1 et 0 au contrôle/commande des installations.

A l'interface des niveaux 3 et 4, le système de gestion interagit avec le MES, en définissant notamment le Plan de Charge permettant le dimensionnement des ressources et le Plan d'Approvisionnements. Les fonctions de planification, d'approvisionnement ou de gestion de la sous-traitance sont assurées par les fonctions du niveau 4. Le MES remonte les événements de production sous une forme agrégée afin d'alimenter le système de gestion sur l'état du flux physique et sur les performances du système de production.

A l'interface des niveaux 2 et 3, le MES a pour rôle de transmettre les informations permettant l'exécution de la production (plannings, « recettes ») et de remonter les événements de production de niveau bas (Début et fin d'OF, aléa, déclarations de quantité). Le MES interagit donc avec les équipements de production, les opérateurs et les décideurs de terrain.

Le domaine de contrôle du MES a été défini par différents organismes comme l'APICS ou l'ISA. Nous nous appuyons sur le standard défini par la norme ANSI/ISA-95 est réparti en onze fonctions (annexe 1). Parmi ces onze fonctions, certaines sont déjà traitées par ailleurs, par exemple par des applications dédiées (qualité, RH). Les fonctions à assurer pour le système cible sont :

- **Allocation et contrôle des ressources** (*resource allocation and control*) : cette fonction inclut la gestion des ressources directement associées au contrôle et à la fabrication (machines, outils, matériaux, documents,... et toute autre entité nécessaire aux opérations à réaliser). La gestion de ces ressources peut inclure la réservation de ressources afin de respecter les objectifs fixés par l'ordonnancement ;
- **Répartition de la production** (*dispatching production*) : gestion des flux de production sous la forme de travaux, lots et ordres de fabrication, par répartition de la production sur les équipements et de la main d'œuvre. Typiquement, l'information de répartition est présentée sous la forme d'une séquence suivant laquelle les travaux doivent être effectués, mais peut être modifiée en temps-réel en fonction de l'occurrence d'événements sur l'outil de production ;
- **Acquisition et collecte de données** (*data collection and acquisition*) : obtention en temps réel et historisation des données opérationnelles associées aux équipements et aux procédés de production ;
- **Planification et suivi de la production** (*production planning and tracking*) : fournit des informations sur l'état de la production et des travaux (affectation du personnel, composants utilisés dans la production, conditions de production, alarmes ...). Cette fonctionnalité inclut la capacité à enregistrer les informations de production pour permettre la traçabilité des composants dans chaque produit fini ;
- **Analyse des performances** (*performance analysis*) : fournit des comptes-rendus sur les écarts constatés entre les résultats attendus et les résultats réels au niveau de la production, au niveau de l'utilisation des ressources, de leur disponibilité, du temps de cycle de chaque produit ... ;

- **Opérations et ordonnancement détaillé** (*operations and detailed scheduling*) : séquençement basé sur les priorités, attributs, caractéristiques, et règles de production associées aux équipements de production et aux caractéristiques des produits, telles que la forme, la couleur ou tout autre caractéristique qui, une fois ordonnée correctement, minimise les temps de mise en place (non productifs) ;

Définition des objectifs et problématique scientifique

Le premier chapitre a permis d'identifier une problématique industrielle d'accélération des flux physiques, de synchronisation du flux physique et des flux d'informations et de décisions (respect des cadres de décision pris de façon centralisée) et d'alimentation constante du processus final d'assemblage. Les objectifs industriels d'agilité de la fonction de gestion d'exécution de la production, dans une logique de type Juste À Temps et théorie des contraintes, peuvent se traduire par les propositions suivantes :

- maîtriser le niveau d'en-cours ;
- maximiser le taux d'utilisation des ressources des ressources goulot;
- maximiser la productivité totale ;
- minimiser le temps d'écoulement moyen.

Le service étant assuré par le système de planification considéré ici comme une donnée d'entrée, le taux de service n'est pas directement mesuré. Cependant une maîtrise améliorée du temps d'écoulement permettra une meilleure mise en œuvre du PDP établi et par conséquent un meilleur taux de service.

D'un point de vue académique, notre proposition doit s'appuyer sur le kanban actif pour permettre la synchronisation des flux physiques et des flux d'information et de décision, coordonner les différentes décisions prises à même le flux et assurer leur cohérence par rapport au programme fixé de façon centralisée prédictive. Les outils informatiques (bases de données, traitements) associés seront spécifiés, et devront être intégrés au système d'information déjà en place. De plus, la pertinence de la proposition par rapport aux objectifs industriels précédemment évoqués doit être mesurée. Cette mesure de performance implique la définition d'indicateurs adaptés.

La problématique scientifique soulevée touche donc à la synchronisation des flux physiques et informationnels et à l'assistance au pilotage des flux en temps réel sur le terrain. Nous postulons que le kanban actif permet de résoudre certains verrous de la gestion de l'exécution de la production, notamment :

- Comment le kanban actif permet-il la **synchronisation** des flux physiques et d'informations ? Quels mécanismes mettre en œuvre pour maintenir une **représentation consistante** de l'état du système de production ?
- Comment assurer la **cohérence** entre l'ensemble des décisions prises de façon décentralisée, aux différents points de décision ?
- Comment **coordonner** les différentes décisions prises localement par rapport au programme fixé de manière centralisée ?

Ces différents points de synchronisation, cohérence et coordination entre un système décisionnel centralisé prédictif et un système distribué réactif s'apparentent à l'interopérabilité de deux systèmes décisionnels centralisé et distribué.

L'interopérabilité entre deux systèmes décisionnels ne peut pas être mesurée directement. Cependant, il apparaît évident que celle-ci impacte les performances « directes » du système. L'évaluation de notre proposition se fera donc par rapport aux performances du système de production piloté par kanban actif.

Définition des indicateurs de performance

Afin de mesurer la performance du système de pilotage actuel et d'évaluer la pertinence de notre proposition par rapport aux objectifs, il est nécessaire de définir un système d'indicateurs de performance mesurant l'efficacité de la stratégie de pilotage mise en œuvre. Certains indicateurs industriels existants permettent une mesure adaptée de la performance, cependant certains indicateurs complémentaires doivent être déployés.

Pour mesurer l'efficacité d'un système de pilotage, (Mönch, 2007) distingue les mesures de performances directes et indirectes : les mesures directes concernent les performances logistiques, alors que les performances indirectes caractérisent plus particulièrement le comportement du système de pilotage, comme la stabilité, l'agilité ou la robustesse des plans par exemple (Figure 32).

	Class	Example
Direct performance measures	Due-date oriented	<i>Total tardiness</i>
	Throughput oriented	<i>Throughput of a certain work area</i>
	Cycle-time oriented	<i>Average lead-time of a certain product</i>
	Load oriented	<i>Work in Process</i>
Indirect performance measures	Stability of schedules	<i>Average deviation from completion time to planned completion times of a fixed reference plan</i>
	Robustness of schedules	<i>Deviation of tardiness of lots to the tardiness of a fixed reference plan</i>
	Rescheduling efforts	<i>Number of required rescheduling activities</i>
	Run-time-oriented measures	<i>Run time of a certain production control algorithm</i>
	Agility	<i>Time needed to obtain original WIP after the breakdown of a major bottleneck tool.</i>

Figure 32. Différentes classes de mesures de performance (Mönch, 2007)

En premier lieu, l'objectif assigné au système de production est de satisfaire la demande du client, en produisant le bon produit, dans la bonne quantité, au bon moment, et à moindre coût. De ces objectifs découlent logiquement deux types de performances : le service au client et la productivité.

L'aspect logistique (délais) du taux de service client est mesuré à l'aide d'un indicateur :

- **Le retard total**, qui représente le nombre de produits livrés en retard par rapport à la quantité globale à produire. Cet indicateur est mesuré avec une fréquence hebdomadaire.

La capacité à produire le bon produit au bon moment est assurée par la fonction de planification, mais impactée par la réactivité du système de production, indirectement mesurée par le temps d'écoulement moyen. Par conséquent le retard global représente un indicateur pertinent de la performance de la chaîne logistique dans son ensemble mais ne reflète pas uniquement la pertinence du système de production.

Les performances logistiques propres au système de production sont mesurées par rapport au temps d'écoulement moyen et au niveau moyen d'en-cours :

- **Le temps d'écoulement moyen** (lead time) représente la durée moyenne passée par un produit dans l'unité de production, qui se mesure concrètement par le temps écoulé entre le début de l'opération de débit et la fin de l'opération d'emballage.
- **Le niveau d'en-cours moyen** : Le système d'information permet d'obtenir toutes les quatre heures un « instantané » du contenu des encours. Il est mesuré en nombre de palettes présentes dans l'encours (en stock d'en-cours, en cours d'usinage ou de transport), entre le processus de débit et celui d'emballage.

La productivité est également mesurée à l'aide de deux indicateurs :

- **le taux d'utilisation des ressources** mesure, pour chacune des ressources, le temps d'utilisation réel par rapport à la capacité engagée. Il mesure les ruptures de charge pour chacune des ressources. Il est calculé quotidiennement.
- **La production totale (Throughput)** mesure le nombre de colis produits chaque jour.

Enfin, la fluidité des stocks d'en-cours est mesurée à l'aide d'un indicateur :

Notre travail portant sur l'opportunité de reconsidérer la stratégie de pilotage, il est également important de mesurer les performances propres du système de pilotage, qui ne sont pas toujours directement liées aux mesures de performances directes. Ces performances du système de production seront mesurées à l'aide des indicateurs suivants :

- **Stabilité de l'ordonnancement** : calculé de manière hebdomadaire, cet indicateur mesure la part de la production planifiée effectivement réalisée :

$$\text{Min} \left(\sum_{\text{horizon}} \text{production_réalisée} - \sum_{\text{horizon}} \text{production_planifiée} \right)$$

- **Temps de réponse** : Le temps de réponse est la durée mise par le système pour reconsidérer l'ordonnancement en fonction de nouvelles informations. Il permet d'évaluer la réponse aux problèmes d'échelle du système de production considéré.

Par ailleurs, des critères comme l'ergonomie ou la facilité de déploiement, sans être quantifiables, représentent des facteurs clés de réussite dans le déploiement d'un système de pilotage.

Démarche

L'analyse du cas d'étude industriel a montré que la connaissance du système de production est diffuse et non formalisée dans l'entreprise. Le mode de développement du système, qui a consisté en une succession d'ajouts de différents éléments, le rend particulièrement complexe. Une phase de modélisation de l'existant (modèle AS-IS) permet

donc de comprendre dans le détail et de formaliser le fonctionnement du système, mais aussi de poser clairement le problème. La première étape de ce travail a donc consisté à modéliser les différents processus constituant le système ainsi que les flux.

La modification du système de pilotage en cours d'étude à apporter une opportunité d'identifier des forces et faiblesses de deux types d'approches de gestion des flux, l'une totalement centralisée et prédictive et l'autre distribuée et réactive. Un second modèle AS-IS' représente donc le fonctionnement en kanban du système de production.

L'analyse de ces deux modèles au regard des critères définis et des éléments de solutions identifiés dans l'étude bibliographique permet de mettre en évidence les caractéristiques importantes à conserver et celles à améliorer. Ces constats permettent de définir un système cible intégrant ces améliorations (Modèle TO-BE)(Figure 33). L'utilisation de la modélisation permet entre autre d'assurer la ré-utilisabilité et la reproductibilité de la solution proposée.

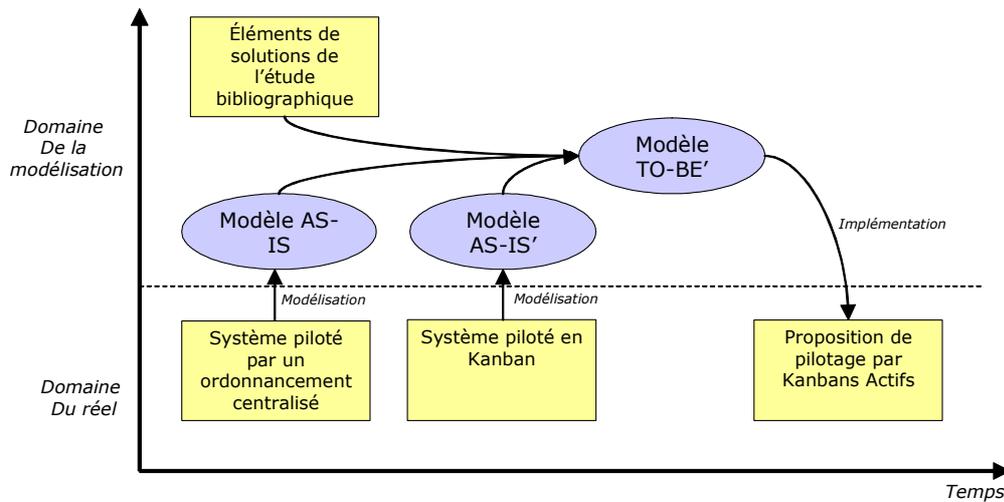


Figure 33. Démarche de définition du système cible

Les différents modèles devront ensuite être implémentés, puis exécutés afin de réaliser des mesures quantifiées de performances. De meilleures performances en production (temps d'écoulement réduit, maîtrise du niveau d'en-cours, production) seront le reflet d'une interopérabilité décisionnelle améliorée.

2. Objet de l'étude : le système de production UGV

(Le Moigne, 1977) décrit un système par « une action (un enchevêtrement d'actions) dans un environnement (« tapissé » de processus) pour quelques projets (finalité, téléologie) fonctionnant (faisant) et se transformant (devenant). » Par conséquent, nous nous attachons dans ce chapitre à décrire la finalité du système de production UGV, ses interactions avec son

environnement et son organisation physique, qui représentent l'invariant, quel que soit le mode de pilotage mis en œuvre.

La modélisation du système de production a été réalisée à l'aide de la suite de modélisation MEGA, qui possède ses propres règles de modélisation inspirées de BPMN (Business Process Modelling Notation) et d'UML. Les modèles UML et de processus présentés dans ce mémoire ont été réalisés à l'aide de la suite de modélisation Mega. La légende de ces différents modèles est présentée en Figure 34 et Figure 35.

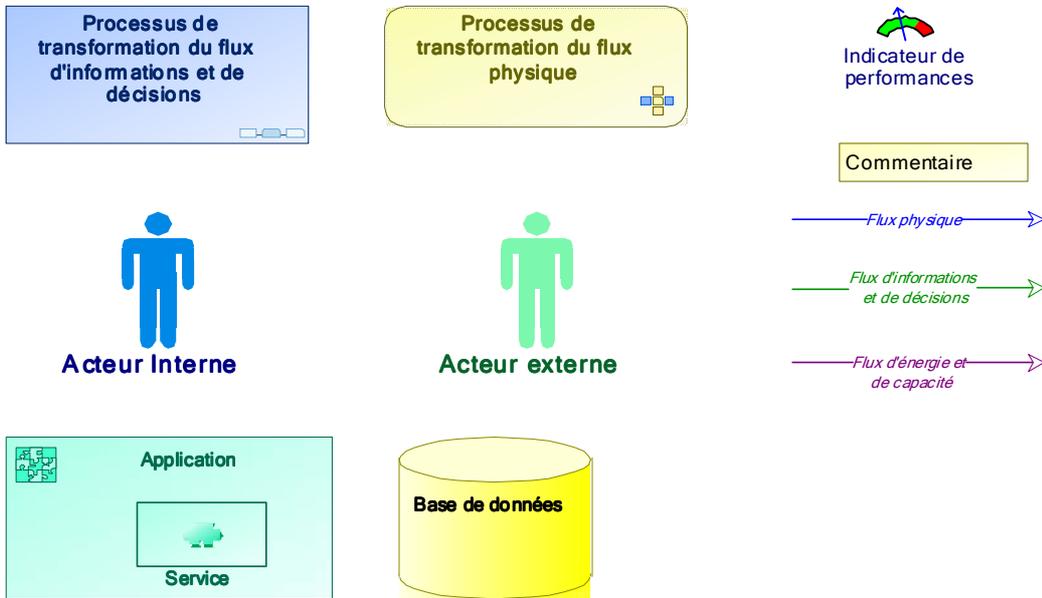


Figure 34. Légende des modèles de processus MEGA

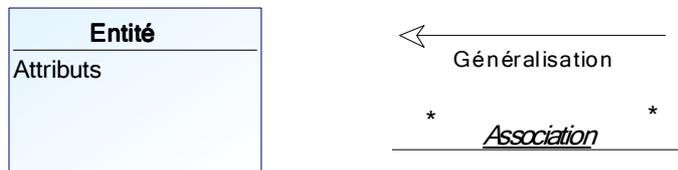


Figure 35. Légende des modèles UML réalisés avec MEGA

Finalité du système de production UGV

La première phase de l'analyse du système consiste à identifier sa finalité, ce pour quoi il a été conçu. (Von Bertalanffy, 73) définit la finalité d'un système comme étant « *un objet résultant du projet d'un Système dans son Environnement et pour lequel il a fonctionné et évolué. Elle peut être de différents types et en particulier dans le cas d'objets désirés par l'Homme, elle est une aptitude pour l'Homme mais aussi le but de la mise en œuvre de machines artificielles organisées et évoluant pour cette finalité.* »

La finalité du système étudié est de rapporter de l'argent à travers la production de meubles en kit. Les meubles en kits produits, identifiés par une référence, appartient

généralement à la fois à une famille commerciale et à une famille de production : la famille commerciale représente un ensemble de produits aux caractéristiques esthétiques proches (par exemple l'ensemble des meubles d'une chambre à coucher de même dessin) alors que la famille de production représente un ensemble de produits dont la recette de fabrication est similaire (par exemple la famille des lits ou la famille des chevets).

Les meubles fabriqués sont livrés « à plat », dans des colis contenant l'ensemble des pièces fabriquées, des quincailleries décoratives ou structurelles, ainsi que la notice et des éléments de protection (cales en carton ou en polystyrène). En fonction du nombre de composants, de leur encombrement et de leur poids total, un meuble peut-être conditionné dans un à sept colis.

Le colis, en plus des éléments d'emballage, contient des composants achetés et des composants fabriqués, soit dans l'unité d'emballage du colis, soit dans une autre unité de fabrication (pièces en forme). Le modèle de données du produit Parisot Meubles est présenté sur la Figure 36.

« Un **modèle de données** permet de représenter la structure statique d'un système, en particulier les types d'objets manipulés dans le système, leur structure interne et les relations qui existent entre eux. » (Source : Documentation MEGA)

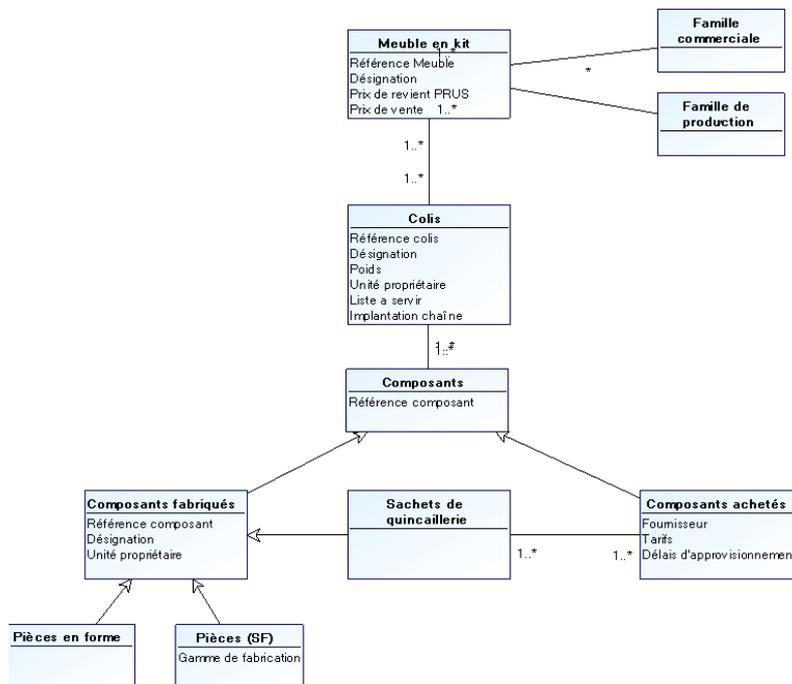


Figure 36. Modèle du produit Parisot Meubles (Diagramme de classe UML)

Environnement du système de production UGV

Afin d'assurer l'exhaustivité dans l'étude des interactions du système UGV avec son environnement, nous avons appliqué le concept de modalités sémiotiques défini dans (Mayer, 1995), permettant d'exprimer l'ensemble des interactions nécessaires pour réaliser une action finalisée.

- **Devoir faire** : ce qui doit être produit par le système mais aussi ce qui doit être processé par le système, objets finalisant ou finalisés de nature informationnelle, matérielle ou énergétique.
- **Savoir faire** : ce qui est requis en termes de Savoir-Faire de compétences par le système pour produire sa finalité, objets informant le système. Ce sont des Informations Transactionnelles,
- **Vouloir faire** : ce qui est requis en termes d'événements par le système pour produire sa finalité, objets stimulant un évènement sur le système. Ce sont des Informations Événementielles.
- **Pouvoir faire** : ce qui est requis en termes de ressources par le système pour produire sa finalité, objets ressources du système. Ils sont de nature matérielle, énergétique, humaine ou logicielle,

Les relations de ces quatre concepts avec le système sont illustrées sur la Figure 37.

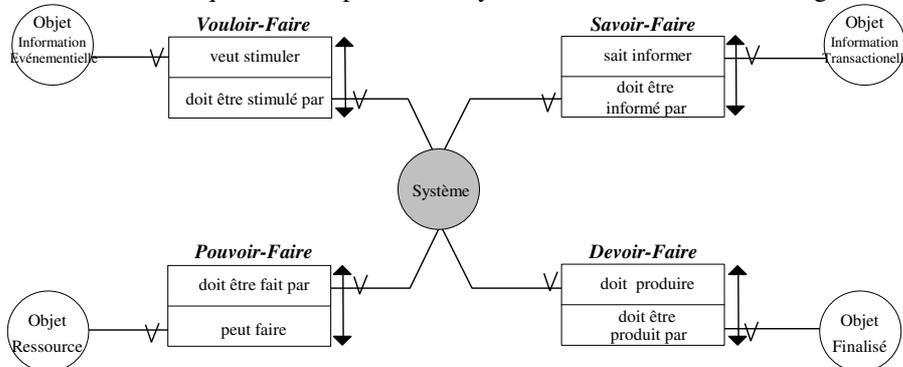


Figure 37. Description des concepts de modalités (formalisme NIAM)

Tout processus est défini par des modalités entrantes et sortantes.

Le **devoir faire de sortie** (DFS) représente la finalité du système, c'est-à-dire dans le cas du système étudié ce que produit le système (flux d'objets finalisés) : des palettes de colis, des ponts de pièces sous traitées pour d'autres unités, ainsi que des résidus (chutes de débits ou rebuts).

Le **devoir faire d'entrée** (DFE) représente le flux d'objets à processer, ici la matière première (panneau de particules, quincailleries, éléments d'emballage) permettant la production des colis, et les pièces à sous-traiter pour les autres unités de production de colis.

Le **savoir faire d'entrée** (SFE) représente les recettes nécessaires à la réalisation du flux finalisant, c'est-à-dire les données techniques : gammes et nomenclatures des produits (flux d'objets de données contribuant à la réalisation de la finalité). En retour, le système

produit des *savoirs faire de sortie* (SFS), qui sont des informations sur la réalisation de la production permettant d'améliorer les données techniques.

Le *vouloir faire d'entrée* (VFE) représente les éléments déclenchant de la production : le Programme Directeur de Production et la consommation d'un produit déclenchant le lancement d'un lot (flux d'objets informationnels événementiels). En retour, le système génère un *vouloir faire de sortie* (VFS) sous la forme de remontées de production (déclaration de production, qualitatives et quantitatives) et d'indicateurs reflétant la performance du système de production. Ces indicateurs de performance sont détaillés en 3.7.

Enfin, le *pouvoir faire d'entrée* (PFE) exprime les flux d'objets ressources contribuant à la réalisation de la finalité : la capacité de production (horaires d'ouverture des différents équipements, présence des opérateurs), et le *pouvoir faire de sortie* (PFS) exprime la consommation de ces ressources.

Le résultat du processus de modélisation de l'environnement d'UGV est montré

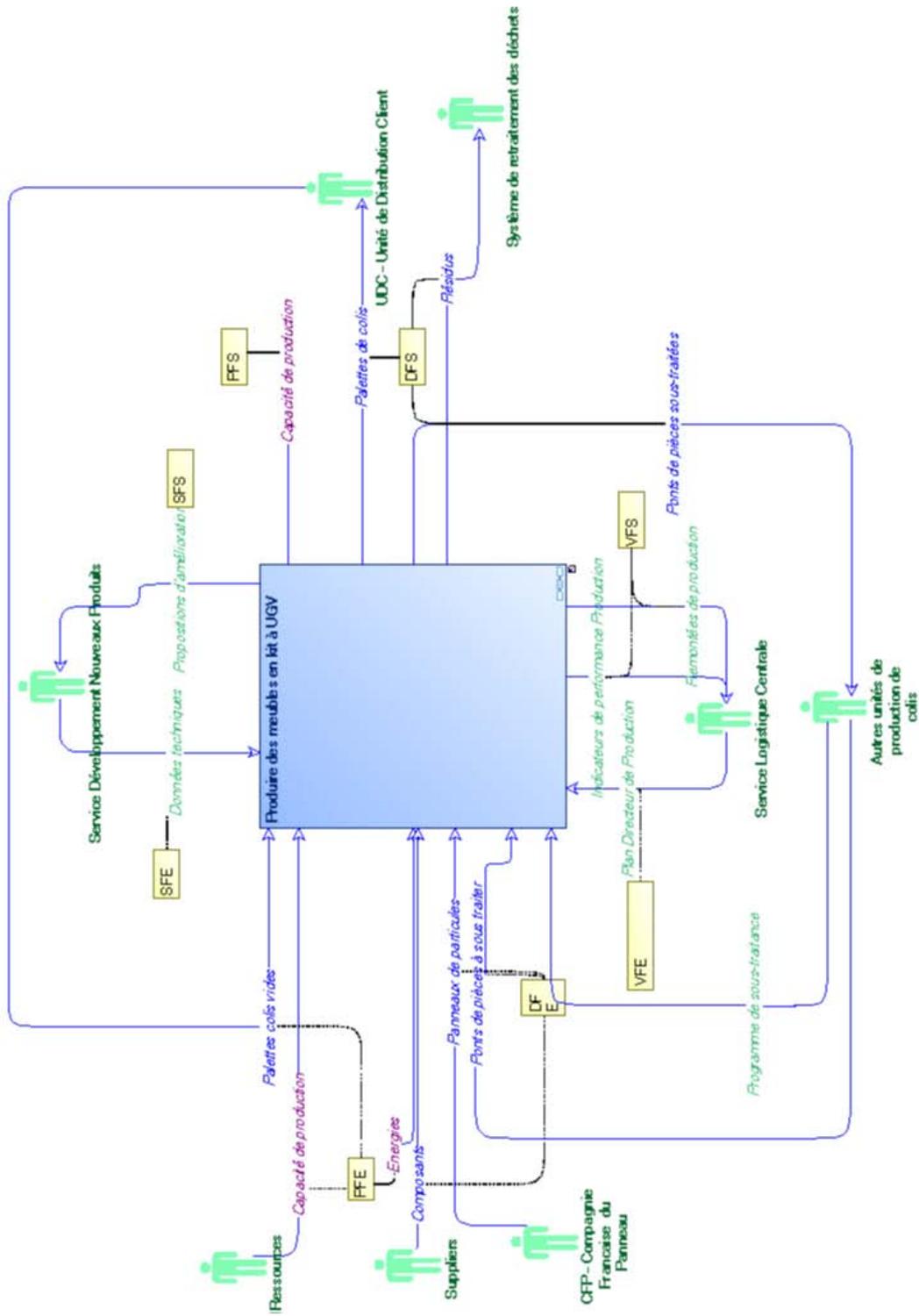


Figure 38. « Le **Diagramme d'environnement de processus** décrit l'environnement du processus sous forme de carte (éléments déclencheurs, services rendus, clients du processus, interactions avec des acteurs ou avec d'autres processus) » (Source : MEGA)

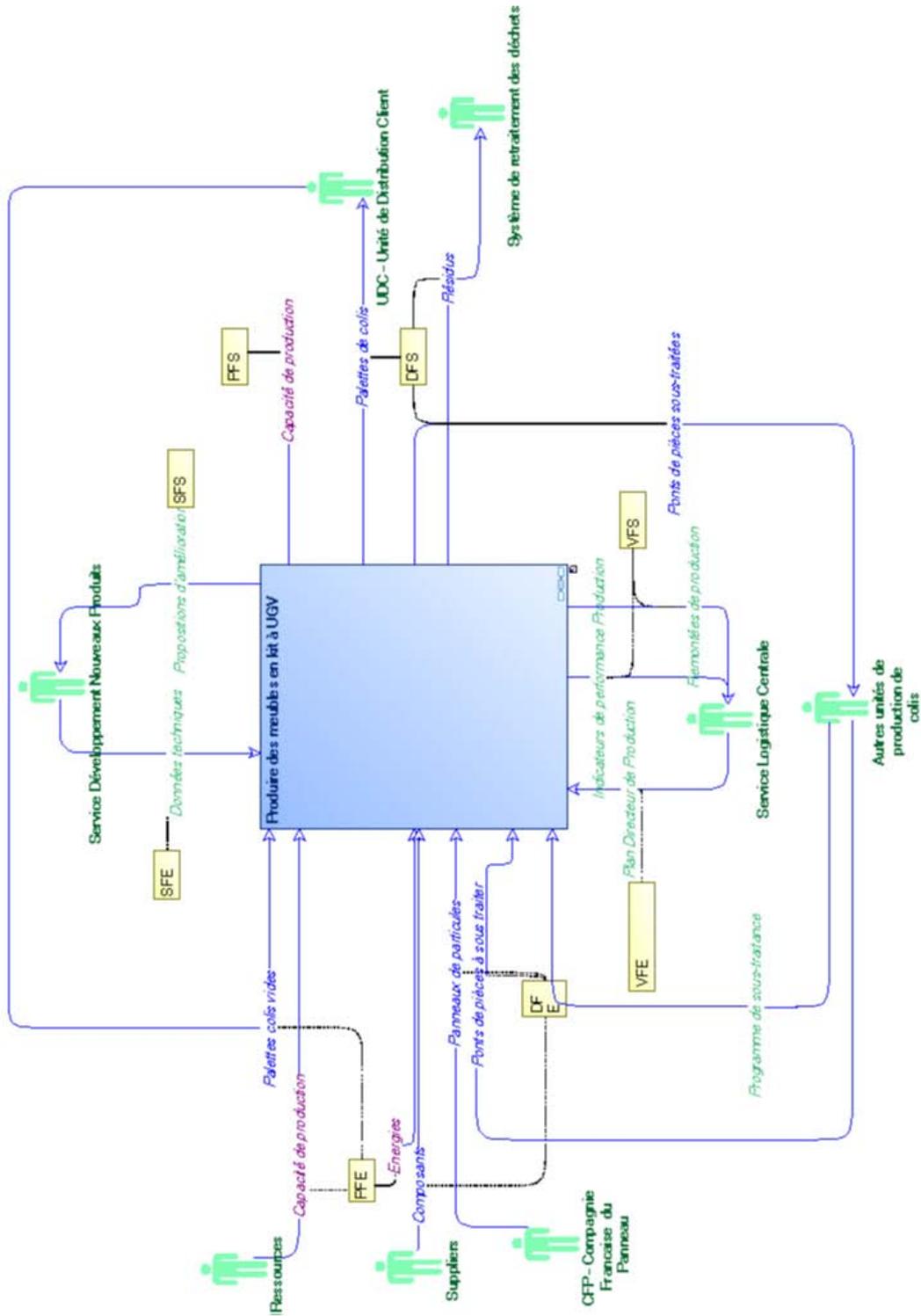


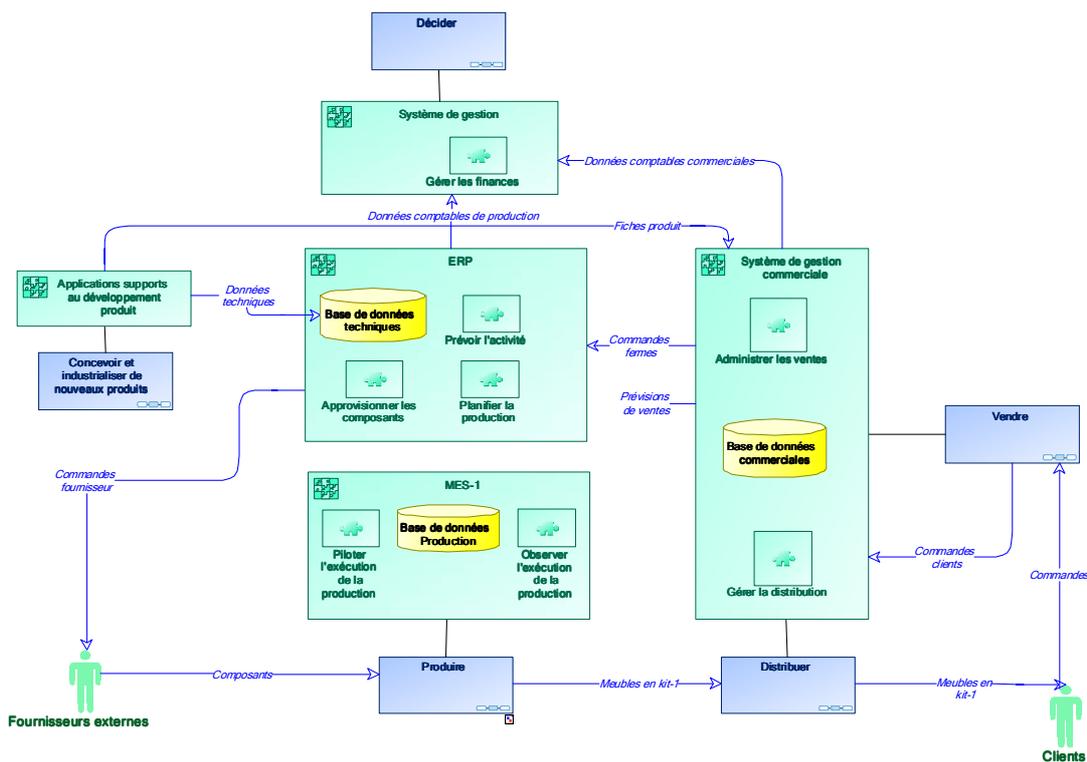
Figure 38. L'environnement de l'Unité Autonome de Production UGV (Diagramme de processus)

Vue informationnelle du système de production UGV

Le système d'information de l'entreprise est constitué de deux applications importantes, la gestion commerciale d'une part et la gestion industrielle d'autre part. Le progiciel de gestion commerciale est en fait un ERP à part entière, dont seule les fonctionnalités commerciales, de gestion de stock et de la distribution sont utilisées. La gestion industrielle est quant à elle également supportée par un ERP, dont seules les fonctions de gestion de production et des approvisionnements sont utilisées. Cet ERP intègre la base de données techniques communes aux trois unités de production et supporte les trois processus distincts de planification de la production. La base de données techniques est alimentée par le processus de création et d'industrialisation des nouveaux produits, et utilise des outils dédiés interfacés avec la base de données techniques. Un même système MES, décomposé en trois bases correspondant aux trois unités, assure les fonctions de pilotage (établissement et diffusion de l'ordonnancement) et d'observation (collecte et agrégation des événements de production). La Figure 39 montre une vue partielle du système d'information de l'entreprise représentant les différentes applications et bases de données supportant la production à UGV.

« Les **diagrammes d'architecture applicative** permettent de décrire l'environnement logiciel d'une application, d'un système applicatif ou de l'entreprise elle-même. Ils permettent également de décrire l'architecture interne d'un système applicatif, d'une application ou d'un service. » (Source : MEGA)

Figure 39. Vue partielle de l'architecture applicative



Transformation du flux physique finalisant

La Figure 40 détaille les transformations appliquées au flux physique finalisant, c'est-à-dire le flux de produits physiques, de l'état de matières premières à l'état de produits finis, ainsi que l'ensemble des processus de transformation forme-temps (débit, usinage ou emballage) intégrant les transports, espace-temps (transports) et les processus de transformation temporelle (stockage). La construction de ce modèle doit permettre de générer automatiquement un modèle d'émulation du procédé (cf Chapitre 4).

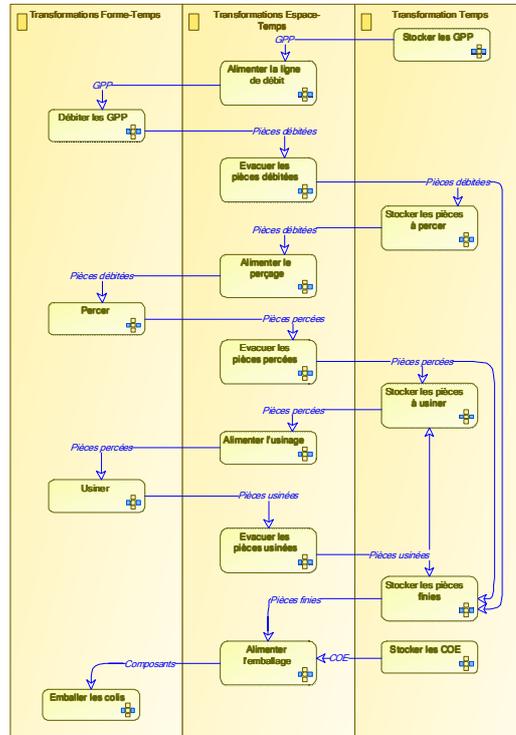


Figure 40. Processus de transformation du flux physique finalisant

3. Modèle AS IS : le pilotage de la production par un ordonnancement centralisé

Le système de pilotage par ordonnancement centralisé repose sur la génération quotidienne d'un ordonnancement détaillé pour chacune des ressources. Ce programme est généré par l'agent d'ordonnancement à l'aide d'une application dédiée, en fonction du cadre fixé par le plan directeur de production. Ce programme est transmis aux opérateurs via des terminaux de terrain, qui permettent également de remonter les déclarations de production, qui alimentent la génération de l'ordonnancement du lendemain. Le diagramme de flux illustrant le pilotage de la production est présenté sur la Figure 41.

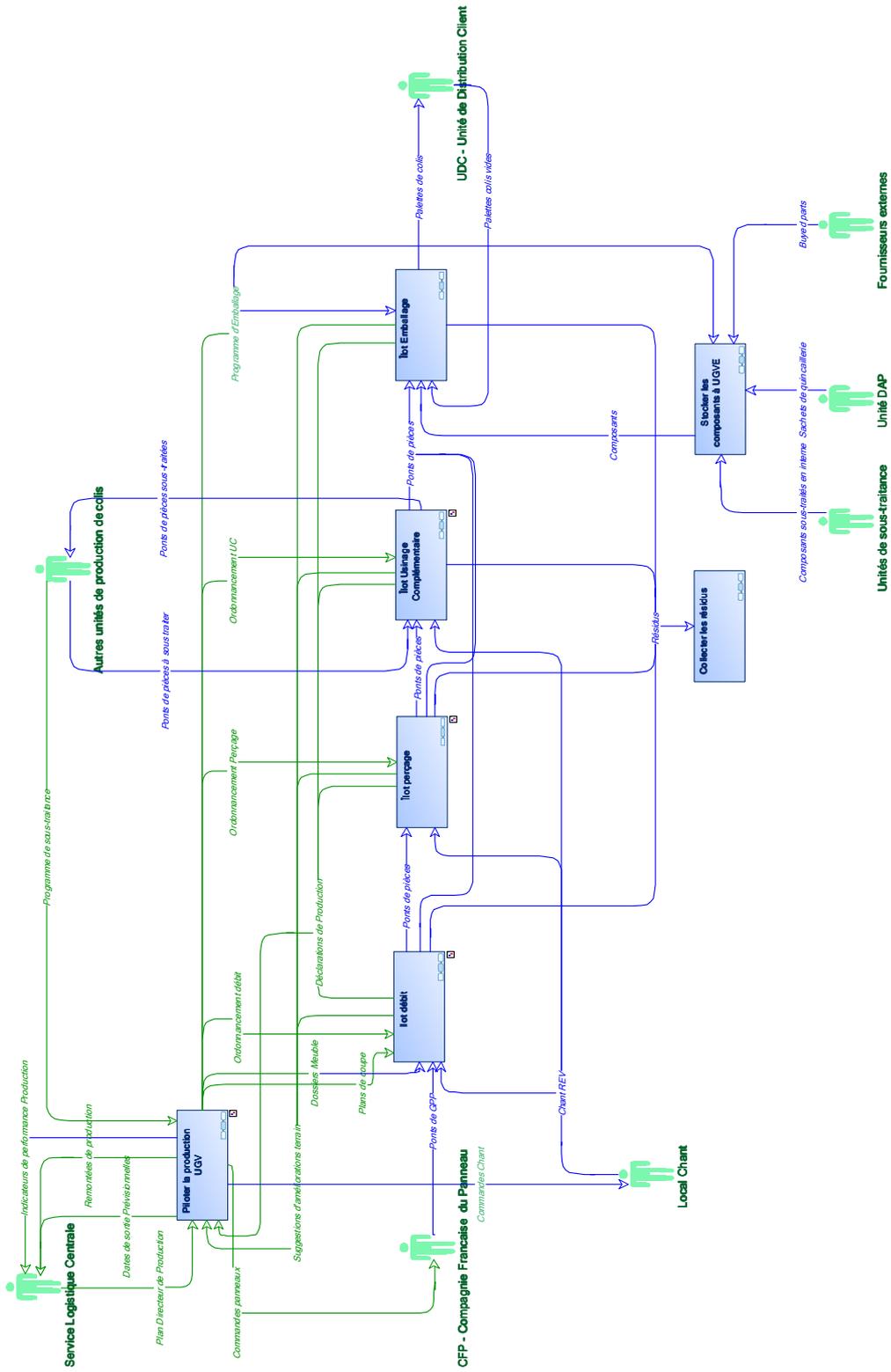


Figure 41. Diagramme de processus de la production pilotée par un ordonnancement centralisé

Le contrôle des différents processus peut également être modélisé sous la forme de boucles cybernétiques. La Figure 42 présente la décomposition fonctionnelle du processus de débit. La gestion des différentes ressources de transformation de l'îlot est assurée par le responsable d'îlot et par les conducteurs de machine, en fonction de l'ordonnancement établi par la logistique. Le retour d'informations permet à la logistique d'adapter l'ordonnancement en fonction des événements survenant sur le terrain. L'actionnement se traduit par l'alimentation de la ligne de débit par un cariste. Les GPP sont alimentés par séquence en respectant l'ordonnancement pré-établi. Les opérateurs de sortie de ligne réalisent à la fois la fonction logistique d'évacuation des pièces débitées et d'observation de la production, par le biais de déclarations de production.

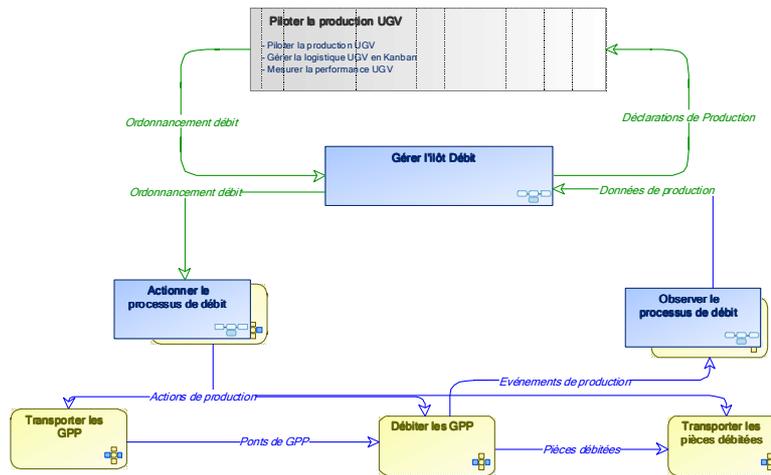


Figure 42. Boucle de pilotage du processus de débit par un ordonnancement centralisé

L'échange « top-down » a pour finalité la transmission de l'ordonnancement détaillé à mettre en œuvre, généré par le MES à destination des acteurs qui l'appliquent sur le terrain (Figure 43). L'ordonnancement détaillé rafraîchi quotidiennement est ensuite transmis, également de manière quotidienne, aux terminaux d'ateliers afin de le mettre à disposition des acteurs. Ces acteurs ont pour objectif de le mettre en œuvre, mais les aléas de la production peuvent les conduire à l'adapter en temps réel, en accord avec le responsable d'îlot. Par exemple si le lot de produits à usiner n'est pas disponible devant la machine, les opérateurs doivent prendre le lot suivant. Si ce lot n'est pas disponible, ils doivent alerter le responsable d'îlot qui reconsidère l'ordonnancement en fonction des informations détenue localement, qui se résument au stock disponible devant la ressource. Le temps entre la prise d'une décision d'ordonnancement prise au niveau de l'unité et son application sur le terrain varie donc de 0 à 24 heures.

« Le diagramme de workflow donne une représentation générale d'un service ou d'un métier. Il décrit l'enchaînement des opérations et les services avec lesquels il communique. » (Source : MEGA)

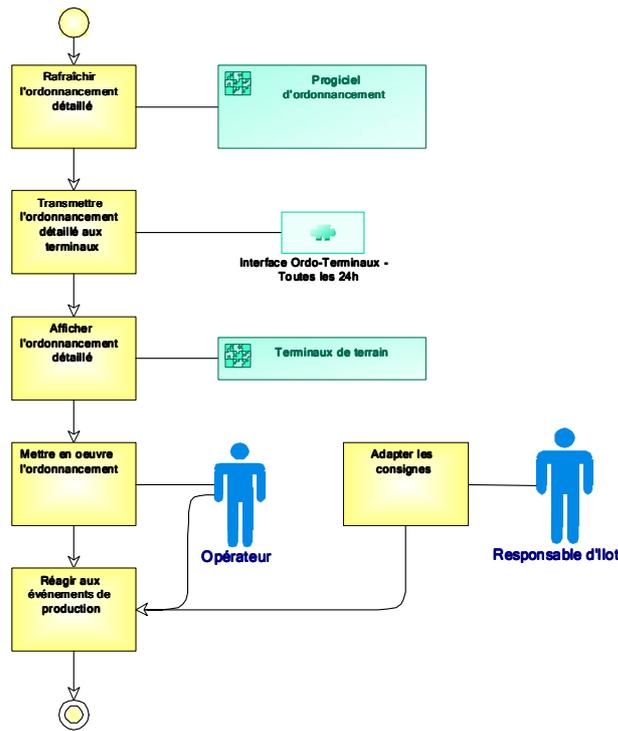


Figure 43. Workflow de mise en oeuvre de l'ordonnancement centralisé

A l'inverse, l'échange « bottom-up » a pour finalité la captation des événements de production et leur transmission aux différentes composantes du système d'information : base de suivi des temps, MES et système de gestion (Figure 44). Les terminaux de terrain, grâce à des capteurs, détectent tout arrêt machine ou perte de cadence en temps réel. La détection d'un arrêt demande le renseignement de la nature de l'aléa (réglage, panne, pause...) par l'opérateur. L'opérateur est également appelé à renseigner les événements comme le changement d'OF, le passage de réglage à production, et les quantités bonnes, à réparer ou à rebuter pour chaque lot traité. Cette saisie doit se faire le plus rapidement possible après la survenue d'un événement mais l'intervention humaine et les différentes tâches affectées aux opérateurs peuvent induire un délai non maîtrisé entre la survenue d'un événement et sa saisie. La base de suivi des temps est mise à jour instantanément lors du renseignement d'un événement. Cette base de suivi des temps réalise une première agrégation des données, transformant une séquence d'événements horodatés en périodes associées à différents états de la ressource. Une interface toute les quatre heures permet la mise à jour de la base MES, qui le traduit en avancement pour les différents OFs (Recomposition de l'état du flux de produits à partir des informations sur les ressources). L'ERP est remis à jour quotidiennement à partir des données du MES, afin de rafraîchir les dates prévues de sortie de fabrication, les niveaux de stock prévisionnel et les performances des différentes ressources.

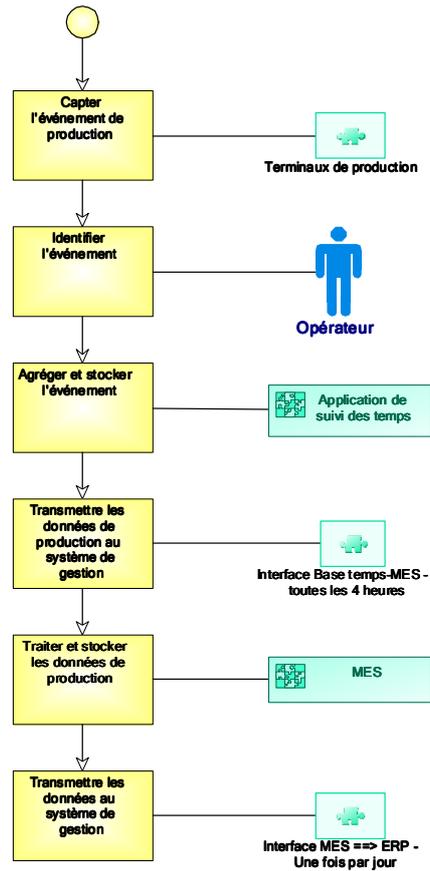


Figure 44. Diagramme de workflow "Remontées de production"

L'ordonnancement étant rafraîchi quotidiennement, les aléas de production comme les indisponibilités machines, la non-qualité ou le manque de matières premières peuvent conduire à remettre en cause l'ordonnancement pré-établi soit directement sur le terrain, soit en consultant le responsable d'îlot. La logistique peut également être amenée à modifier les priorités en fonction d'urgences commerciales, auquel cas l'information est relayée par les responsables d'îlots.

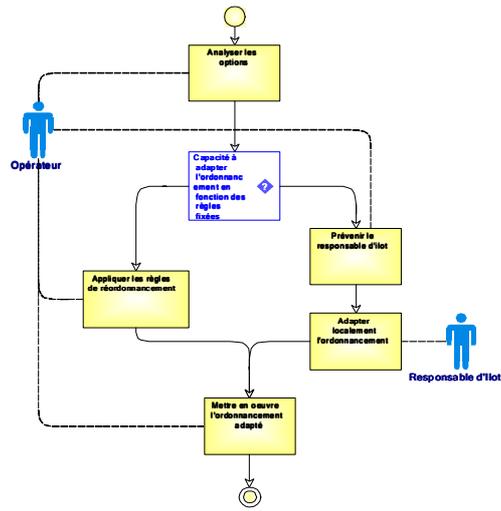


Figure 45. Workflow de prise et d'application d'une décision de réordonnancement

4. Modèle AS IS' : le pilotage de la production en Kanban

Le pilotage de la production en kanban ne repose plus sur l'ordonnancement des l'ensembles des tâches à réaliser pour produire le besoin d'une semaine, mais par la mise en circulation, en fonction de la consommation client, d'étiquettes représentant les composants à produire pour reconstituer le stock de produits finis.

Un processus de déclenchement de la production détermine quotidiennement, en fonction des paramètres de la boucle kanban quels lots doivent être produits. Les paramètres de cette boucle kanban sont, pour chaque référence, sa taille de lot et le nombre d'étiquettes en circulation. Lorsque le nombre d'étiquettes accumulées pour une référence donnée atteint la taille de lot, alors la production de celui-ci est déclenchée. La mise en production d'un ordre se traduit par l'ajout en queue du train d'ordonnancement de chaque îlot d'une étiquette représentant l'ensemble des opérations à réaliser pour ce colis (Figure 17).

De cette façon, chaque îlot pourra séquencer la réalisation des différentes tâches à réaliser en fonction de la priorité client qui est également l'ordre à respecter à l'emballage. Cette séquence d'ordres priorisés est la seule information en provenance du système centralisé, diffusé à l'ensemble des acteurs du terrain.

En cours d'exécution, la réalisation de l'ensemble des tâches concernant une étiquette dans un îlot se traduit par le déplacement de l'étiquette sur le tableau de l'îlot suivant, indiquant ainsi la disponibilité des pièces à usiner. L'étiquette qui est une entité du flux d'informations, est déplacée au moment de la mise à disposition des pièces, d'où une solidarité des flux physiques et informationnels. Le diagramme de flux illustrant le pilotage de la production est présenté sur la Figure 46.

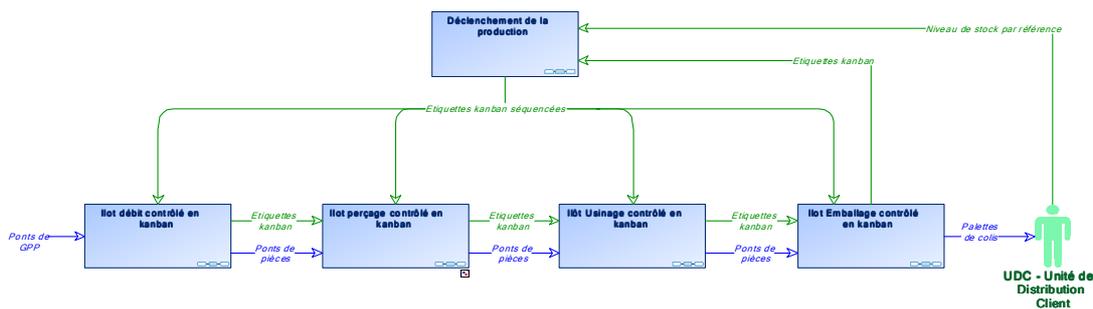


Figure 46. Diagramme de processus de la production pilotée en kanban

La boucle de contrôle des îlots est portée par le terrain. L'exemple du perçage est montré sur la Figure 47. Les décisions sont prises par les acteurs du terrain. Le flux d'information dont dispose chaque décideur de terrain est constitué d'une part par les étiquettes positionnées par la logistique centrale permettant le partage entre les différents îlots d'une même priorité client, et d'autre part par les étiquettes qui circulent entre îlot afin de matérialiser la disponibilité des pièces à usiner. Le processus de gestion entraîne donc la mise en œuvre des ressources en fonction de la présence des étiquettes sur chaque tableau.

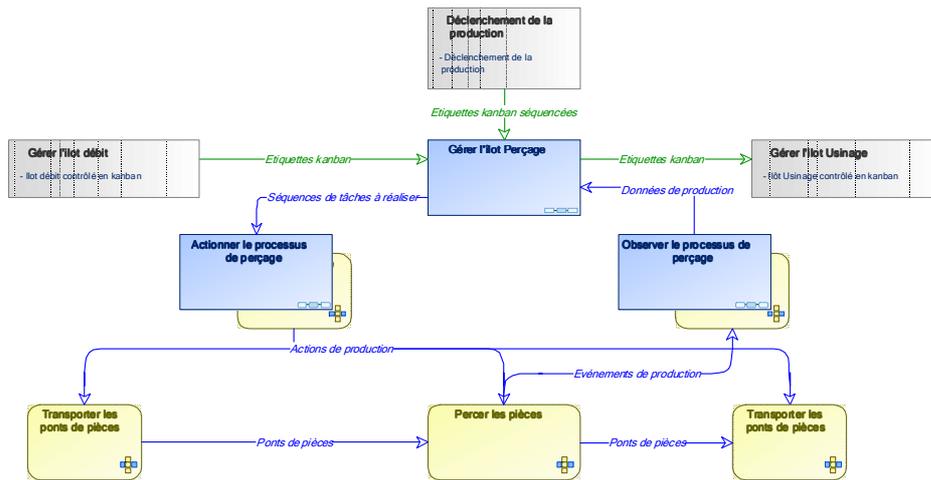


Figure 47. Boucle de pilotage du processus de perçage en kanban

La décision d’ordonnancement est déclenchée par la fin de réalisation d’une opération sur une ressource (Figure 48). En fin de réalisation d’une opération, l’opérateur ou le conducteur de machine se rend devant le tableau d’ordonnancement de son îlot. Si la tâche réalisée était la dernière correspondant à ce lot de pièces, l’opérateur porte l’étiquette sur le tableau suivant. Enfin, l’opérateur parcourt le train, à partir de la tête, et cherche le premier lot dont l’intégralité de la matière est disponible et dont il peut réaliser une opération. Si aucune opération n’est réalisable, le responsable d’îlot est alerté pour éventuellement décider de réaliser des tâches affectées aux autres ressources, ou débiter un lot dont l’intégralité de la matière n’est pas encore terminée sur la ressource précédente (chevauchement). Les règles de gestion sont formalisées par des procédures affichées sur chacun des tableaux et qui doivent être scrupuleusement respectées.

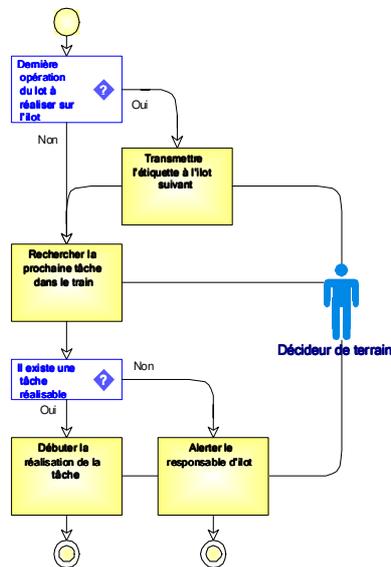


Figure 48. Workflow d'une décision d'ordonnancement en kanban

Les décisions étant prises au moment de leur application, leur pertinence n'est par altérée entre le moment de la prise de décision et son application. Il n'existe donc pas de décisions de réordonnement sur le terrain.

Cependant, les modifications apportées à l'ordonnement de l'emballage ne sont pas transmises de façon formelle aux îlots précédents, et il est donc délicat de modifier l'ordre des priorités en cours d'exécution.

Une procédure de gestion des ordres urgents permet de réaliser les opérations correspondantes en priorité sur chaque ressource afin d'accélérer sa production.

La remontée des informations au système centralisé utilise la même structure que l'ordonnement centralisé : la réalisation des opérations et les quantités réalisées sont saisies par le biais des terminaux de terrain, et la séquence d'opérations entre la saisie d'un événement et sa prise en compte par le système centralisé est également celle présentée sur la Figure 44.

5. Analyse

Dans cette section, une analyse des modèles présentés précédemment est réalisée suivant les différents axes identifiés dans le premier chapitre.

5.1 (Mesure) Les informations remontées sont fausses ou désynchronisées

Afin d'analyser l'impact de la synchronisation du flux d'informations avec le flux physique sur les processus décisionnels, nous nous appuyons sur le modèle du processus de décision à quatre étapes défini par le prix Nobel Herbert Simon (Simon, 1996) :

- **L'intelligence :** Perception du problème et des différentes variables.
- **La conception :** Elaboration, modélisation et évaluation d'une ou plusieurs solutions possibles.
- **La sélection :** Choix de la meilleure alternative en fonction de son impact sur la performance, en fonction des objectifs.
- **L'implémentation :** Mise en œuvre de la solution retenue et mesure.

Pour chacune de ces étapes, nous analysons les dysfonctionnements identifiés dans le système existant et les opportunités apportées par le produit informant.

5.1.1 L'intelligence

L'objectif de la phase d'intelligence est de collecter les informations permettant d'établir un diagnostic de la situation et de définir un objectif. La collecte des événements est donc une étape cruciale dans le processus décisionnel, l'ensemble des décisions prises par la suite reposant sur les informations collectées. Un système d'acquisition d'événements peut être défini par les caractéristiques suivantes :

- **Délai :** quel délai est introduit entre le moment où un événement survient et sa prise en compte par l'entité décisionnelle ?

- **Agrégation** : quel est le niveau d'agrégation des données remontées : par exemple les informations sur l'avancement de la production concernent-elles un item particulier ou l'ensemble d'un lot ?
- **Fiabilité** : les données remontées sont elles justes, et l'information d'horodatage correspond-elle réellement au moment où l'événement s'est produit ?
- **Exhaustivité** : les informations collectées sont elles exhaustives ?

Dans le système initial, le processus d'acquisition nécessite l'intervention d'un opérateur humain pour la saisie ou le renseignement d'un événement (Figure 44). Cette intervention humaine représente d'une part un coût non négligeable, et d'autre part génère des imprécisions et des erreurs dans la capture des données :

- le **coût main-d'œuvre** de chacune des saisies limite le nombre d'événements renseignés. Par exemple, le suivi des produits à la palette est nettement moins coûteux que le suivi des produits à l'unité. Ce phénomène induit des constantes de temps importantes dans le système : les débuts et fins d'opérations (au niveau lot) sont renseignés, mais l'avancement dans la réalisation de la tâche (nombre de pièces réalisé) n'est pas connu.
- La capture manuelle peut **générer des erreurs**, tant au niveau des données elles-mêmes (saisie d'un mauvais identifiant par exemple) que dans l'information d'horodatage (la saisie de l'information n'est pas synchrone avec l'occurrence de l'événement)
- Les **contraintes techniques** comme la charge réseau, les capacités de traitement finies ou le temps d'accès aux données conduit à la mise en place de tampons informationnels (transmission périodique batchée et non un flux continu en temps réel), qui ajoutent des délais au processus de transmission d'informations.

De plus, comme dans la majorité des systèmes de pilotage de la production, les informations sont orientées ressources : les événements remontés concernent les ressources et pas les produits (début et fin de réglage, de pannes, de production). Par conséquent, seules les opérations à valeur ajoutée sont suivies et mesurées, alors qu'elles ne représentent qu'une part mineure du temps que passe un produit dans le système de production. La réduction des temps à non valeur ajoutée semble donc être une piste majeure de réduction du temps d'écoulement ; et ainsi d'améliorer la réactivité du système de production, mais nécessite un suivi du flux de produits en lui-même et non plus seulement des opérations de transformation. L'instrumentation du produit permet d'adjoindre aux informations habituellement utilisées des informations propres au flux de produits, comme l'ont souligné (McFarlane *et al*, 2003) : *"The availability of timely, accurate and highly specific product data can have significant ramifications for the underlying control system in a given operation (...) the introduction of auto-ID data provides the possibility of information relating to a product being used in conjunction with typical operational data"*.

5.1.2 La conception

La phase de conception consiste à modéliser une ou plusieurs solutions possibles, en utilisant une représentation compréhensible du problème. La pertinence du processus de conception dépend essentiellement de deux paramètres :

- **La justesse et la précision du modèle** : en effet, un processus de modélisation induit toujours un biais qui se traduit par des écarts entre le modèle et le système réel
- **L'initialisation du modèle** : l'utilisation d'une représentation erronée du réel lors de la résolution d'un problème peut conduire à prendre une décision caduque. La précision,

la justesse et la fraîcheur des données collectées au cours de la phase d'intelligence apparaissent donc comme des éléments clés du processus de conception.

La pertinence de la phase de conception repose donc sur la qualité du modèle et la fiabilité des données d'entrée. En ce sens, l'acquisition en temps réel de données précises sur la dynamique du système permet d'enrichir et d'améliorer le modèle utilisé en réduisant les écarts avec le système réel. La disponibilité d'informations fiables et précises laisse envisager deux types de bénéfices :

- **Le suivi en temps réel des divergences** entre l'évolution du modèle et celle du système réel permet l'amélioration permanente du modèle. Une meilleure fidélité du modèle utilisé dans la prise de décision permettra une meilleure appréciation de la pertinence des différentes alternatives.
- La disponibilité en temps réel d'une **vision précise et juste** de l'avancement de chacun des lots en cours de production permettra d'assurer la pertinence des solutions proposées.

5.1.3 La sélection

La multiplicité des objectifs rend nécessaire l'intervention d'un être humain dans le processus de sélection, celui-ci apportant sa vision de l'état instantané du système et son expérience. Evidemment, plus les informations mises à la disposition du décideur seront fiables et précises et plus la décision prise pourra être prise en considérant son impact potentiel réel sur le système de production. Les expériences passées d'utilisation d'outils de simulation pour évaluer de manière prédictive l'évolution à court terme du système de production ont échouées, notamment à cause de la difficulté à initialiser le modèle dans un état représentatif de l'état du système réel. La disponibilité d'une représentation précise du flux de produits permettra l'initialisation d'outils de simulation afin d'assister les décideurs, en leur permettant d'évaluer l'impact de différents alternatives.

5.1.4 L'implémentation

Si l'implémentation n'a pas initialement été énoncée par Simon comme une étape du processus de décision, nous la considérons comme cruciale au sens de l'exécution de la production. En effet, il a été évoqué le fait que des solutions finement optimisées, par exemple au niveau ordonnancement d'atelier, ne peuvent pas être mises en œuvre sur le terrain à cause de changements survenant pendant le processus d'élaboration et de sélection de la solution. Par exemple, l'ordonnancement détaillé est réévalué quotidiennement : si un événement comme une panne survient, sa prise en compte par l'ordonnancement peut prendre jusqu'à 24 heures dans le pire des cas, 12 heures en moyenne. L'ordonnancement pré-établi n'est donc plus réalisable et doit être adapté sur le terrain, en temps réel, sans recourir au système d'optimisation et souvent avec très peu d'informations sur l'état du système de production ou du flux de produits. Dans de telles situations, la solution implémentée est très différente de celle calculée.

L'utilisation de technologies d'instrumentation du produit peut permettre de mesurer et d'analyse à posteriori le degré de réalisation des décisions prises afin par exemple de mettre en place une base de cas prenant en compte la robustesse des solutions.

5.2 (Méthodes) Le processus décisionnel n'assure pas l'optimalité

La complexité du problème d'ordonnancement traité implique d'une part une intervention humaine dans le processus d'ordonnancement centralisé et d'autre part ne permet pas la prise en compte de toutes les règles d'optimisations locales, propres à chaque ressource. Par exemple, les regroupements permettant l'optimisation des temps de réglages ne sont pris en compte que sur les goulots identifiés.

Par ailleurs, le temps de mise en œuvre de l'ordonnancement et la période de sa mise à jour le rend parfois caduque avant son application : si l'ordonnancement n'est pas réalisable, il est réajusté sur le terrain, avec une visibilité seulement locale sur les niveaux de stocks d'en-cours immédiatement en amont et en aval de la ressource. De plus les décideurs de terrain peuvent prendre l'initiative de modifier l'ordonnancement afin d'optimiser la productivité d'une ressource. Cependant ces décisions sont prises en fonction d'objectifs locaux uniquement, sans capacité à évaluer l'impact sur le fonctionnement global du système.

La perception qu'ont les décideurs de terrain à un instant t de l'état du système de production est uniquement visuelle : ils constatent l'état de remplissage des différents stocks d'en cours, et connaissent la charge de travail disponible devant leur centre de charge en fonction des dossiers de suivi d'OFS présents sur leur poste de travail. Leur visibilité sur les objectifs globaux comme le programme d'emballage à respecter, est faible, les consignes de modification étant prises par les responsables d'îlots et transmises oralement.

Si la mise en place du système kanban permet de visualiser simplement les informations locales (notamment la charge disponible devant chacun des centres de charge), elle n'offre pas une vision globale de la situation. L'ordonnancement généré par les événements de production est toujours réalisable et ne doit en théorie pas être modifié afin de permettre la satisfaction du client. Cependant, les règles de gestion des files d'attente à chaque poste de travail sont toutes de types FIFO : des analyses par simulation ont montré que l'ordonnancements ainsi mis en œuvre n'était pas optimal en terme de temps d'écoulement moyen ou de productivité des goulots. Dans la pratique, des initiatives sont parfois prises par les décideurs de terrain pour réaliser des optimisations locales, toujours sans visibilité sur l'impact global de telles décisions.

L'absence d'informations globales lors de la prise de décision « en temps réel » ne permet pas l'optimisation globale du système, et rend difficile la mise en place d'outils d'aide à la décision. En ce sens, il apparaît opportun de donner aux décideurs de terrain une vision formalisée de la situation globale, ainsi que de les outiller pour leur permettre d'évaluer l'impact de leurs décisions locales sur la performance globale.

De plus, les approches de pilotage distribué reposent sur la décomposition du problème globale en un ensemble de sous problèmes plus simples à résoudre, en ne prenant par exemple plus en compte l'ordonnancement détaillé de manière globale mais machine par machine, en prenant en compte les objectifs globaux comme par exemple le respect d'un programme d'emballage établi de manière centralisée afin de garantir le service au client.

5.3 (Management) L'organisation hiérarchique crée de l'inertie

Le terme décideurs de terrain désigne l'ensemble des acteurs de la production, opérateurs, caristes, conducteurs de ligne ou responsables d'îlot. En règle générale, les décisions de modifications sont prises par les responsables d'îlots, ou tout au moins d'après leurs consignes. Par conséquent, en cas d'aléas, les opérateurs consultent le responsable d'îlot.

Ce processus génère un délai au sens où il faut contacter le responsable d'îlot qui n'est pas en permanence présent sur le terrain, lui exposer la situation avant d'obtenir de nouvelles consignes. De plus, le responsable d'îlot ne dispose pas non plus d'une vision globale de la situation, il peut donc être amené à consulter d'autres RIs ou le service logistique, ce qui induit un délai supplémentaire.

Par ailleurs, l'entreprise met en place une politique dite de subsidiarité, par laquelle une décision doit être prise par l'entité décisionnelle de plus bas niveau hiérarchique pouvant la prendre. Sous réserve de leur donner les moyens de le faire, il est donc concevable et intéressant de faire prendre les décisions d'optimisation locale aux opérateurs afin d'améliorer leur implication, d'accélérer le processus décisionnel et d'améliorer la réactivité du système de production. Un système d'information doit donc être mis en place et des règles de décision doivent être établies permettant à chacun des acteurs du terrain de prendre les décisions concernant son périmètre. Poussé à l'extrême, le concept de subsidiarité pourrait amener à ce que le produit lui-même prenne les décisions le concernant. Dans un premier temps, il est envisageable que, sans prendre lui-même les décisions, le produit soit support de la prise de décision le concernant.

5.4 (Moyens) Les contraintes de productivité des différents îlots sont divergentes

Comme évoqué en 5.2, la complexité du problème d'ordonnancement ne permet pas de prendre en compte dans des délais réalistes l'ensemble des contraintes de productivité pour chacune des ressources. Par ailleurs, les leviers favorisant la productivité différent d'un îlot à l'autre et ne sont pas toujours formalisés. Par conséquent, il n'apparaît pas judicieux d'optimiser de façon centralisée l'ordonnancement détaillé de toutes les ressources, d'une part pour traiter des problèmes plus simples et d'autre part car la connaissance des ressources se trouve sur le terrain. A l'inverse, il n'est pas réaliste de laisser tous les décideurs de terrain décider de l'ordonnancement au fur et à mesure : il est nécessaire qu'un cadre soit fixé afin d'orienter leurs décisions.

De plus, un référentiel doit permettre d'évaluer l'impact de différentes solutions possibles, à la fois sur la performance globale que sur la performance locale, et de réaliser les meilleurs choix possibles.

5.5 (Milieu) La demande client est diversifiée et versatile

Une réponse efficace à une demande client versatile et diversifiée implique deux solutions : la mise en place d'un stock de produits finis important ou l'amélioration de la réactivité du système de production. La mise en place d'un pilotage de type Juste À Temps s'inscrit dans une logique d'amélioration de la réactivité permettant de satisfaire le client en portant un stock réduit. Cependant, comme évoqué précédemment, les solutions générées par le système kanban ne sont pas optimales en terme de temps d'écoulement : il est donc possible d'améliorer la réactivité. De plus, des variations importantes de temps d'écoulement sont constatées, notamment en fonction du remplissage des en-cours et de la typologie des produits. Le système kanban étant dimensionné par rapport à un temps d'écoulement moyen, les aspects dynamiques d'écoulement de flux ne sont donc pas pris en compte, et cette variabilité des temps d'écoulement peut se traduire par une perte de service client. L'absence d'observation du flux de produits oblige à agréger les remontées de production des différentes ressources afin d'établir des temps d'attente et d'écoulement moyen. La grande ampleur du

travail de collecte et de traitement des données permettant un réajustement des paramètres du kanban conduit donc à des inadéquations entre son paramétrage et les conditions réelles du terrain. Un ajustement plus régulier des paramètres permettrait d'améliorer la satisfaction du client.

Les priorités clients ne sont pas connues sur le terrain par un autre biais que l'ordre d'emballage fixé par la logistique. L'impact de chacun des ordres sur le taux de service de l'unité n'est donc pas connu des décideurs de terrain. En effet, en fonction des stocks de sécurité mis en place ou de la variabilité des commandes, un retard sur certains ordres aura un impact important sur le taux de service client, alors qu'un délai supplémentaire sur d'autres ordres ne fera que retarder le re-complètement du stock sans pénaliser le client final. Il est donc possible que la solution ayant un impact moindre sur la satisfaction du client ne soit ponctuellement pas celle qui minimise le temps d'écoulement de l'ensemble des lots. Certains ordres sont considérés comme critiques et sont traités en priorité (positionnés en tête du train) sur les différents tableaux. Les ordres critiques sont gérés de manière orale et non formalisée, ce qui peut entraîner différents dysfonctionnements comme la non transmission de l'information, ou l'indisponibilité des composants nécessaires à certaines opérations (composants achetés pour l'emballage, chant pour les opérations d'usinage). Si ce système de gestion des urgences permet d'accélérer considérablement l'écoulement de ces produits, il peut en résulter des perturbations liées au non respect des priorités : par exemple il est possible de produire à temps un ordre critique, mais en générant une rupture non anticipée sur l'emballage, l'ensemble des pièces d'un autre ordre n'étant pas terminées.

Le système proposé doit donc également permettre de gérer dans de bonnes conditions les ordres critiques, tout en minimisant les perturbations induites sur les autres ordres.

5.6 (Maturité) La solution retenue doit être éprouvée

Les spécificités du système de production et du système kanban mis en place ne permettent pas de transposer des solutions existantes. Il est donc nécessaire de construire une architecture de pilotage nouvelle, qui n'aura donc jamais été éprouvée par d'autres applications.

La proposition devra donc préalablement être validée et caractérisée. Une architecture de simulation, basée sur un modèle du système réel, doit permettre de placer le système de pilotage proposée dans des situations réalistes d'une part pour vérifier son bon fonctionnement et sa stabilité et d'autre part quantifier ses performance afin de les comparer à celles du système existant. Le modèle du système existant doit donc permettre la génération d'un modèle d'émulation du système de production permettant de placer le système de pilotage dans des conditions réelles d'utilisation.

D'un point de vu technologique, les applications RFID existantes dans le monde de la production ne permettent pas d'affirmer la maturité de cette technologie, notamment le taux de lectures n'est pas de 100%. La solution proposée doit donc intégrer des mécanismes permettant la robustesse aux aléas de lectures.

6. Modèle TO BE : le pilotage de la production par Kanban actif

L'analyse des modèles du système de production permet d'identifier deux faiblesses majeures :

- **De nature informationnelle** : le flux de produits n'est pas visible, il n'existe pas de représentation centralisée en temps réel de l'état du système de production.
- **De nature organisationnelle** : les écarts entre les décisions prises et leur application ne permettent pas de mettre en œuvre des solutions optimales.

L'utilisation dans le système centralisé d'une vue globale du système de production permet de réaliser des optimisations en affinant l'ordonnancement réalisé. Cependant l'alimentation de ce système induit des constantes de temps, et le délai entre prise de décision et application génère des perturbations. Inversement, les décisions prises en temps réel dans le fonctionnement en kanban sont de fait pertinentes au moment de leur application, mais les décideurs de terrain n'ont qu'une vue locale du système de production.

Nous postulons que l'infotronisation des objets flux physique doit permettre à la fois de résoudre le problème informationnel en rendant le flux de produits visible, mais également de supporter des décisions concernant son devenir à même le flux. Par conséquent, le système de pilotage proposé repose sur deux éléments :

- **un système d'information** de niveau MES, alimenté par des événements provenant du flux de produits,
- **une architecture** dans laquelle les décideurs de terrain disposent des outils et du pouvoir de décision nécessaire au bon pilotage des flux de produits.

Le système d'information

Par système d'information, nous désignons l'ensemble des éléments permettant de disposer d'une représentation de l'état du système de production. Il doit prendre en compte les contraintes suivantes :

- **Le respect des contraintes de temps** : le flux d'information doit être synchrone doit être synchronisé avec le flux physique.
- **Le degré de finesse adapté** : les données remontées sont agrégées et raffinées pour donner aux décideurs une vue pertinente de la réalité par rapport au problème considéré,
- **La fiabilité** : la qualité et la pertinence des décisions prises dépend essentiellement de l'exactitude et de la fraîcheur des informations. Des erreurs, généralement induites par la saisie manuelles, dégradent la cohérence des décisions prises.
- **L'exhaustivité** : la connaissance de la situation doit être la plus complète possible pour permettre une optimisation globale du problème de pilotage.

Les différentes fonctions du système d'information sont donc les suivantes :

- **Capter les événements de production** : transformer les événements physiques significatifs et les transformer en événements informationnels.
- **Filtrer et agréger les données de production** : transformer les événements informationnels en requêtes permettant le maintien d'une représentation cohérentes de l'état du système physique,

- **Stocker une représentation de l'état du système physique** : structurer et stocker les données,
- **Accéder aux informations** : permettre aux différents acteurs d'accéder aux informations pertinentes et synthétiques dont ils ont besoin

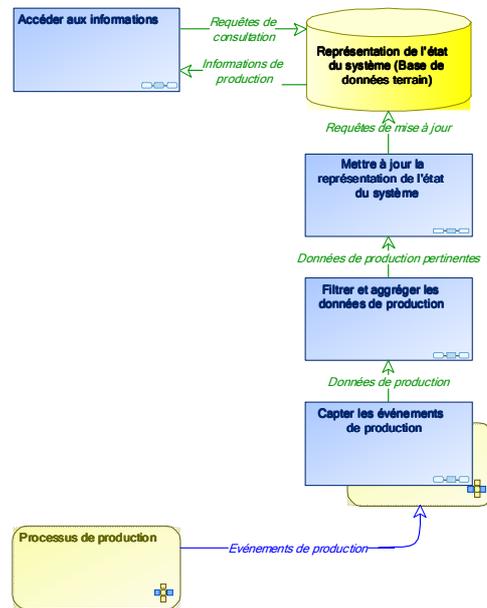


Figure 49. Vue fonctionnelle du système d'information

Capter les événements de production

Afin de synchroniser le flux d'information avec le flux physique, nous nous appuyons sur un système de collecte automatique basé sur l'utilisation de la technologie RFID.

La vue la plus fine est détaillée de l'état du flux de produits est apportée en identifiant individuellement chaque instance de produit, dans notre cas chacune des pièces d'un lot. La pose de tags au moment de la pose du chant a été étudiée : cette solution a montré de bons résultats et son utilisation industrielle peut être envisagée sous réserve de trouver le tag adapté. Cependant, le prix de revient modique de chaque pièce, au regard du coût élevé des tags, ne rend pas réaliste l'identification de chaque instance de produit en l'état actuel des choses. De plus, l'empilement de plusieurs dizaines de pièces sur un même panneau martyr ne permet pas d'assurer la lecture de l'ensemble des étiquettes lors du passage dans le champ d'un lecteur.

Afin de réduire le nombre d'étiquettes à mettre en circulation, il a également été envisagé d'identifier chaque pont de pièce, en identifiant les panneaux martyrs. Cette solution propose également l'avantage d'utiliser en boucle fermée ce qui réduit considérablement le coût d'exploitation. L'infrastructure de lecture à mettre en œuvre est très importante et coûteuse, même s'il est possible de minimiser le nombre de lecteurs en ne les positionnant non pas sur chaque emplacement de stockage mais sur chaque moyen de manutention, et en équipant chaque emplacement de stockage d'une étiquette. Cependant, il devient crucial d'associer à un identifiant de contenant le contenu réellement porté. Les machines étant toutes contrôlées par des systèmes propriétaires, de différents constructeurs, il n'est pas envisageable d'automatiser une telle transaction. Par conséquent, l'association contenant/contenu devrait

être réalisée par un opérateur humain, ce qui induit de nouveau des risques d'erreurs et une consommation de main d'œuvre.

La mise en place du pilotage en kanban offre une opportunité de rendre le flux de produits informant en se basant sur une architecture simple. En effet, le flux d'étiquettes est solidaire et synchrone du flux de produits. Les étiquettes sont déplacées au fur et à mesure que chaque lot subit des transformations et le positionnement des étiquettes sur les tableaux permet à un instant t d'avoir une vue précise et juste de la situation des différents ordres dans l'atelier. Il devient donc possible, en associant une étiquette à chaque lot de pièce (et non plus de colis) en étiquetant les cartes kanban et en équipant les tableaux de lecteurs RFID, de connaître en temps réel l'état des différents ordres constituant le flux de produits, les quantités réalisées pour chacun provenant encore des déclarations manuelles.

Par conséquent, nous nous appuyons sur un système de « kanbans informants » : tout événement significatif de production comme le début ou la fin d'une tâche correspondent à des mouvements d'étiquettes d'un tableau à l'autre, ce qui se traduit pour le système RFID par la disparition d'une étiquette du champ d'un lecteur et son apparition dans le champ d'un autre lecteur.

Agréger les données de production

Les données transmises par les lecteurs RFID correspondent en fait, pour chaque lecteur, d'une liste horodatée des étiquettes présentes dans le champ de lecture. Une telle information n'est pas significative au niveau du pilotage de l'atelier. Il est donc nécessaire d'implémenter un middleware, chargé d'agréger les informations en provenance des différents lecteurs.

Une table de correspondance permet de traduire le déplacement d'une étiquette, identifiée par un numéro unique, d'un tableau vers un autre, en une information de fin de réalisation d'une opération et donc de disponibilité des produits au stade suivant. Une requête est alors générée et exécutée dans le but de mettre à jour la base de donnée afin de la maintenir en cohérence avec l'état du système physique (Figure 50).

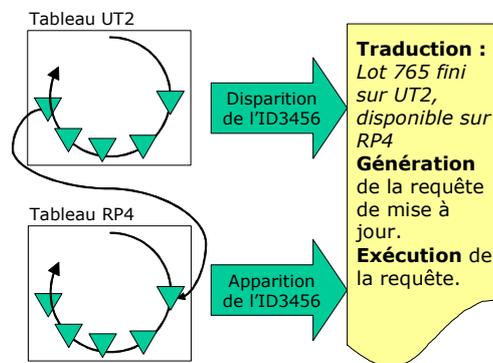


Figure 50. Déplacement d'un kanban actif et traitement associé

Stocker une représentation de l'état du système physique

Afin de permettre un support efficace à la décision sur le terrain, le système d'information doit être capable de stocker et de donner accès à des données de trois types :

- **Les données techniques** comme les gammes d'usinage, qui permettent la mise en œuvre de la production et le pilotage des flux ;
- **Les données dynamiques**, représentant l'état du système à l'instant t ;
- **Les données de traçabilité**, permettant de conserver les informations dynamiques pertinentes.

Afin de structurer le système de collecte et de stockage des données, nous nous appuyons sur le standard S95 et sur les spécifications B2MML. Nous retiendrons notamment le modèle de définition d'un produit, qui définit les règles de production d'un produit à l'aide des objets suivants :

- **Product Production Rule** : règles de production du produit (recettes) ;
- **Bill of resources** : liste des ressources (personnel, matériel, énergie, matières premières et consommables) requises pour produire un produit ;
- **Bill of materials** : c'est la nomenclature du produit, qui décrit l'ensemble des matières première ou sous-ensembles nécessaires à la fabrication du produit, ainsi que la quantité nécessaire (coefficient de nomenclature)
- **Product segment** : Le segment de produit est défini comme l'intersection des règles de production et de la liste des ressources. Il décrit une opération de transformation de forme du produit, généralement réalisée dans un même lieu.
- **Process segment** : Le segment de processus correspond à un groupement logique de ressources (personnels et équipements) nécessaires à une étape de production, ou un processus. Un segment de processus peut être relatif à au moins un segment de produit. Il peut inclure du personnel, de l'équipement, des matières premières et de l'énergie.
- **Manufacturing bill** : le bon de production identifie une matière première ou une famille de matières premières nécessaire à la fabrication du produit. Il inclut l'intégralité des matières premières nécessaires à la réalisation d'un produit, alors que le segment de processus représente l'utilisation nécessaire à la réalisation d'une opération.

Pour les données techniques, la gestion de l'emballage qui est un processus d'assemblage nécessite de disposer de la nomenclature du produit. La nomenclature des différents colis est stockée dans des objets de type *Colis* et *Pièces usinées*. De même, le pilotage des différents flux de produits nécessite connaître l'ensemble des ressources disponible et les gammes d'usinage possibles pour chacun des produits. L'ensemble des ressources disponibles et leur organisation en îlots est défini par les deux tables *Ilot* et *Machine*. Enfin, les gammes d'usinage sont définies par les *Segment de Produit* et *Segment de Ressource*.

La fonction première du système d'information et le stockage d'une représentation juste de l'état du système de production. Cette représentation peut se décomposer comme étant l'état de l'ensemble des machines, l'état de l'ensemble des ordres, et l'état de l'ensemble des opérations en cours. Chacune des machines peut être « En cours d'usinage », « en cours de réglage », « en panne », « inoccupée » ou « arrêtée ». La gamme de chacun des produits peut être modélisée comme un automate à état, où le passage d'un état à l'autre se fait par la réalisation d'une opération (Figure 51). De cette manière, l'état de l'automate reflète l'état du lot de production au fur et à mesure que celui-ci subit des transformations. Enfin, chaque opération en-cours est représentée par un objet dont les attributs sont l'heure de début et l'état, qui peut être *en-cours* ou *en réglage*.

Lorsqu'une opération est terminée, l'heure de fin est renseignée et son statut passe à *terminée*.

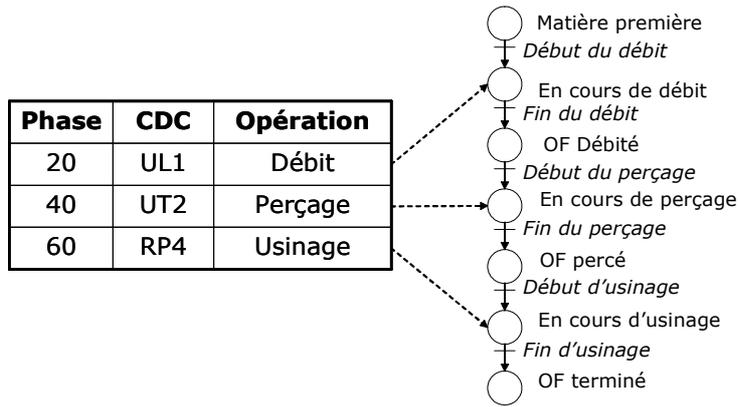


Figure 51. Transformation d'une gamme d'usinage en automate à états

Le modèle de données à mettre en œuvre pour maintenir une représentation de l'état du système de production est représenté sur la Figure 52. La structure de données se décompose en trois éléments :

- la première partie est en charge de la représentation des données techniques : gammes et nomenclatures des produits (tables colis, composant, product segment, Process segment, ressource-1 et îlot). Les liens entre colis et composants représentent la nomenclature du produit alors que les objets process segment et product segment décrivent la gamme d'usinage des produits.
- une seconde partie maintient la vision en temps réel de l'état du système de production, tant d'un point de vue du flux de produits que des ressources. Les tables « lancement colis » et « Lot de pièces » représentent les objets physiques du flux de produits, la table ressource-2 représente les différents centres de charge et les opérations représentent le lien à travers le temps entre ces différents objets.
- Enfin, une troisième partie assure la traçabilité produits et processus, en archivant une trace de l'ensemble des transformations apportées à chaque produit.

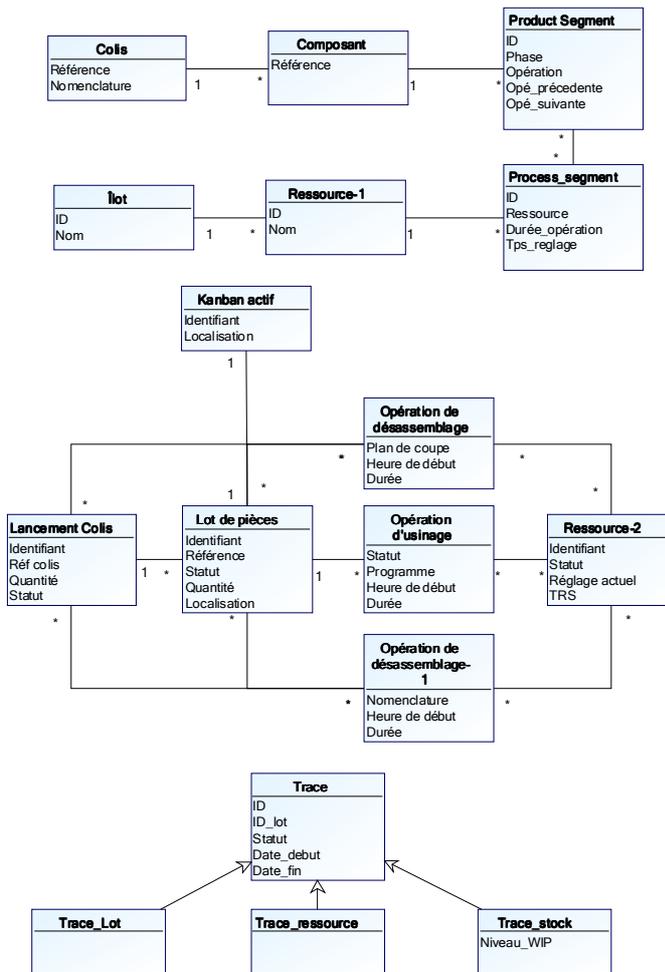


Figure 52. Modèle de données du système d'information

Accéder aux informations

Afin que la disponibilité d'une vue globale permette réellement l'amélioration du pilotage, il est nécessaire de fournir un accès simple et synthétique à ces données aux décideurs de terrain. En ce sens, il est nécessaire de définir des vues permettant, pour chacun des centre de décision, permettant de visualiser les informations pertinentes à considérer, comme par exemple l'ensemble des opérations disponible sur une machine et le taux de remplissage des en-cours des machines en aval. La Figure 53 montre par exemple la vue destinée aux gestionnaires de l'emballage, afin de les informer des colis disponibles devant l'emballage et donnant les informations permettant le pilotage de la ligne d'emballage telles que l'effectif nécessaire ou la disponibilité des différents composants.

réf colis	Qty	Pers.	Pièces usinées	ref manquantes	Relance	Réparation	UOR	UVA	Quinc	Poly	Contrôle qualité
0010RA05	200	8	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
0030CT05	150	10	OK	OK	OK	OK	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible
0255EN1Z	200	12	OK	OK	OK	OK	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible
0285PT1Z	255	12	non disponible	non disponible	OK	OK	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible
0285PT2Z	255	12	non disponible	non disponible	OK	OK	non disponible	non disponible	OK	QJO08277, QJO18304, QJO18305, QJO18306	non disponible
0285VA1Z	200	11	non disponible	non disponible	OK	OK	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible
0295EN1Z	220	12	OK	OK	OK	OK	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible
0295EN2Z	200	11	OK	OK	OK	OK	non disponible	non disponible	OK	non disponible	non disponible
0300TABA	255	12	non disponible	non disponible	OK	OK	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible	non disponible

Figure 53. Exemple de vue de la disponibilité à l'emballage

Architecture décisionnelle

La disponibilité d'une vue détaillée de la situation du système de production et la capacité à la diffuser sur le terrain permet d'envisager de donner plus de pouvoir de décision aux décideurs de terrain. Les constats faits sur les différentes stratégies de pilotage hiérarchiques et hétérarchiques ont mis en évidence leur complémentarité : l'intégration hiérarchique des processus de pilotage permet de rendre globalement cohérent et optimal le fonctionnement de ces systèmes alors que le paradigme d'intelligence distribuée permet la répartition du traitement, de la communication et de la mémorisation de l'information technique afin de rendre localement adaptable et réactif le fonctionnement du système.

Il a été mis en évidence que la finalité du système étudié est de rapporter de l'argent à travers la production de meubles en kit. Afin que la production de meubles en kit soit rentable, il est possible de distinguer cette finalité en deux sous objectifs :

- satisfaire la demande du client,
- optimiser l'utilisation des ressources mises en oeuvre

La satisfaction de la demande du client est un enjeu global pour l'unité de production. En ce sens, il est logique et cohérent qu'un processus centralisé assure le respect du taux de service client demandé. Le levier permettant d'impacter le taux de service client est PDP, dont découle directement le programme d'emballage. De plus, les interactions nécessaires avec les différents services transverses comme les approvisionnements ou la distribution conduisent à considérer le processus d'élaboration du programme d'emballage de façon centralisée.

A l'inverse, l'optimisation fine de la productivité en considérant des opportunités comme le délestage ou des regroupements de produits est beaucoup plus simple à l'échelle locale et en temps réel, en fonction de la situation courante.

Cependant, les décisions d'optimisation locales ne doivent pas dégrader le taux de service client : les ajustements d'ordonnancement locaux doivent permettre d'assurer le respect du programme d'emballage préétabli. En ce sens, le kanban actif permet d'une part d'être force de proposition pour les améliorations locales et d'autre part d'évaluer leur impact sur le respect du programme d'emballage.

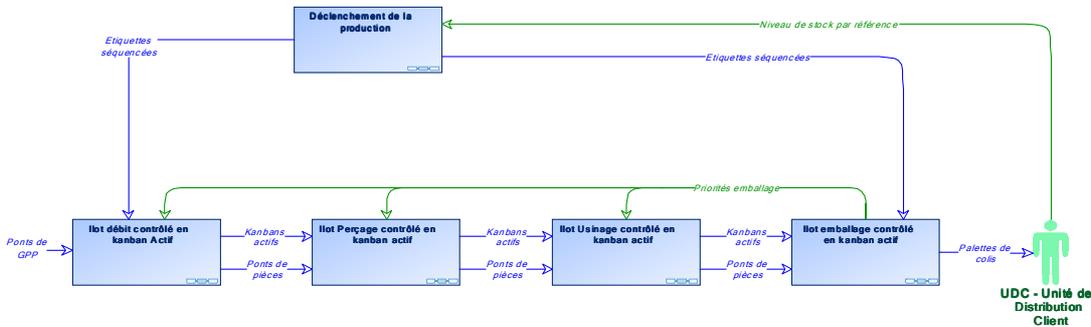


Figure 54. Diagramme du pilotage par kanbans actifs

Un cadre de décision fixé de manière centralisée

Le système de planification en place apporte satisfaction en terme de dimensionnement à moyen terme de la capacité. L'établissement du plan directeur de production, en fonction des prévisions de ventes et d'une capacité globale de l'unité, n'a pas lieu d'être établi de manière distribuée.

Au niveau opérationnel, le système proposé est également géré en flux tirés sur le principe du remboursement de consommation. Le service logistique définit quotidiennement les lots à emballer à J+11, et met en œuvre les processus d'approvisionnement qui permettront de mettre à disposition de la production l'ensemble des matières et composants nécessaires à la réalisation. L'ensemble des lots déclenchés le même jour est équiprioritaire, ce qui signifie que l'ordre d'emballage au sein de la journée n'impactera pas le service client. Cependant, un séquençement est établi afin de tenir compte des contraintes de l'emballage comme le dimensionnement des équipes par exemple. L'équilibrage des charges sur les différents centres de charge, notamment goulot, peut également être pris en compte dans l'établissement du séquençement. Ce séquençement est transmis sur le terrain par le positionnement d'étiquettes ordonnancées sur les tableaux des différents îlots.

L'arbitrage entre performances logistique et productivité se fait par la définition des tailles de lot par produit en début de vie du produit (Figure 55). Cet arbitrage représente un compromis entre une taille de lot minimum permettant de rentabiliser les réglages des différents centres de charge (1h45 minimum d'emballage), et la couverture maximum autorisée pour un lot de production (4 mois). Ces deux contraintes permettent d'établir une fourchette cible, dans laquelle le processus d'optimisation matière va chercher le meilleur rendement. Si toutefois les contraintes étaient contradictoires (un lot permettant la durée

d'emballage minimum couvre plus de 4 mois), la priorité est donnée aux contraintes logistique afin de minimiser les risques d'obsolescence.

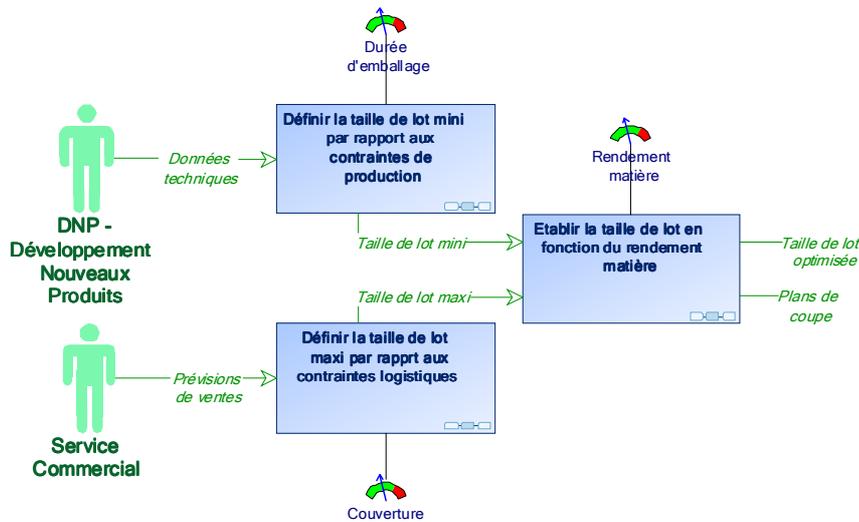


Figure 55. Processus d'établissement des tailles de lot

Sous réserve que le système kanban soit convenablement dimensionné, le respect des priorités sur l'ensemble des flots permet le respect du programme d'emballage et par conséquent assure un taux de service client satisfaisant.

Des adaptations locales

Un respect strict de l'ordre imposé par les tableaux peut parfois engendrer des dysfonctionnements tels que des ruptures de charges sur des centres goulets ou des engorgements d'en-cours. De plus, l'ordre de traitement des différentes tâches à réaliser pour les pièces d'un même colis est décidé sur le terrain.

Le kanban actif peut déclencher des événements lorsqu'une opération est terminée, permettant ainsi de reconsidérer l'ordre de traitement des différentes pièces en attente devant la ressource suivante (Figure 56). Lors de son arrivée devant une ressource, le kanban actif se positionne en queue du train d'ordre de cette ressource, et déclenche un traitement lui permettant éventuellement de se positionner avant d'autres ordres de ce même train d'ordre plutôt qu'en queue de train. Cette recherche se fait de manière itérative : le kanban actif entrant interroge le kanban actif immédiatement précédent dans le train, afin d'évaluer la pénalité apportée à l'autre ordre et le bénéfice apporté à l'ordre courant en cas de non respect des priorités. La marge entre la date d'emballage prévue et la date

« Un logigramme est une représentation graphique utilisée pour illustrer le déroulement d'une procédure. » (Source : MEGA)

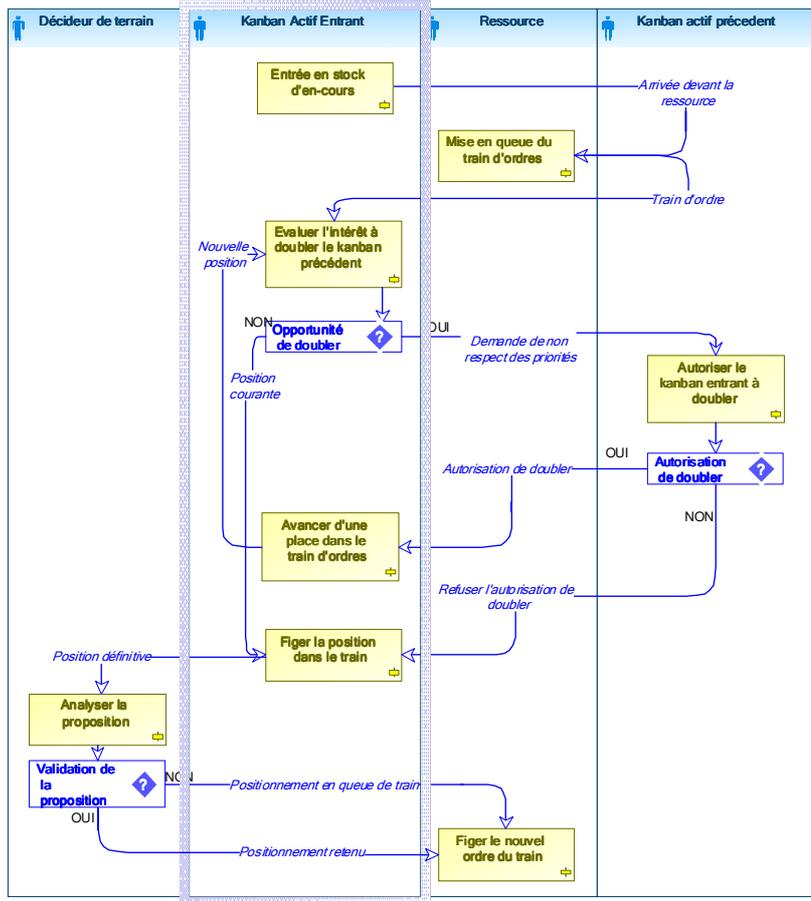


Figure 56. Logigramme d'arrivée d'un kanban actif dans le train d'ordres d'une ressource

La mise en œuvre du traitement présenté sur la Figure 56 ne prends en compte que l'aspect logistique de la performance, c'est-à-dire la capacité à « doubler » d'autres ordres sans toutefois perturber le programme d'emballage. L'ordre précédent évalue l'impact sur son temps d'écoulement d'un retard sur le poste de travail considéré, en prenant en compte les files d'attentes des ressources suivantes sur lesquelles il doit passer, afin d'évaluer si un non respect des priorité lui permet tout de même d'être disponible à l'emballage à l'heure prévue. Ce mécanisme permet d'accélérer les pièces à gamme longue sans perturber les autres pièces afin d'augmenter le nombre de colis disponibles devant l'emballage.

Pour permettre au décideur de terrain de prendre également en compte les critères de productivité locale, le décideur peut solliciter la ressource afin d'évaluer l'impact en temps de réglages des différentes séquences possibles.

Interopérabilité décisionnelle centralisé/distribué

Le séquençage des ordres ainsi que la capacité mise en oeuvre permettant de satisfaire à la politique globale de satisfaction du client et de niveau de stock sont pilotés de façon centralisée et prédictive par la logistique de l'unité, à partir d'une représentation

informationnelle de l'état du système de production.. Il s'agit de la fonction « **Planification et suivi de la production** ».

Les entités décisionnelles distribuées (décideurs de terrain assistés par le kanban actif) disposent quant à elles d'un moyen permettant d'optimiser la productivité et l'écoulement des flux, de manière locale, en assurant toutefois la cohérence des décisions prises par rapport à l'objectifs fixé globalement, c'est-à-dire en prenant en compte la capacité à respecter la séquence d'emballage prédéfinie. Le mécanisme de prise de décisions locales d'ordonnement par collaboration entre les différents kanbans actifs en attente devant une ressource permet d'assurer la coordination entre les décisions prises de façon distribuée en temps réel. Ce pilotage des flux assure les fonctions « **Allocation et contrôle des ressources** », « **Répartition de la production** » et « **Ordonnement détaillé** » du MES.

Enfin, la synchronisation des objets informationnels avec le monde réel offerte par le kanban actif permet de synchroniser en temps réel (sur événements) le système de gestion centralisé (ERP) par rapport à l'avancement réel de la production, sous réserve que l'infrastructure technique le permette. Cette synchronisation est assurée par les fonction « **Acquisition et collecte de données** » et « **Analyse des performances** » du MES.

Synthèse :

Après avoir cadré la problématique de pilotage des flux, ce chapitre présente les deux solutions industrielles de pilotage mises en œuvre. Une analyse des forces et faiblesses de chacune permet, en s'appuyant sur les approches recensées dans la littérature, une architecture cible permettant d'améliorer le pilotage des flux en utilisant le kanban actif pour assurer l'interopérabilité décisionnelle entre un système de planification centralisé et un contrôle de l'exécution distribué.

Avant toute mise en œuvre, il est nécessaire de valider l'organisation proposée par rapport aux objectifs visés. La suite de modélisation MEGA intègre des fonctionnalités de simulation. Cependant, la représentation des objets par de simples jetons ne permet pas de valider les règles de décisions.

Chapitre 4 : Architecture de validation

Objectifs :

La maturité du système de pilotage est apparue comme un point crucial de la problématique industrielle.

Dans ce chapitre, nous décrivons l'architecture de validation, basée sur l'émulation du système de production à l'aide d'un modèle de simulation à événements discrets.

Cette architecture de validation, en plus de permettre la validation de la proposition de système de pilotage présentée au chapitre 3, fournit à l'entreprise un outil pérenne d'analyse de son système de production et d'aide à la décision de pilotage, autour d'un savoir faire de simulation à événements discrets et plus particulièrement de l'outil Arena.

L'analyse des forces et faiblesses des systèmes de pilotage déjà mis en œuvre a permis la définition d'un système de pilotage cible dont l'objectif est d'optimiser la gestion des flux de produits. Cependant, une analyse du modèle proposé ne permet pas de quantifier ses performances ou de valider des propriétés comme la robustesse par exemple. Une telle évaluation peut être réalisée en couplant le système de pilotage proposé avec le système opérant afin d'analyser les performances obtenues par rapport aux objectifs visés. Nous pouvons nous inspirer du prédicat d'automatisation de Fusaoka (Fusaoka *et al*, 1983) pour formaliser cette mise en œuvre de la façon suivante : l'ensemble « Système opérant » et « Objectifs » formalise donc un problème pour lequel le « Système de pilotage » représente une solution.

$$\text{Système_opérant} \oplus \text{Système_pilotage} \supset \text{Objectifs}$$

La criticité des enjeux ne permettant pas l'exécution $\text{Système_opérant} \oplus \text{Système_pilotage}$, nous proposons une architecture permettant l'émulation d'un modèle du système opérant basé sur un modèle de simulation à événements discrets. Le prédicat devient alors :

$$\text{Emulation_du_Système_opérant} \oplus \text{Modèle_du_Système_pilotage} \supset \text{Objectifs}$$

Les objectifs et les indicateurs étant définis, il est nécessaire d'implémenter des éléments permettant leur mesure et archivage lors de l'exécution. Si le modèle d'émulation du système opérant est considéré comme représentatif du système opérant par rapport aux paramètres considérés, et que le comportement du modèle du système de pilotage est également représentatif du comportement du système de pilotage réel, alors les résultats obtenus par simulation seront représentatifs des performances du système de pilotage réel dans des conditions similaires.

$$(Emulation_du_Système_opérant \approx Système_opérant) \wedge (Modèle_du_Système_pilotage \approx Système_pilotage)$$

⇒

$$Emulation_du_Système_opérant \oplus Modèle_du_Système_pilotage \approx Système_opérant \oplus Système_pilotage$$

Enfin, le modèle du système de pilotage défini au chapitre trois n'est pas exécutable, il est donc également nécessaire de l'implémenter pour pouvoir l'évaluer.

1. Architecture de validation

L'objectif de l'architecture de validation est de mettre en situation d'exécution le système de pilotage proposé afin de réaliser des mesures concrètes de performance sur les indicateurs définis, par rapport aux objectifs visés.

Dans les approches de simulation classiques, les flux de différentes natures sont confondus : l'entité représentative de l'écoulement du flux physique est généralement porteuse des informations la concernant, et déclenche elle-même des événements comme les traitements qu'elle subit. Les représentations du système opérant et du système de pilotage sont confondues. Ces méthodologies ne permettent donc pas d'étudier l'impact de différents modèles de pilotage sur un même cas d'étude, du fait de la non distinction des flux physiques et informationnels (El Haouzi *et al*, 2007). L'un de nos objectifs étant la comparaison de différents systèmes de contrôle sur un même système physique, il apparaît nécessaire de distinguer le système de contrôle du système contrôlé. De cette manière nous pourrons évaluer et comparer différents systèmes de contrôle sur un même système contrôlé.

Supprimé : esmodèles de pilotage et de système physiques sont confondus

Le modèle proposé repose donc sur une distinction claire entre l'émulation du système physique, la représentation du système décisionnel et une interface permettant l'interopérabilité de l'émulateur avec plusieurs systèmes de pilotage (Figure 57).

L'architecture d'émulation à proprement parler est donc constituée d'un modèle d'émulation du procédé et d'un système d'information, qui est une base de données représentant la vue logique du système de production, en fonction de l'instrumentation mise en œuvre (collecte d'informations sur les ressources ou sur le flux de produits). Le système d'information joue le double rôle de maintenir à jour la vision du système de production pour permettre le pilotage, et la mise en œuvre des décisions prises par le système de pilotage.

La constitution d'une base de cas réels permet de valider la justesse du modèle d'émulation, et de confronter le système à tester à des situations réelles. Enfin, un module de synthèse des données d'exécution permet de générer un rapport synthétique à chaque exécution de la simulation.

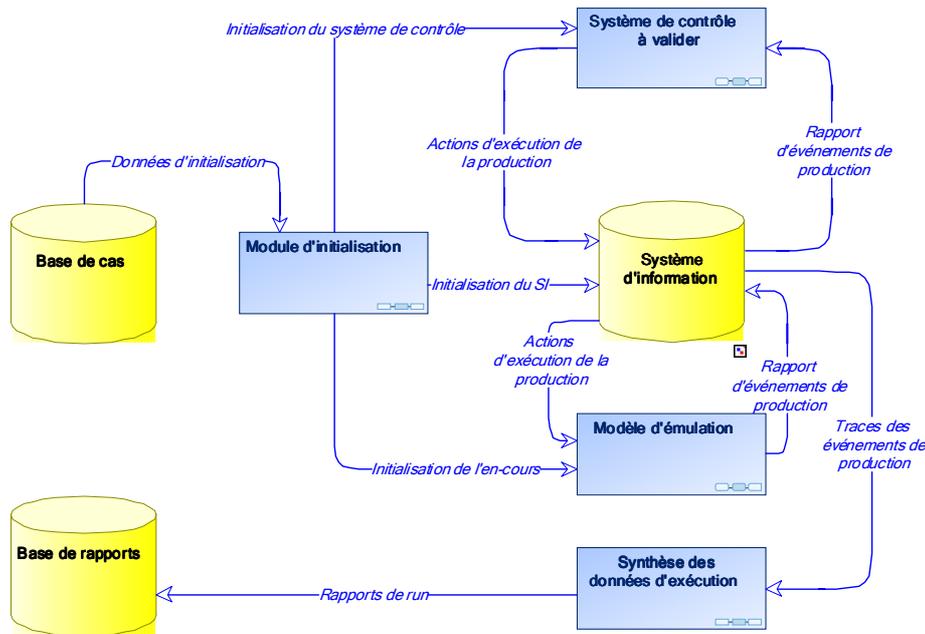


Figure 57. L'architecture d'évaluation

Le modèle d'émulation

La finalité du modèle d'émulation est de reproduire fidèlement le comportement du système physique à représenter, et notamment les interactions avec son environnement et plus particulièrement le système de pilotage. Par essence, le modèle d'émulation ne doit intégrer aucune règle de décision : chaque point où une décision doit être prise est transformé en un point de synchronisation. Un message appelé événement de synchronisation est transmis au système de pilotage, et l'exécution est arrêtée jusqu'à réception d'un ordre de redémarrage³. Sur réception d'un événement de synchronisation, le système de pilotage peut lancer un processus de décision, et paramétrer le modèle d'émulation en fonction des résultats, afin de mettre en œuvre la solution retenue. Par exemple, en entrée d'une machine, le modèle de contrôle renverra le programme machine ainsi que les lois qui régissent les temps d'usinage. En sortie de machine, le modèle de contrôle orientera la pièce en fonction de sa machine de destination et de l'encombrement des stocks.

D'abord, le flux de produits est représenté lors de l'exécution du modèle comme un flux d'entités. Les entités circulant dans le modèle d'émulation n'exploitent pas les fonctions de routage ni aucune des variables mises à disposition par l'outil de modélisation. Seul un index unique permet de les identifier afin de faire le lien avec leur image logique.

Afin d'assurer la représentativité structurelle du modèle d'émulation, celui-ci est basé sur une projection du modèle de transformation du flux physique finalisant (Figure 40). Des composants élémentaires permettent d'associer un modèle à événements discrets à chaque type de transformations « atomique », ainsi qu'aux deux transformations de composition que sont l'assemblage et le désassemblage. Par défaut, une ressource est créée pour chaque

³ Ce mode de fonctionnement s'affranchit des temps de calcul pour la prise de décision, mais les constantes de temps du système réel étudié sont suffisamment grandes pour nous l'autoriser

processus. Trois composants de base ont donc été définis permettant la génération d'un modèle de simulation à événements discrets exécutable.

Chaque ressource est caractérisée par un identifiant, un nom et son îlot d'appartenance.

Une opération générique est également définie, représentant l'association d'une ou plusieurs entités produits avec une ou plusieurs ressources, pendant une certaine période définie par son heure de début et son heure de fin.

Le premier type de transformation à représenter est donc une **transformation temps-forme**. Ce processus met en œuvre une ressource, pendant un temps donné (dont la variabilité peut également être modélisée) et en utilisant une recette donnée (programme ou mode opératoire), dans le but de transformer l'état du produit la traversant. Les attributs d'une opération de transformation temps-forme sont donc les suivants :

- ressource(s) à mettre en œuvre ;
- heure de début de réglage ;
- heure de fin de réglage ;
- heure de début de l'opération ;
- heure de fin de l'opération ;
- quantité de pièces traitées ;

Les ressources de transformation temps-forme (typiquement les machines et les opérateurs) sont quant à elles caractérisées par un calendrier de disponibilité définissant pour chacune les plages horaires et quantité dans lesquelles elles seront disponibles, la loi de variabilité des temps opératoires, le taux de rebut, les lois de défaillances, ainsi que le temps opératoire à l'instant t .

Les assemblages et désassemblages sont des particularisation des opérations de transformation, caractérisées de plus par un coefficient représentant le nombre d'entités créées ou consommées, ainsi que les règles d'héritage, caractérisant chacune des entités de sortie en fonction des propriétés des entités en entrées (par exemple une nomenclature pour un assemblage ou un plan de coupe pour un désassemblage)

Le second type de transformation est la **transformation espace-temps**, qui représente le transport des produits d'un point à un autre, et dont les paramètres sont les suivants :

- ressource utilisée ;
- point de départ ;
- point d'arrivée ;
- heure de départ ;
- heure d'arrivée ;

Les ressources de transport sont quant à elles caractérisées par une capacité (quantité de produits déplaçables simultanément), une liste de gares desservies et un ensemble de temps de déplacement par segment.

La **transformation de temps**, qui représente un stockage, est quand à elle uniquement caractérisée par :

- ressource utilisée (Zone de stockage)
- heure de début ;
- heure de fin ;

Les ressources de stockage étant uniquement des infrastructures, elles ne sont pas impactées par un calendrier de disponibilité et uniquement caractérisées par une capacité de stockage (en nombre de palettes) et le mode de gestion des files d'attente (FIFO, ensemble de FIFO pour modéliser les voies de rouleaux, ou accumulation).

Le diagramme de classe UML présenté sur la Figure 58 décrit les différents objets d'émulation.

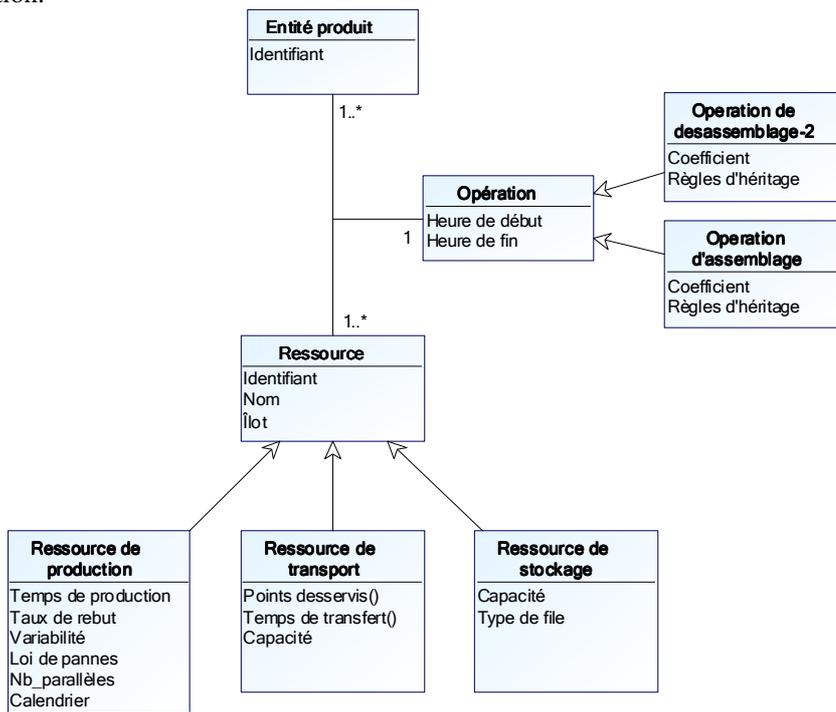


Figure 58. Diagramme de classe UML des objets d'émulation

Un ensemble de composants basiques d'émulation permet la modélisation des différents types de ressources ; constitué d'un label de routage en entrée permettant d'adresser les entités, d'un module de pré-synchronisation permettant l'observation du flux d'entrée, d'un processus de transformation observable, d'un module de post-synchronisation permettant l'observation du flux de sortie, et d'un module de routage vers le processus suivant. Chaque processus de transformation est donc modélisé par un réseau de composants de simulation (Figure 59)

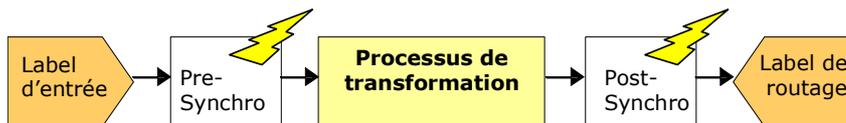


Figure 59. Réseau représentant un composant basique d'émulation

Une transformation homomorphique permet la transformation du modèle de processus de transformation du flux physique finalisant (Figure 40) en un modèle d'émulation du système opérant, laissant envisager une automatisation de ce processus et la génération automatique de modèles d'émulation (El Haouzi *et al*, 2007). Une illustration montre la génération à partir du modèle de processus, du réseau d'émulation et du modèle

d'implémentation des ressources en s'appuyant sur le modèle des classes d'opérations et de ressources.

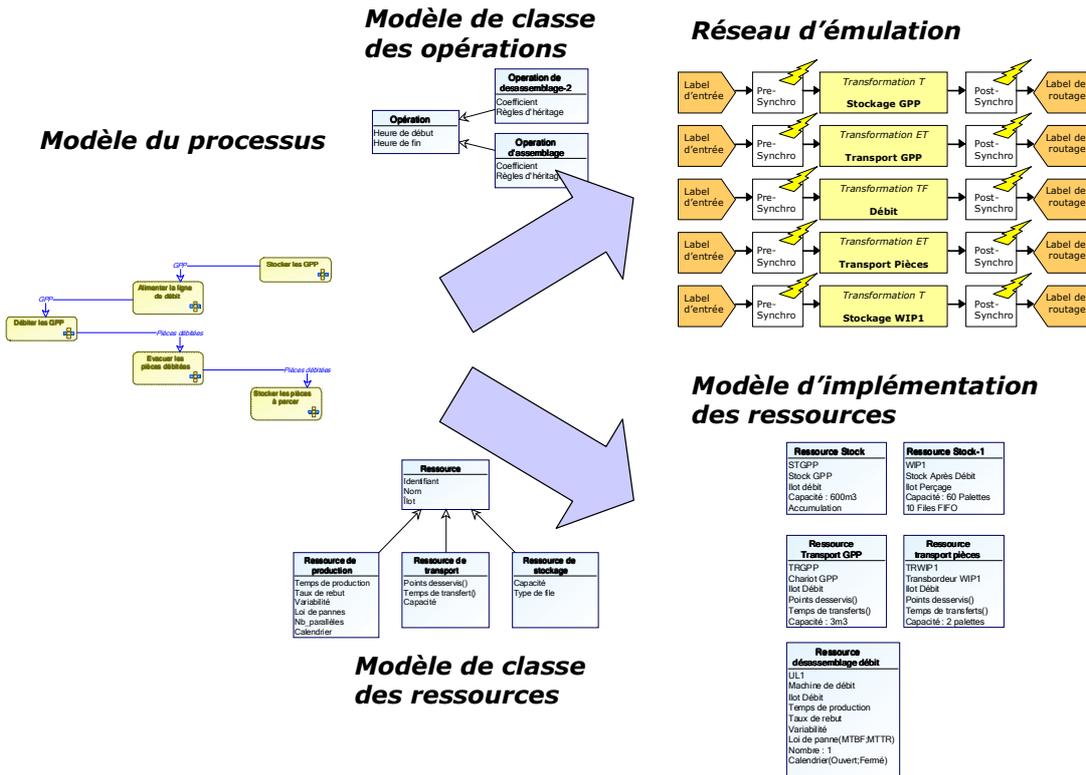


Figure 60. Transformation du modèle de processus de transformation du flux physique finalisant en un modèle d'émulation du système opérant

Le modèle d'émulation généré n'est pas exécutable en tant que tel. Il nécessite d'être actionné par un système de pilotage. Cette nécessaire interconnexion est établie par l'intermédiaire d'un système d'information.

Système d'information

Pour être piloté, le modèle d'émulation doit être visible pendant son exécution. Le modèle de données proposé au chapitre 3 (Figure 52) a vocation à maintenir une vision complète de l'état du système opérant. Il est également applicable pour supporter une représentation de l'état instantané du modèle d'émulation en cours d'exécution afin d'assurer l'interface avec un système de pilotage. De plus, il assure le stockage des données techniques permettant le pilotage et l'archivage des données de traçabilité permettant l'analyse a posteriori.

Le système d'information est implémenté sous la forme d'une base de données. A chaque ressource est associée une instance d'une table du modèle de données. Le diagramme relationnel est représenté sur la Figure 61.

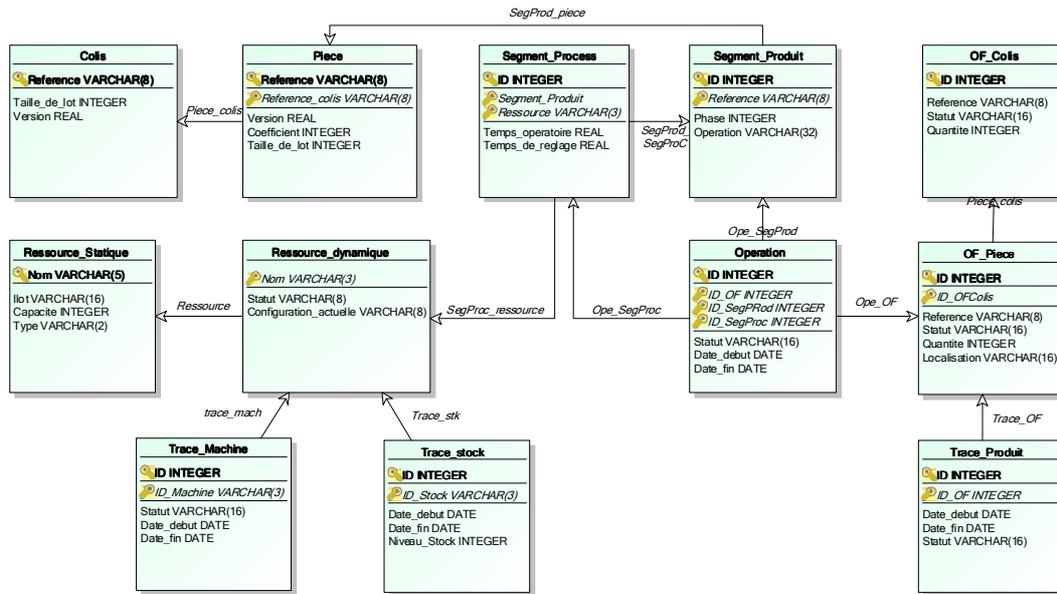


Figure 61. Modèle relationnel du système d'information

Les données techniques (gammes et nomenclatures) contenues dans les tables *Colis*, *Piece*, *Segment_Process* et *Segment_Produit* sont extraites de la base de données techniques de l'ERP. Le besoin d'accès réguliers pour réaliser les simulations a conduit à dupliquer ces données pour ne pas surcharger l'infrastructure opérationnelle. Cette duplication des données techniques crée un risque de désynchronisation entre les deux systèmes, par conséquent, les données techniques de la base de simulation sont rafraîchies chaque nuit. Cette fréquence est largement suffisante par rapport à la fréquence de création de nouveaux produits.

De même que le modèle d'émulation, le script de création des enregistrements de la base de données correspondant à la représentation du système opérant peut être généré à partir du modèle du processus de transformation du flux physique finalisant. Ce processus entraîne la création d'autant d'enregistrements de la table *Ressource_statique* que de ressources dans le modèle d'émulation. Les enregistrements suivants (Figure 62) sont donc créés pour le périmètre relatif à l'îlot débit de la Figure 60 :

Ressource_Statique			
Nom	Îlot	Type	Capacité
STGPP	DEBIT	ST	600
TRGPP	DEBIT	TR	3
UL1	DEBIT	DS	
TRST1	DEBIT	TR	2
ST1	PERC	ST	60

Figure 62. Enregistrements créés pour le périmètre débit

On constatera que le champ *Capacité* de la ressource de transformation désassemblage 'ULI' n'est pas renseigné. En effet, celui-ci dépend du programme mis en œuvre et est donc considéré comme une donnée dynamique.

Le logiciel Arena propose des interfaces Visual Basic pour l'interaction avec d'autres applicatifs. Par conséquent, et afin de simplifier l'intégration en phase d'étude, le système d'information a été implémenté sous la forme d'une base de données Microsoft Access. Si les performances de ce système de gestion de base de données semblent faibles pour une application temps réel en production avec plusieurs accès simultanés, elles répondent au besoin pour l'évaluation hors ligne de systèmes de pilotage.

Exécution

L'objectif de l'architecture d'émulation est de placer le système de pilotage dans des situations extraites de la réalité. Par conséquent, le processus de simulation débute par une initialisation des modèles dans un état non vide (Figure 63).

Le système d'information est initialisé à partir d'un scénario : les enregistrements correspondants aux différents lots en cours sont créés et les images des machines sont synchronisées dans l'état correspondant.

Le modèle d'émulation est donc initialisé, par la création des différentes entités correspondant aux lots de produits en cours de fabrication. Les lots de pièces en stock d'en-cours sont créés et mis en file dans les stocks correspondants, les lots en cours sont créés en fonction de leur avancement, et les ressources initialisées sur le programme en cours. L'échéancier peut être initialisé notamment en définissant les dates d'arrivées des nouveaux ordres. Il est également possible de « planifier » les pannes machines.

Enfin, le système de pilotage est synchronisé s'il y a lieu avec le système d'information avant de démarrer l'exécution.

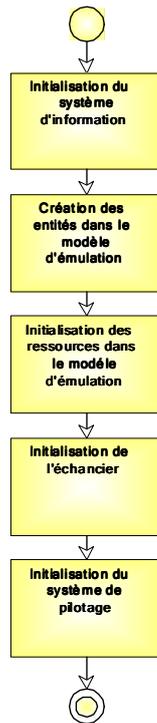


Figure 63. Workflow d'initialisation de l'architecture d'émulation

La procédure de synchronisation entre modèle d'émulation du système opérant, système d'information et système de pilotage est relativement simple. Lorsqu'un événement se produit pendant l'exécution (changement d'état d'une ressource ou entité traversant un point de synchronisation ; pre-synchro ou post-synchro), un message est envoyé au système d'information. Dans le cas d'une entité traversant un point de synchronisation, la trame suivante serait émise : *Entité(Identifiant_entité ; Identifiant_Synchro ; Date)*.

A chaque point de synchronisation correspond un événement particulier : ces différents événements et leur traduction pour le système d'information sont les suivants :

- Arrivée d'une entité dans une ressource
 - Début de l'opération correspondante
 - Changement de statut du lot correspondant : « *En cours sur &Ressource* »
 - Changement de statut de la ressource : « *Occupée, lot &Lot* »
- Sortie d'une entité d'une ressource
 - Clôture de l'opération correspondante
 - Changement de statut du lot correspondant : « *Terminé sur &Ressource* »
 - Changement de statut de la ressource : « *Disponible* »

L'atteinte d'un point de synchronisation par une entité déclenche une synchronisation du système d'information et l'émission d'un événement vers le système de pilotage, permettant de déclencher si nécessaire un processus de décision. Cette décision peut être un

réglage pour une ressource de transformation temps/forme ou un emplacement pour une opération de stockage.

Ce processus de décision peut se traduire par des actions à mettre en œuvre, comme par exemple paramétrer une ressource de transport pour déplacer l'entité. La requête d'action transmise au système d'information permet de paramétrer les composants d'émulation pour la mise en œuvre de la décision ainsi que la mise à jour du système d'information (statut des ressources impliquées dans l'opération).

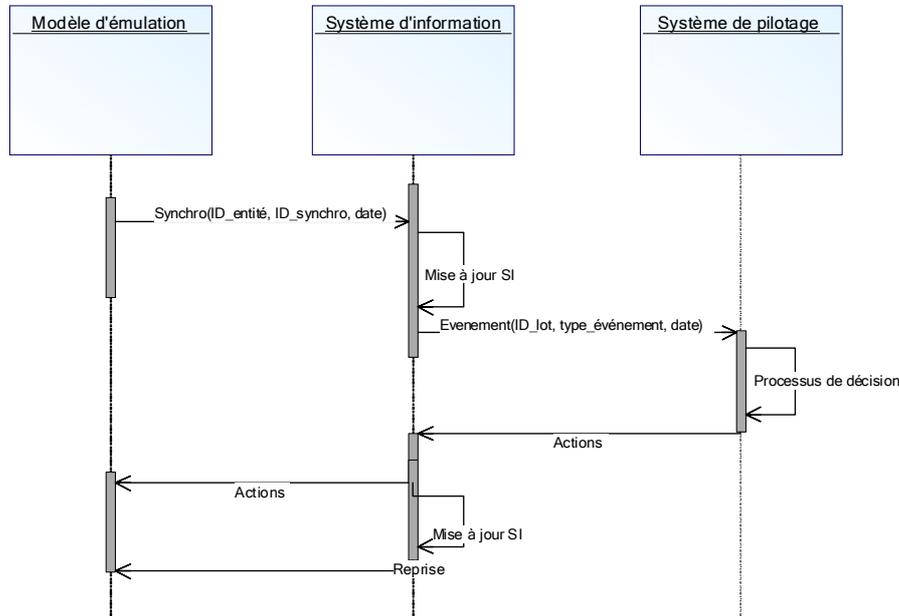


Figure 64. Diagramme de séquence de synchronisation

Enfin, en fin d'exécution, une synthèse est générée permettant d'analyser les performances du système de pilotage considéré pour ce scénario. L'analyse a posteriori est alimentée par trois éléments :

- Un état synthétique reprenant le niveau d'en-cours moyen pour chaque stock, le taux d'occupation des ressources, le nombre de colis produits et le temps d'écoulement moyen ;
 - Le niveau d'encours moyen représente la moyenne des relevés de niveau d'en-cours réalisés toutes les 4 heures ;
 - Le taux d'occupation des ressources représente le rapport de la durée ou la ressource a été active (*Statut = Actif*) sur la durée totale d'ouverture de la ressource ;
 - Le nombre de colis produits représente le throughput ;
 - Le temps d'écoulement moyen représente la moyenne des temps d'écoulement de l'ensemble des colis emballés durant la période de simulation.
- Un ensemble d'instantanés, permettant de reconstruire l'état de l'atelier (état de l'ensemble des ordres et ressources) toutes les 4 heures (fréquence identique à la base de donnée de remontée des temps pour faciliter la comparaison) ;

- Un diagramme de Gantt permettant de visualiser les séquences réalisées sur chacune des machines (Figure 65) (Ce diagramme est réalisé à l'aide de l'outil développé par Rémi Pannequin, utilisé dans (Pannequin, 2007)).

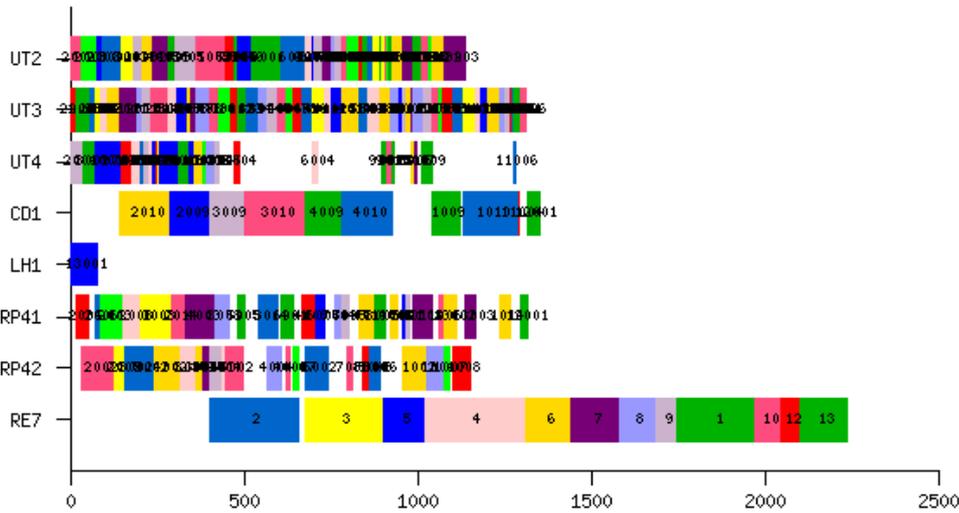


Figure 65. Exemple de diagramme de GANTT généré après simulation

Validation

L'objectif de l'architecture d'évaluation étant de mesurer a priori l'impact d'un changement de mode de pilotage sur les performances du système de production, il est nécessaire de valider le réalisme du modèle d'émulation, et notamment des paramètres modélisés de taux de panne ou de variabilité.

Ce processus de validation a donc consisté à collecter différents scénarii issus de la réalité. Un scénario est constitué de données d'initialisation permettant de reconstruire à $t=0$ l'état du système opérant, ainsi qu'un échéancier d'événements dynamiques comme les débuts et fin de pannes machines ou les arrivées de nouveaux lots.

Un ensemble de 10 scénarii représentatifs a donc été mémorisé, et les indicateurs générés par l'architecture de validation ont été comparés aux résultats obtenus dans la réalité. Au moment de la phase validation, l'atelier était piloté par un ordonnancement prédictif. L'ordonnancement est adapté au fur et à mesure de sa réalisation, en fonction des aléas. Par conséquent, pour la phase de validation du modèle d'émulation, la fonction pilotage se résume à injecter dans l'architecture de validation l'ordonnancement réellement réalisé sur le terrain.

La Figure 66 montre un extrait de la synthèse des résultats sur les indicateurs de performance (Tx occ. EMB représente le taux d'occupation de l'emballage, TX occ. MIR représente le taux d'occupation de la ressource de pose miroirs). Chaque scénario a été joué 10 fois et les résultats représentent la valeur moyenne des indicateurs sur les 10 répliques. Les écarts moyens sur l'ensemble des écarts sont tous inférieurs à 5%. L'écart type est également faible, de l'ordre de quelques pourcents, ce qui signifie que la représentativité du

modèle n'est pas altérée par les variations de contexte. Par conséquent, nous pouvons dire que les performances reproduites par le modèle d'émulation sont représentatives des performances du système opérant réel dans des conditions similaires.

		Tx occ. EMB (%)	Tx occ. MIR (%)	Temps d'écoulemt moyen	Nb colis produits (/24h)
Scénario 1	Réel	96%	20%	96	3435
	Moyenne simulations	95%	25%	96	3375
	écart	1%	5%	0%	2%
Scénario 2	Réel	82%	45%	89	2645
	Moyenne simulations	84%	43%	93	2735
	écart	2%	2%	4%	3%
Scénario 3	Réel	88%	78%	112	3000
	Moyenne simulations	91%	72%	106	2950
	écart	3%	6%	5%	2%
Scénario 4	Réel	65%	49%	101	2270
	Moyenne simulations	62%	51%	105	2345
	écart	3%	2%	4%	3%
...
Ecart Moyen		2%	4%	3%	3%
Ecart type de l'écart		1%	2%	2%	1%

Figure 66. Validation par mesure des écarts simulé/réel

La représentativité du modèle relativement aux performances globales a été montrée. Cependant, l'objectif de l'étude est d'étudier les réactions des différents systèmes de pilotage dans différentes situations, et notamment la maîtrise du niveau d'en-cours qu'ils peuvent apporter. Les évolutions des niveaux de stocks d'en-cours ont donc été mesurées sur le système réel, par consolidation des remontées de production, et comparées aux évolutions de niveau des différents stocks d'en cours lors de la simulation. La Figure 67 montre un exemple de résultats comparatifs entre simulation et réalité, pour le cas d'un scénario particulier. Les écarts moyens relevés sont également tous inférieurs à 5% avec un écart type faible. Par conséquent, nous nous appuyerons sur les résultats produits par l'architecture d'émulation pour analyser de manière comparative différents modèles de systèmes de pilotage.

Simulation UGV du 01/10/2005 - Programme du 30/09/2005 à 20h									
Temps (h)	WIP 1 (Nb de palettes)			WIP 2 (Nb de palettes)			WIP 3 (Nb de palettes)		
	Simulé	Réel	Ecart	Simulé	Réel	Ecart	Simulé	Réel	Ecart
0	132	132	0,00	146	146	0,00	238	238	0,00
4	156	152	2,63	184	182	1,10	260	280	7,14
8	110	106	3,77	166	164	1,22	338	324	4,32
12	116	115	0,87	162	166	2,41	381	376	1,33
16	118	120	1,67	180	180	0,00	350	364	3,85
20	136	141	3,55	176	178	1,12	403	408	1,23
24	148	156	5,13	172	176	2,27	438	412	6,31
Ecart Moyen			2,52	1,16			3,45		
Ecart type de l'écart			1,791	0,957			2,711		

Figure 67. Exemple de mesure des écarts de niveaux d'en-cours

Les résultats produits par l'architecture d'émulation sont considérés comme proches, les deux systèmes sont donc équivalents par rapport aux paramètres considérés que sont le niveau d'en-cours, le temps d'écoulement et l'occupation des ressources :
Emulation _ du _ Système _ opérant ≈ Système _ opérant .

2. Implémentation des modèles de systèmes de pilotage

Afin de réaliser des études comparatives pertinentes entre les différents systèmes de pilotage, il est nécessaire d'en implémenter un modèle exécutable, qui reproduit le comportement du système réel. Ce modèle est couplé à l'architecture d'émulation précédemment présentée par le biais du système d'information.

Les différents modèles de systèmes de pilotage ont donc été implémentés. Afin de simplifier l'interaction avec le logiciel de simulation Arena et avec les données issues du système de production sous forme de fichiers Excel, le langage de programmation intégré Visual Basic for Applications a été employé. L'exécution des modèles des systèmes de pilotage par ordonnancement centralisé et en kanban a permis de valider par comparaison des performances simulées/réelles le processus de modélisation et d'implémentation.

Ordonnancement Centralisé

Implémentation

Le processus d'ordonnancement centralisé est lourd, et supporté par un progiciel dont les règles d'optimisation sont propriétaires. Il n'est donc pas possible de modéliser ni de reproduire ce processus sans utiliser l'outil. Il est par contre possible de formaliser les règles d'adaptation données aux décideurs de terrain pour régir aux aléas comme la non disponibilité des produits pour une tâche à réaliser. Le processus d'évaluation se fait donc à partir d'une base de cas alimentée par le processus d'ordonnancement : l'ensemble des ordonnancements générés quotidiennement a été relevé sur une période de deux mois. Seul cet ensemble d'ordonnements pourra donc être exécuté pour réaliser des mesures de performances. Les paramètres dynamiques comme les taux de rebuts ou la survenue de pannes peuvent quant à eux être modifiés par paramétrage de l'architecture d'émulation.

Les ordonnancements générés ont été convertis en fichiers XML dont un exemple est donné sur la Figure 68 : à chaque machine est associée un calendrier définissant ses plages d'ouverture (ici C38, le calendrier d'ouverture en 3 équipes de 8 heures), ainsi que l'ordonnement prédictif comme un ensemble de plages caractérisées par une date de début, une durée, une référence produit et un OF affecté à la ressource durant cette plage.

```

< Ordonnancement >
  < Calendrier >
    < Nom = 'C38' >
    < Plage >
      < Date_debut = 20070507_0400 >
      < Duree = 1440 >
      < Statut = 'Ouvert' >
    < /Plage >
  < /Calendrier >
  ...
  < Machine >
    < Nom = UT2 >
    < Calendrier = C38 >
    < Plage >
      < Date_debut = 20070510_1232 >
      < Duree = 127 >
      < OF = '14357643' >
      < Reference = 'COT15635' >
    < /Plage >
    < Plage >
      < Date_debut = 20070510_1439 >
      < Duree = 43 >
      < OF = '14357676' >
      < Reference = 'DER09782' >
    < /Plage >
    ...
  < /Machine >
  ...
< /Ordonnancement >

```

Figure 68. Description XML d'un ordonnancement

Le principal événement déclencheur de décisions est la fin d'une opération de production sur une machine. Cet événement déclenche la recherche dans l'en-cours disponible devant la machine du prochain lot de l'ordonnancement détaillé. Si ce lot n'est pas trouvé, alors le suivant est cherché. Si la gamme nominale d'un lot de l'en-cours est sur une autre ressource mais peut être délesté, alors la machine réalise cette opération. Lorsque aucun lot ne peut être usiné sur la ressource, celle-ci est alors considérée comme étant en rupture de charge. A ce moment, l'en-cours est scruté et l'arrivée d'un lot réalisable déclenche immédiatement le début de la tâche correspondante. Ce processus d'affectation d'une nouvelle tâche est implémenté suivant l'algorithme suivant (Figure 69) :

```

Class Ressource()
  Dim statut as String
  ...
  Sub debut_operation(date_deb as Date, ope as Operation)
    This.statut = « Occupee, lot : » & ope.lot
    Create trace_ressource(Date_deb, ope)
  End sub debut_operation

  Sub Fin_operation(date_fin as Date)
    This.statut = « Disponible »
    trace_ressource.cloturer(date_fin)
    Si existe.prochain_lot Alors
      debut_operation(prochain_lot)
    End Sub Fin_operation
  ...

```

Figure 69. Algorithme de traitement de la fin d'une opération pour la classe « Ressource »

En cas de panne d'une ressource, l'affectation des tâches aux autres ressources (existence de gammes de délestage) est réalisée lors de l'ordonnancement quotidien.

La gestion des urgences est également gérée par l'ordonnancement quotidien, qui peut avancer l'ensemble des tâches correspondant à un OF colis afin d'accélérer la production d'un produit. Cette accélération d'un produit se traduit nécessairement par l'augmentation du délai pour les autres ordres. La vision globale permet de maîtriser les effets de ces décisions sur les autres produits, en fonction de la connaissance qu'à l'ordonnanceur du degré d'urgence de chaque produit (niveau de stock restant, criticité de la commande, engagements vis-à-vis du client...).

Validation

Appliqué à des cas réels, le modèle de pilotage par ordonnancement centralisé implémenté a montré des résultats proches de la réalité dans les 24 premières heures de l'ordonnancement réalisé et une augmentation croissante de l'écart au fur et à mesure du déroulement de l'exécution. Les écarts mesurés sont des écarts moyens mesurés après l'exécution de 10 réplifications de différents scenarii choisis en fonction de leur représentativité des différentes conditions du réel (pannes, urgences...). Cet écart est lié à la mise en œuvre dans la réalité d'ordonnements rafraîchis quotidiennement : l'ordonnement réellement réalisé diffère de celui injecté dans le modèle de simulation. Cependant, le processus d'ordonnement s'appuie sur un outil propriétaire dont les règles sont inconnues, ainsi que sur un opérateur humain intégrant une part de connaissances expertes et d'intuition. Ces deux facteurs le rendent complexe à modéliser. Par conséquent, pour être pertinentes, les simulations devront inclure l'ordonneur assisté de l'outil afin qu'il réajuste l'ordonnement toutes les 24 heures de simulation. La Figure 70 illustre ce phénomène : les écarts obtenus sans rafraîchir l'ordonnement ne sont pas acceptables, alors que le processus de rafraîchissement de l'ordonnement permet d'obtenir des résultats réalistes. La consommation de ressource, même si le temps consacré à la génération des ordonnancements est inférieur au temps passé dans la réalité (de l'ordre d'un quart d'heure), nous conduira à minimiser le nombre de simulations dans cette configuration.

Configuration	Niveau d'en-cours moyen		Temps d'écoulement		Production		Production	
	Valeur	Ecart	Valeur	Ecart	Valeur	Ecart	Valeur	Ecart
Réel	628		104		3328		62	
Simulation, ordonnancement non corrigé	526	16%	92	12%	2865	14%	54	13%
Simulation, ordonnancement corrigé	612	3%	101	3%	3424	3%	64	3%

Figure 70. Résultats d'une simulation, avec ou sans rafraîchissement de l'ordonnement

Kanban

En pilotage kanban, l'ordonnement émerge en fonction des événements qui surviennent sur le terrain. Par conséquent, l'ordre dans lequel les lots vont se déclencher (séquençement des ordres) est le seul facteur contrôlable permettant d'agir en amont sur l'ordonnement. Les calendriers des différentes ressources, la variabilité des temps opératoire et les aléas comme les pannes machines impactent également l'ordonnement, mais celui-ci étant généré par les événements d'exécution, il reste toujours réalisable.

Implémentation

Le séquençement des ordres, pour l'ensemble des îlots, repose sur la priorité client. Cette priorité client est visible dans tout l'atelier par le biais des tableaux de visibilité de priorité. La gestion des priorités des lots en attente devant une ressource se fera donc par rapport à la priorité client. La première opération de débit, une fois terminée, va indiquer la disponibilité de la matière au processus suivant. Le second processus dispose sur son tableau kanban de la visibilité des lots disponibles, également séquençés selon la priorité client. Le processus d'emballage respectant également cette règle, les différents îlots disposent donc d'une visibilité sur l'ordonnancement souhaité de l'emballage.

Ce mode de fonctionnement se traduit donc par l'ajout d'étiquettes en queue des trains de débit et d'emballage, au fur et à mesure de la simulation, ce qui va se traduire par le fichier XML suivant (Figure 71) :

```

< Ordonnancement >
  < Train >
    < Lot >
      < Date_arrivee = 20070510_1232 >
      < Reference = 'DES25674' >
      < Quantite = 468 >
    < /Lot >
    < Lot >
      < Date_arrivee = 20070510_1439 >
      < Reference = 'DER09782' >
      < Quantite = 235 >
    < /Lot >
    ...
  < /Train >
  ...
< /Ordonnancement >

```

Figure 71. Représentation XML d'une séquence d'ordre Kanban

La circulation du flux de produits est régi par des procédures strictes et peut donc être modélisé. A la fin d'une opération, une ressource va parcourir le train séquençé jusqu'à trouver le premier colis dont la matière est disponible, puis réaliser le premier lot de pièce réalisable pour ce colis. Dans le cas où aucune tâche n'est réalisable, la ressource est en rupture de charge, et traitera la prochaine tâche réalisable dès qu'un lot de produit sera disponible.

Dans les îlots d'usage, l'ordre du train est à respecter strictement. A l'emballage, l'ensemble des composants doit être disponible ce qui se traduit par la règle de décisions suivante : « En fin d'opération, emballer le premier lot du train dont l'ensemble des composants est disponible », ce qui se traduit par l'algorithme suivant (Figure 72), qui conduit à la réalisation du premier lot réalisable :

```

Class Ressource_EMB()
Dim train as Etiquettes()
Dim statut as String
...
Sub debut_operation(date_deb as Date, ope as Operation)
    This.statut = « Occupee, lot : » & ope.lot
    Create trace_ressource(Date_deb, ope)
End sub debut_operation

Sub Fin_opération(date_fin as Date)
Dim i as Integer
    This.statut = « Disponible »
    trace_ressource.cloturer(date_fin)
    i = 1
    Faire_tantque (train(i) <> vide)
        Si train(i).est_complet alors
            train(i).debut_operation
            fin
        Sinon
            i = i + 1
    Fin tantque
    This.statut = « Rupture »
End Sub Fin_operation
...

```

Figure 72. Algorithme de choix du prochain lot, pour l'emballage, en Kanban

La gestion des urgences au sens où un lot déclaré urgent sera systématiquement positionné en tête de tous les trains, et sera donc traité en priorité.

Ce système n'intègre par contre pas de gestion des pannes ; en cas de panne sur une ressource, les opérations en attente ne seront pas traitées avant réparation de la ressource (pas de mise en œuvre de délestage).

Validation

La mise en œuvre du pilotage en kanban sur le système réel nous a permis, de la même manière que pour le pilotage par un ordonnancement centralisé, de valider que le comportement de l'architecture pilotée par un modèle du système de pilotage kanban est représentatif du système de production réel piloté en kanban. Cette validation s'est également réalisée par l'exécution de 10 réplifications de 5 scenarii choisis pour leur représentativité des conditions réelles d'utilisation.

La validation a donc été réalisée en injectant dans le modèle des séquences réalisées en réalité, avec les calendriers d'ouverture machine réellement mis en œuvre (intégrant l'ouverture nominale et les pannes). Si les performances globales reproduites par le modèle sont satisfaisantes par rapport aux performances du système réel, des écarts dans l'ordonnancement mis en œuvre sont constatés : en effet, sur le terrain, les procédures ne sont pas respectées à la lettre, générant des modifications de l'ordonnancement. En effet, ces adaptations n'étant pas régies par des procédures, et les règles appliquées n'étant pas formelles (les règles sont propres à chaque décideur), il est impossible de les modéliser. Cependant, sur l'ensemble des simulations de validation réalisées, aucun écart majeur n'a été constaté. Ce phénomène illustre la volonté des acteurs du terrain de chercher à optimiser le fonctionnement du système, sans toutefois être outillés pour le faire efficacement.

	Niveau d'en-cours moyen		Temps d'écoulement		Production		Production	
	Valeur	Ecart	Valeur	Ecart	Valeur	Ecart	Valeur	Ecart
Configuration								
Réel	596		95		3246		62	
Simulation Kanban	583	2%	97	2%	3334	3%	64	3%

Figure 73. Validation du modèle de pilotage kanban

Kanban Actif

Le pilotage par kanban actif repose en fait sur un fonctionnement en kanban standard, dont les mécanismes de décision comme la mise en file d'une étiquette ou la sélection de l'opération à réaliser sur une machine peut se faire en prenant en compte de nouvelles informations et en utilisant des mécanismes d'optimisation plutôt que des procédures figées.

Implémentation

La distinction en pilotage kanban et kanban actif porte essentiellement sur deux points :

- **La granularité des informations** : une étiquette correspond à un lot de pièce et non plus à l'ensemble des lots de pièces composant un colis, un tableau est affecté à chaque ressource et plus à chaque îlot ;
- **L'utilisation de processus d'optimisation** permettant d'améliorer le fonctionnement par rapport aux procédures figées.

Par conséquent, le fonctionnement reposant sur la circulation des étiquettes sur les différents tableaux est maintenu, le nombre d'instance de chacun des objets sera par contre augmenté (dans une mesure raisonnable, une dizaine de tableau et environ 500 étiquettes en circulation). L'alimentation du système sera réalisée par un fichier XML similaire à celui utilisé pour le pilotage kanban (Figure 71).

Les processus de décision prendront en compte de nouvelles informations, portées par les kanbans actifs, comme la date d'emballage prévisionnelle ou le degré d'urgence, en fonction du risque de rupture client. De plus, l'« activation » des kanbans leur permet de déclencher des décisions : par exemple la mise en queue de train d'un kanban va déclencher un processus décisionnel visant à trouver la meilleure place pour ce kanban en collaboration avec les autres étiquettes présentes dans le train.

L'événement d'arrivée dans le train va donc se traduire par la mise en œuvre de l'algorithme suivant :

```

Class Ressource_EMB()
Dim train as Etiquettes()
Dim statut as String
...
Sub arrivee_kanban(kb as Kanban)
    This.mettre_en_queue(kb)
    kb.estimer_date_fin
    Faire_tantque kb.date_fin_estimee>kb.date_fin_souhaitee
        Si train.etiquette_precedente(kb).marge >
            kb.duree_ope(This) Alors
                kb.avancer
            Sinon
                Exit
        finsi
    fin_Tantque
End Sub Fin_operation
    
```

Figure 74. Algorithme de traitement de l'arrivée d'un kanban actif

Le séquençage des opérations sur les différentes ressources et donc réévalué à chaque arrivée d'un kanban actif sur le tableau. Le processus étant initié par l'arrivée de l'étiquette et de la matière devant la machine, le séquençage établi est par conséquent toujours réalisable : il n'a pas lieu d'être réévalué à la fin de chaque opération. La procédure d'affectation de la prochaine opération est donc très simple, puisqu'il s'agit de débiter la première opération du train.

Le traitement des urgences suit une procédure inverse : le kanban actif porteur de l'urgence se positionne en tête du train, et va chercher à reculer dans le train afin de perturber le moins possible les autres ordres, tout en assurant sa réalisation dans les délais souhaités.

Une panne sur une machine va entraîner une réaffectation des opérations délestables sur les ressources correspondantes. La remise en état de la ressource entraîne, en fonction de la longueur de sa file d'attente, une « récupération » de tout ou partie des lots délestés.

Validation

A l'opposé des deux modes de pilotage précédemment évoqués, le kanban actif n'est pas implémenté sur le système réel : il est donc impossible de valider le comportement du système émulé piloté par rapport au fonctionnement du système réel dans les mêmes conditions.

Par contre, l'utilisation d'une base commune avec le système de pilotage kanban qui a pu être validé, et le développement des algorithmes de contrôle à partir des modèles établis au chapitre trois nous permet de postuler que l'implémentation réalisée permettra d'analyser les performances d'un système contrôlés de manière réaliste. Seule une implémentation réelle permettra par la suite de valider la véracité des résultats.

Synthèse :

Ce chapitre expose la construction d'une architecture d'émulation permettant l'étude de différents modèles de pilotage. La construction de systèmes de pilotage exécutables à partir des modèles est également détaillée.

L'architecture résultant de ce processus va permettre de faire varier les différents facteurs impactant la production afin de permettre des analyses quantitatives sur les indicateurs de production définis.

L'architecture résultant de ce processus peut également être utilisée en aide à la décision locale, assurant ainsi la cohérence des décisions prises sur le terrain en permettant à chaque décideur d'évaluer l'impact de ses décisions sur la performance globale.

Chapitre 5 : Résultats

Objectifs :

Dans ce chapitre, une approche basée sur les plans d'expériences permet l'analyse quantitative des effets des différents modes de pilotage ainsi que des autres facteurs considérés comme influents sur les performances du système de production.

Le protocole expérimental est décrit ainsi que les résultats obtenus. Une discussion met en évidence les apports du kanban actif tant en terme de maîtrise des en-cours et des temps d'écoulement que de productivité.

Suite à la phase d'implémentation décrite au chapitre 4, nous disposons de trois modèles exécutables représentatif du système de production UGV piloté par un ordonnancement centralisé, en kanban ou par un kanban actif. L'architecture d'évaluation permet d'étudier les réponses de ces différents systèmes par rapport aux objectifs fixés par simulation en fonction de différents scénarii. Une méthode est nécessaire pour organiser l'ensemble des expériences afin d'obtenir des résultats significatifs.

La lourdeur du processus de collecte de données (qui serait grandement simplifié dans le cas d'un kanban actif) rend préférable l'utilisation des plans d'expériences fractionnaires définis par Taguchi par rapport à une étude réalisée avec un plan complet. En effet, la réalisation d'un plan complet, pour analyser ce problème à trois facteurs contrôlables à trois niveaux (soit 27 modalités) et 4 facteurs non contrôlables à deux modalités (soit 8 modalités), nécessiterait la réalisation de 216 expériences. L'utilisation d'un plan fractionnaire orthogonal permet de réduire de manière importante le nombre des expériences à réaliser.

Le plan principal organise les expériences en fonction de la variation de facteurs de contrôle (maîtrisables). Les résultats de ces expériences étant bruités par des facteurs non contrôlables (de bruit), un plan bruit a été utilisé pour tester les réactions du système face aux variations de ces facteurs. Le plan produit qui en résulte permet de tester et mesurer la robustesse des différents systèmes de pilotage face à des perturbations non contrôlables par le gestionnaire, comme le niveau d'en-cours initial ou les pannes machines.

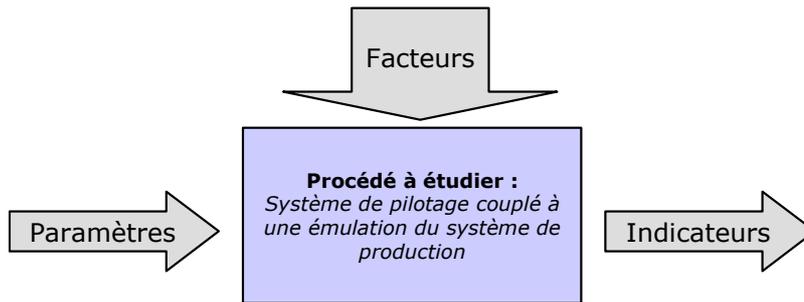


Figure 75. Méthode d'étude du système par plan d'expériences

Ce chapitre se découpe en deux parties. La première partie est organisée d'après le protocole expérimental suivant :

- Définition de la performance à mesurer ;
- Définition du moyen de mesure ;
- Recensement des facteurs agissant sur la réponse ;
- Sélection des facteurs importants et détermination des modalités ;
- Choix du plan d'expériences ;
- Organisation et réalisation des expériences.

La seconde partie est dédiée à l'analyse et à la discussion des résultats.

1. Protocole expérimental

1.1 Définition de la performance à mesurer

L'objectif de l'étude expérimentale est de quantifier la réponse du système de pilotage quant aux objectifs définis au chapitre 3, afin de comparer ses performances à celle des systèmes de pilotage par ordonnancement centralisé ou en kanban. Les performances à mesurer sont donc :

- Le maintien d'un niveau d'en-cours satisfaisant ;
- La maîtrise et la réduction du temps d'écoulement ;
- Le maintien ou l'amélioration de la capacité ;
- L'amélioration de la productivité de l'emballage.

1.2 Définition du moyen de mesure

Le système étudié étant soumis à différents paramètres pouvant changer de valeur, il a été nécessaire de réaliser plusieurs simulations pour chaque configuration. De plus, le système étant soumis à des paramètres non contrôlables, chaque scénario a été répété 5 fois. La moyenne des indicateurs sur chacune des simulations est donc représentative des performances du système dans cette situation. Le temps d'écoulement moyen des pièces dans

l'usine étant d'environ 4 jours, une durée d'exécution représentant 10 jours pour chaque simulation permet d'obtenir des résultats significatifs.

La performance par rapport au niveau d'en-cours est mesurée à l'aide d'un indicateur de niveau d'en-cours moyen. Le système réel permet d'obtenir un instantané de l'état des en-cours toutes les quatre heures. L'architecture d'évaluation a donc été instrumentée pour fournir une trace du niveau (et contenu) du stock d'en-cours, par localisation (WIP1, WIP2 ou WIP3) sous la forme de trace, toutes les quatre heures. L'indicateur de niveau d'en-cours représente le nombre de palettes dans l'en-cours total. Pour une exécution de la simulation, le niveau d'en-cours moyen représente ainsi la valeur moyenne prise par l'indicateur de niveau d'en-cours, relevé avec une périodicité de quatre heures.

Afin de mesurer le temps d'écoulement moyen, les temps d'écoulement de tous les lots qui ont été débités et emballés durant la période de simulation sont archivés. Ce temps d'écoulement représente la durée écoulée entre le début de la première opération (opération de débit) et la fin de la dernière opération (opération d'emballage). L'indicateur de temps d'écoulement moyen mesure la moyenne du temps d'écoulement de chacun des lots.

La capacité de l'unité (throughput) est mesurée par le nombre moyen de colis produits quotidiennement durant la période de simulation, soit le nombre total de colis produits sur la période divisé par les 10 jours que dure chaque simulation.

La productivité de l'emballage reflète l'utilisation (ou non) des ressources d'emballages. Elle représente le rapport du nombre de colis réellement produits sur le nombre de colis qu'aurait produits la ressource, à la cadence nominale, pendant le nombre d'heures d'ouverture de la chaîne d'emballage.

Ces différents indicateurs sont calculés a posteriori à partir des traces de simulation, et archivés dans la base de rapports.

1.3 Recensement des facteurs agissant sur la réponse

Une fois les indicateurs permettant de mesurer la performance du système définis, il est nécessaire d'identifier les facteurs susceptibles d'avoir un impact sur les performances considérées en collectant les informations auprès des utilisateurs (Figure 76).

Tout d'abord, l'objectif de l'étude étant de comparer plusieurs systèmes de pilotage, le premier facteur évident est le mode de pilotage.

Les facteurs relatifs aux moyens sont le taux de pannes des différentes ressources et la possibilité d'ajuster la capacité par le recours à la modulation horaire des salariés.

Enfin, la typologie du mix-produits ou la présence dans le système d'ordres urgents gérés comme tels peuvent également impacter les performances.

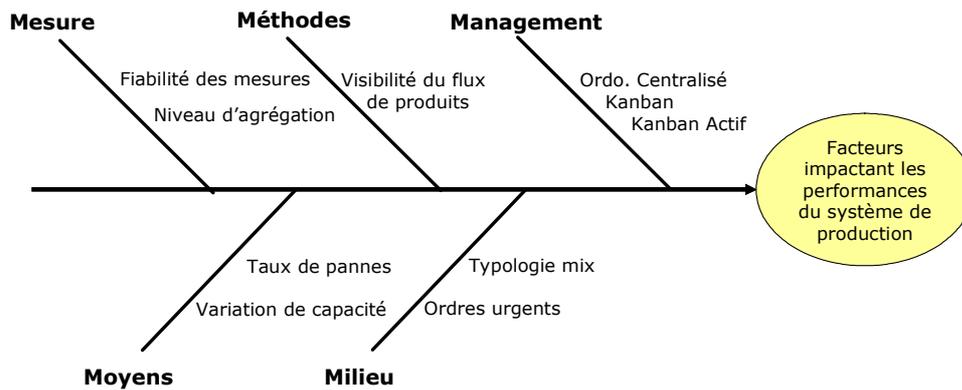


Figure 76. Facteurs impactant les performances du système de production

1.4 Sélection des facteurs significatifs et choix des modalités

Parmi les facteurs identifiés, six ont été retenus pour analyser les performances des systèmes de pilotage considérés :

- Le mode de pilotage ;
- La possibilité d'ajuster dynamiquement la capacité disponible ;
- La typologie du mix-produits (liasse d'OF à réaliser) ;
- Le niveau d'en-cours du stock de pièces finies (WIP3) ;
- Le taux de pannes de la ressource critique de pose de miroirs (LH1) ;
- La présence ou non d'ordres urgents.

Parmi ces facteurs, les trois premiers sont contrôlables au sens où le gestionnaire de l'unité peut jouer sur leurs valeurs (Figure 77). La méthodologie des plans d'expériences s'appuie sur l'expérience des acteurs du terrain et permet ainsi de s'affranchir des tests de modalités de facteurs qui conduiraient à l'évidence à des résultats non souhaités. Par conséquent, sur la base de cette expérience, et à des fins d'économie d'essais, nous cherchons à déterminer le nombre minimum de modalités de ces facteurs.

Le facteur « Mode de pilotage » admet trois modalités qui sont les trois modèles présentés au chapitre 4, soit le pilotage par un ordonnancement centralisé, par kanbans (actuels) ou par kanbans actifs.

Le facteur « Possibilité d'ajuster la capacité » admet trois modalités : l'impossibilité de recourir à l'ajustement de capacité (respect strict des calendriers définis), une capacité faible à ajuster les horaires d'ouverture dans la limite de plus ou moins une heure par équipe (8 heures), et enfin une capacité forte qui autorise des ajustements de plus ou moins deux heures. Cet ajustement de capacité est traité dynamiquement, de façon similaire quel que soit le mode de pilotage : en fin d'équipe, si la file d'attente devant la ressource est inférieure à 8 heures de charges, aucun ajustement n'est effectué. Si cette file d'attente représente plus de 8h, alors une heure supplémentaire est réalisée. Enfin, si cette attente excède 12h, deux heures supplémentaires sont réalisées. Enfin, en cas de rupture de charge en fin d'équipe, l'ajustement de capacité permet de réduire le temps d'ouverture des ressources et donc de ne pas dégrader l'efficacité main d'œuvre.

Le facteur « Typologie de mix-produits » peut être ajusté par la liasse d'OF injectés dans le programme de production. Une première modalité est un mix-produits composé de produits simples, dans des quantités importantes (taille de série moyenne de 400 colis), avec peu de composants utilisant la ressource critique de pose miroirs. Une seconde modalité représente un mix-produits plus varié, avec une plus forte proportion de composants à gammes d'usinage longues. Enfin, la troisième modalité représente un mix-produits complexe, avec des tailles de séries variées (de 200 à 400), et une grande diversité de gammes d'usinage.

Facteur contrôlable	Modalité	Descriptif
Mode de pilotage	Ordonnancement centralisé	<i>Système piloté par un ordonnancement</i>
	Kanban	<i>Système piloté en kanban</i>
	Kanban Actif	<i>Système piloté par kanbans actifs</i>
Variation de capacité	Nulle	<i>Pas d'ajustements de capacité</i>
	Faible	<i>Ajustements de capacité de +/- 1 heure</i>
	Forte	<i>Ajustements de capacité de +/- 2 heures</i>
Mix-produits	Simple	<i>Produits assez standards, taille de série ~400</i>
	Peu complexe	<i>Produits standards ou complexes, taille de série ~400</i>
	Complexe	<i>Produits standards ou complexes, taille de série de 200 à 400</i>

Figure 77. Modalités des facteurs contrôlables

En plus de ces trois facteurs contrôlables, les utilisateurs du système ont identifiés trois facteurs non contrôlables qui peuvent néanmoins influencer les performances du système de production. Par ailleurs, la maîtrise dans la simulation de ces facteurs habituellement non contrôlables permet de tester la robustesse des différents systèmes de pilotage aux perturbations.

Le niveau d'en-cours à l'emballage en début de simulation a été souligné comme un point pouvant impacter les performances. En effet, un en-cours bas protège peu la ressource d'emballage contre la variabilité des temps des ressources amont, alors qu'un en-cours moyennement rempli offre une plus grande marge.

Le taux de pannes de la ressource de pose miroir, identifiée comme critique, peut également impacter la performance. Notamment, plusieurs colis peuvent être bloqués avant l'emballage, uniquement dans l'attente d'une pièce à miroir : l'ensemble des autres pièces occupent le stock WIP3, sans toutefois représenter de charge pour la ressource d'emballage. La réalisation d'essais sans pannes, ou avec une loi de pannes issue de la réalité permettra de mettre en évidence la robustesse des différents systèmes de pilotage aux aléas.

La présence d'ordres urgents est également relevée comme un facteur perturbant les performances. Le facteur « Présence d'ordres urgents » admet donc deux modalités, l'une excluant tout ordre urgent et la seconde pour laquelle les scénarii intégreront en moyenne un lot urgent générant une modification des priorités en cours d'exécution par jour.

Facteur Non contrôlable	Modalité	Descriptif
Niveau d'en-cours à l'emballage à $t=0$	Bas	<i>Moins de 4h de charge dans le stock WIP3</i>
	Moyen	<i>Plus de 4h de charge dans le stock WIP3</i>
Pannes machine LH1	Aucune	<i>Aucune panne</i>
	Présence de pannes	MTBF = 24h, MTTR = 1h
Urgence commerciales	Absence d'urgences	<i>Aucune urgence</i>
	Présence d'urgences	<i>Une urgence par jour en moyenne</i>

Figure 78. Modalités des facteurs non contrôlables

1.5 Choix du plan d'expériences

Compte tenu des facteurs contrôlables et non contrôlables, on aura donc différents plans fractionnaires orthogonaux organisés selon un plan produit.

Pour les facteurs contrôlables, le plan principal sera une matrice $L9(3^3)$ permettant de gérer trois facteurs à trois modalités en réalisant 9 expériences.

Pour les facteurs non contrôlables, le plan bruit sera une matrice $L4(2^3)$ permettant de gérer trois facteurs à deux modalités en réalisant 4 expériences.

Nous souhaitons mesurer la robustesse des systèmes de pilotage par rapport à la variabilité des phénomènes non contrôlables. Par conséquent, chacune des configurations de réglage pour les neuf essais sera répétée 20 fois, soit 5 fois pour chaque combinaison des facteurs de bruit.

Par conséquent, nous pouvons établir un plan d'expériences $L9(3^3)$ (Figure 79), qui conduit à réaliser des expériences sur 36 combinaisons des facteurs, contrôlables ou non. La valeur de chaque indicateur sera la moyenne des valeurs pour chacune des cinq répliques. La réalisation du plan d'expériences nécessite donc la réalisation de 180 simulations.

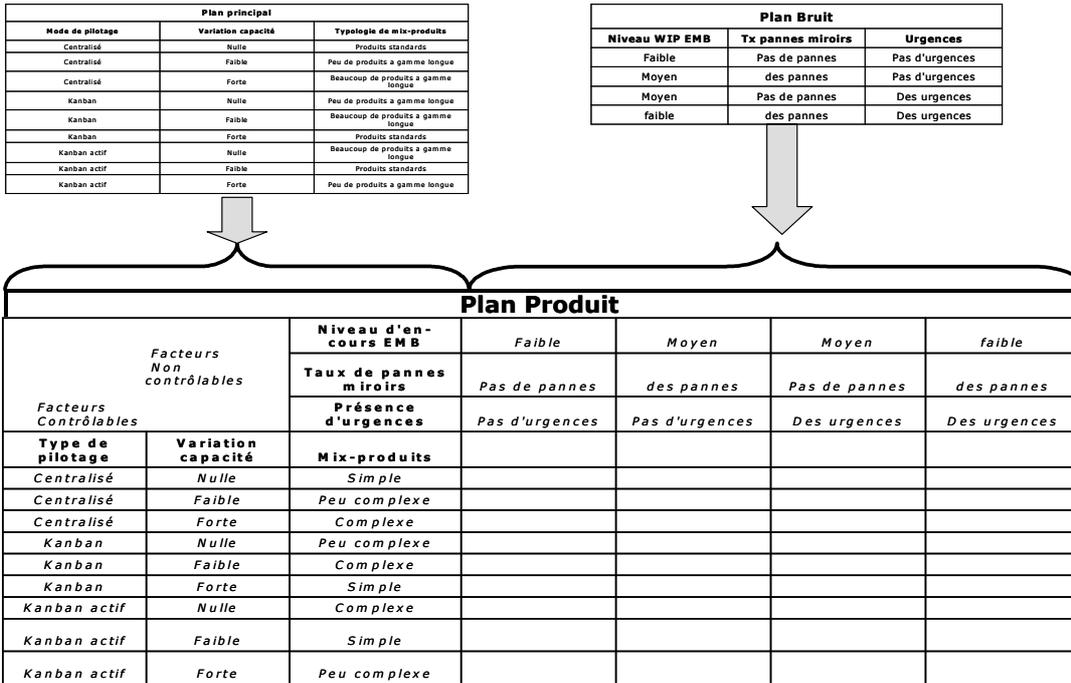


Figure 79. Construction du plan produit

1.6 Organisation et réalisation des essais

Les plans fractionnaires Taguchi conduisent à optimiser le nombre de réglages en fonction du positionnement des facteurs dans les colonnes. Dans notre cas, l'étude étant informatique, les réglages sont relativement simples. Cependant, le processus le plus lourd est la modification du système de pilotage. Par conséquent le facteur « Type de pilotage » est positionné dans la première colonne, afin de ne réaliser que deux changements sur l'ensemble des expériences.

La durée de définition et de mise en œuvre d'un tel plan d'expériences est de l'ordre d'une semaine. La structuration et l'analyse des causes réalisées lors de l'analyse du système de production (Chapitre 1) a permis de réaliser très rapidement les phases de définition du protocole expérimental (définition de la performance à mesurer et des moyens de mesure, recensement et sélection des facteurs agissant sur la réponse et choix des modalités). La durée d'exécution d'une réplication est d'une dizaine de minute. Pour 180 expériences à réaliser (5 réplifications pour 36 configurations), la durée de simulation est de 30 heures plus les temps de reconversion. Ces temps sont donnés pour un travail réalisé par une personne.

Les résultats sont présentés sur la Figure 80.

N°	Mode de Pilotage	Variat. Capa.	Mix produit	WIP EMB	Pannes miroir	Urgences	Niveau d'en cours					Temps d'écoulement					Production					Productivité													
							1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5									
1	Centralisé	Null	Simple	Faible	Absence	Absence	574	606	605	582	613	596	3%	89	94	91	88	90	89	3%	3350	3570	3420	3495	3420	3451	2%	67	65	66	69	68	67	2%	
2	Centralisé	Faible	Peu complexe	Faible	Absence	Absence	590	608	588	598	615	598	2%	91	95	88	90	93	91	3%	3338	3405	3171	3252	3289	3%	70	69	66	67	71	69	3%		
3	Centralisé	Fort	Complex	Faible	Absence	Absence	584	572	586	582	572	579	1%	93	97	90	93	93	93	3%	3660	3740	3590	3630	3640	3652	2%	68	66	63	67	69	67	3%	
4	Kanban	Null	Peu complexe	Faible	Absence	Absence	567	580	590	583	573	579	1%	97	100	101	95	98	98	2%	3440	3342	3494	3598	3590	3493	3	64	62	67	60	65	61	4	
5	Kanban	Faible	Complex	Faible	Absence	Absence	555	557	553	558	535	552	2%	92	91	95	94	93	93	2%	3437	3429	3432	3396	3561	3491	4	65	62	64	55	60	61	4	
6	Kanban	Fort	Simple	Faible	Absence	Absence	559	560	570	566	541	558	2%	89	91	93	93	92	92	2%	3694	3749	3659	3587	3736	3685	3	61	65	66	67	64	65	3	
7	Kanban Acti	Null	Complex	Faible	Absence	Absence	579	559	538	540	550	550	3%	90	86	90	87	91	89	2%	3259	3479	3559	3401	3260	3352	2	62	62	60	64	63	62	2	
8	Kanban Acti	Faible	Simple	Faible	Absence	Absence	523	536	537	522	513	527	2%	88	86	83	82	82	84	3%	3383	3515	3512	3426	3491	3465	2	74	73	74	71	76	74	2	
9	Kanban Acti	Fort	Peu complexe	Faible	Absence	Absence	657	673	659	672	663	665	1%	99	92	97	102	100	98	4%	3265	3250	3360	3190	3280	3273	3%	63	68	66	62	64	65	4%	
10	Centralisé	Null	Simple	Moyen	Présence	Présence	697	700	679	668	663	681	2%	97	103	106	107	93	101	6%	3630	3710	3560	3600	3610	3622	4%	66	62	62	67	70	65	4%	
11	Centralisé	Faible	Peu complexe	Moyen	Présence	Absence	656	730	597	647	665	659	7%	105	105	108	109	104	106	2%	3126	3279	3334	3525	2943	3241	5%	62	72	72	62	60	66	5%	
12	Centralisé	Fort	Complex	Moyen	Présence	Absence	594	598	640	625	622	616	3%	100	107	101	104	102	103	3%	3253	3170	3243	3340	3300	3261	4	58	57	59	59	57	58	3	
13	Kanban	Null	Peu complexe	Moyen	Présence	Absence	615	584	577	583	609	594	3%	93	95	93	93	92	93	1%	3431	3407	3405	3410	3474	3428	3%	69	71	69	64	69	68	4%	
14	Kanban	Faible	Complex	Moyen	Présence	Absence	628	651	644	633	647	641	1%	102	101	103	97	101	101	2%	3078	3188	3084	3055	3192	3119	2%	65	62	60	64	61	62	2%	
15	Kanban Acti	Null	Complex	Moyen	Présence	Présence	583	554	587	573	561	572	2%	93	93	93	97	96	94	2%	3505	3449	3472	3452	3496	3475	2%	61	61	64	63	65	63	2%	
16	Kanban Acti	Faible	Simple	Moyen	Présence	Absence	626	539	535	530	548	535	2%	88	87	90	94	92	90	3%	3236	3220	3254	3293	3329	3266	2%	71	69	64	70	68	68	2%	
17	Kanban Acti	Faible	Peu complexe	Moyen	Présence	Absence	675	639	627	637	651	646	3%	110	98	102	99	96	101	5%	3491	3346	3386	3421	3039	3336	4%	63	66	68	64	64	65	3%	
18	Kanban Acti	Fort	Complex	Moyen	Présence	Présence	685	720	695	688	683	694	2%	100	96	94	96	104	98	4%	3448	3475	3250	3241	3322	3347	4%	68	61	68	67	71	67	4%	
19	Centralisé	Null	Simple	Moyen	Présence	Présence	603	574	607	593	581	592	2%	87	89	92	92	89	90	2%	3437	3449	3524	3448	3533	3479	1%	70	71	74	70	71	72	1%	
20	Centralisé	Faible	Peu complexe	Moyen	Présence	Absence	621	610	617	608	623	615	1%	95	94	93	94	94	94	1%	3506	3361	3627	3381	3372	3449	3%	67	65	64	64	65	65	2%	
21	Centralisé	Fort	Complex	Moyen	Présence	Absence	535	559	538	566	563	552	3%	91	89	91	90	91	90	1%	3523	3587	3420	3565	3456	3510	2%	75	69	71	67	67	70	2%	
22	Kanban	Null	Peu complexe	Moyen	Présence	Présence	520	519	515	510	528	518	1%	86	86	85	84	83	85	2%	3446	3530	3623	3518	3540	3532	2%	70	71	71	72	70	71	1%	
23	Kanban	Faible	Complex	Moyen	Présence	Présence	663	674	630	679	689	667	3%	96	100	101	102	91	98	4%	3179	3175	3228	2832	3111	3105	5%	59	56	66	57	63	60	6%	
24	Centralisé	Null	Peu complexe	Faible	Présence	Présence	708	720	695	688	683	698	2%	100	96	102	106	102	106	102	4%	3236	3220	3254	3293	3329	3266	4%	64	66	57	64	63	63	4%
25	Kanban Acti	Null	Complex	Moyen	Présence	Présence	673	763	696	664	671	693	6%	105	114	113	104	99	107	6%	3293	3380	3061	3396	3414	3309	6%	69	63	56	64	55	61	6%	
26	Kanban Acti	Faible	Peu complexe	Moyen	Présence	Présence	648	604	529	598	643	604	8%	103	99	103	102	96	101	3%	3020	2657	3016	3010	2981	2937	4%	58	70	55	50	71	61	7%	
27	Kanban Acti	Fort	Complex	Moyen	Présence	Présence	583	582	554	571	582	574	2%	93	96	91	88	95	93	3%	3057	3135	3102	3050	3274	3123	5%	51	65	64	61	63	61	2%	
28	Centralisé	Null	Peu complexe	Faible	Présence	Présence	628	633	621	629	659	635	2%	93	103	109	104	96	101	6%	3226	3205	3298	3001	3394	3225	4%	66	65	62	63	68	65	4%	
29	Centralisé	Fort	Complex	Moyen	Présence	Présence	509	532	540	530	538	530	2%	97	91	93	93	93	93	3%	3671	3520	3509	3504	3449	3531	3%	68	69	63	70	66	67	2%	
30	Centralisé	Fort	Complex	Moyen	Présence	Présence	557	525	556	517	511	533	4%	91	87	87	90	88	89	2%	3356	3376	3371	3403	3379	3377	1%	71	68	69	70	77	71	3%	

Figure 80. Résultats des simulations

2 Analyse des résultats et discussion

L'ensemble des expériences réalisées représente un volume de données statistiquement probant, permettant d'analyser l'impact des niveaux des différents facteurs sur les performances du système. Cette section présente d'abord l'analyse des impacts sur chacune des performances avant de discuter les écarts entre les trois modes de pilotage.

2.1 Effets des facteurs sur les performances

2.1.1 Effets sur le niveau d'en-cours

Le premier indicateur de performance étudié est le niveau d'en-cours moyen (Figure 81). Pour l'ensemble des simulations réalisées, la valeur moyenne de cet indicateur est de 602 palettes. La capacité totale de l'en-cours est de 700 palettes, toute palette supplémentaire doit être posée au sol générant des pertes de productivité en manutention (non mesurées directement).

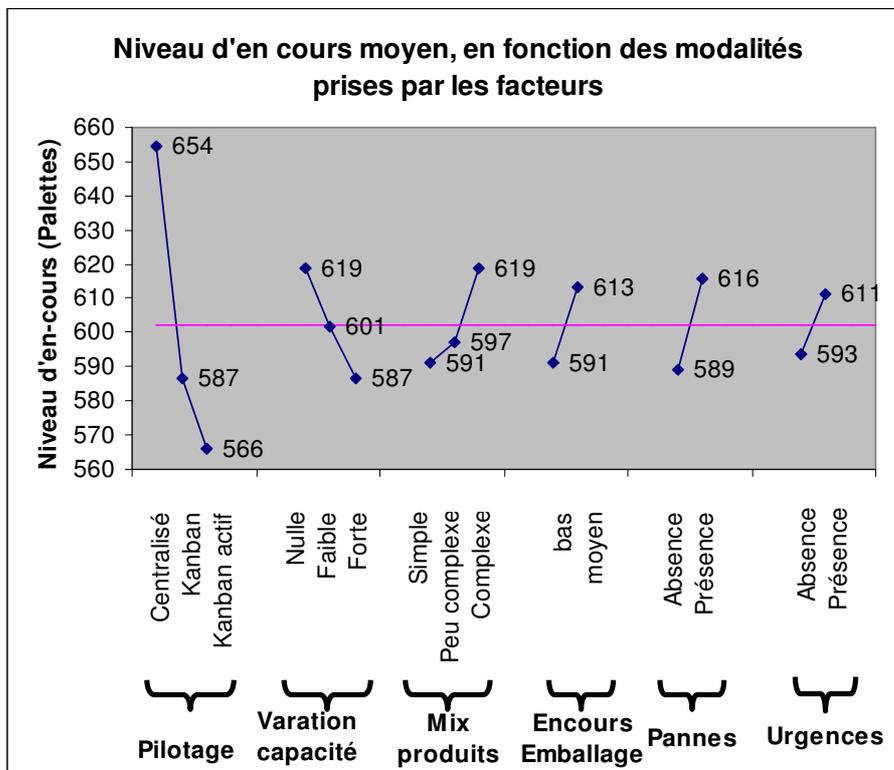


Figure 81. Impact des facteurs sur le niveau d'en-cours moyen

Pour le facteur « Mode de pilotage », ces résultats montrent que l'ordonnancement centralisé entraîne un niveau d'en-cours élevé (654 palettes en moyenne), alors que le kanban et le kanban actif permettent de maintenir le niveau d'en-cours à un niveau moins élevé (respectivement 587 et 566 palettes en moyenne dans l'en-cours). Cet écart s'explique par les écarts apportés à l'ordonnancement généré de façon centralisé en cas d'aléas, alors que les systèmes reposant sur le kanban les intègrent de fait.

La possibilité de faire varier la capacité impacte le niveau d'en-cours de façon linéaire : il est naturel qu'une augmentation de capacité sur les ressources en aval au débit permette d'ajuster et donc de mieux maîtriser le niveau d'en-cours. Plus la plage de variation est large et plus l'impact sur le niveau d'en-cours est important.

L'impact du mix-produits sur le niveau d'en-cours n'est pas linéaire : en effet, si le mix-produits est peu complexe, l'en-cours augmente peu, alors qu'un mix-produits complexe va l'augmenter de façon significative.

En toute logique, l'augmentation du niveau d'en-cours initial devant l'emballage augmente l'en-cours moyen.

Enfin, les perturbations introduites sous formes de pannes ou d'urgences perturbent le fonctionnement du système et génèrent une augmentation du niveau d'en-cours.

2.1.2 Effets sur le temps d'écoulement

La valeur moyenne prise par l'indicateur « temps d'écoulement » pour l'ensemble des simulations est de 96 heures. La Figure 82 illustre l'impact des différents niveaux des facteurs sur le temps d'écoulement moyen en heures.

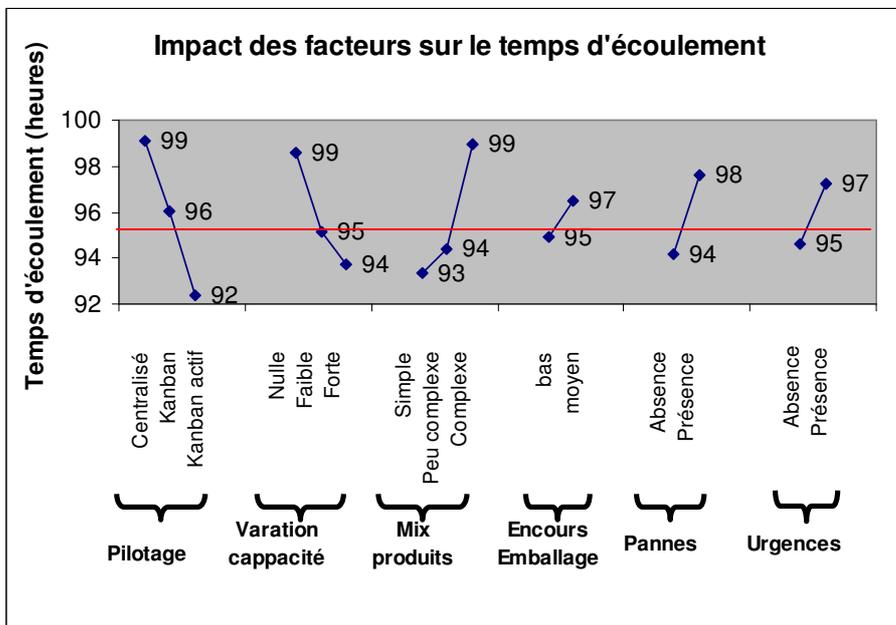


Figure 82. Impact des facteurs sur le temps d'écoulement

Le pilotage par ordonnancement centralisé conduisait à un temps d'écoulement moyen d'une centaine d'heures. Le passage en pilotage par kanbans permet de réduire ce temps d'écoulement d'environ 4% pour atteindre une moyenne de 96 heures. Les écarts mesurés dans la réalité confirment ces valeurs. Le pilotage s'appuyant sur des kanbans actifs permettrait de réduire de nouveau de 4 heures le temps d'écoulement moyen ce qui conduit à un temps d'écoulement moyen de 92 heures.

La possibilité d'ajuster dynamiquement la capacité a également un impact sur le temps d'écoulement : en effet, plus la marge de manœuvre laissée aux décideurs de terrain est grande et plus l'impact est fort sur le temps d'écoulement. Cependant, la diminution du temps d'écoulement n'est pas linéaire, la plus grosse part du gain étant apportée en donnant une faible variation de capacité. Cet écart dans les apports entre faible et forte variation de capacité est à évaluer au regard du coût généré par la mise en place de ces mécanismes, en fonction des marges laissées.

A l'inverse, la complexité du mix-produits conduit à un allongement du temps d'écoulement moyen, ce qui est tout à fait logique, les produits complexes étant composés de plus de composants à gammes longues. Cependant, la non linéarité de l'impact sur le temps d'écoulement montre que le système peut absorber, sans grand impact sur ce dernier, une faible proportion de produits complexes, mais qu'une augmentation importante de la part des produits complexes se traduit par un allongement significatif du temps d'écoulement.

Le niveau d'en-cours initial devant l'emballage impacte également le temps d'écoulement moyen. Ce résultat est logique : en effet un en-cours plus élevé devant l'emballage signifie un temps d'attente plus long dans cet en-cours, et par conséquent un ralentissement du flux.

La présence de perturbations de types « Pannes » ou « Urgences » pénalise également le temps d'écoulement moyen. Pour le facteur des urgences par exemple, ce phénomène traduit le fait qu'une mise en priorité systématique d'un lot urgent va permettre de minimiser son temps d'écoulement propre, en dégradant l'écoulement des autres ordres. La somme des perturbations générées est supérieure à l'amélioration apportée sur l'ordre urgent.

D'une manière générale, nous constatons une certaine corrélation entre le niveau d'en-cours moyen et le temps d'écoulement moyen, une augmentation de l'encours entraînant un allongement du temps de cycle. Cependant la relation entre les deux indicateurs n'est pas linéaire, ce qui justifie l'étude des deux paramètres.

2.1.3 Effets sur la production globale

La production globale reflète le « throughput » du système de production, c'est-à-dire le nombre de colis produits quotidiennement. L'entreprise étant globalement sous capacitaire, tout gain de production représente potentiellement une augmentation du chiffre d'affaires. L'évolution de l'indicateur de production, dont la moyenne pour l'ensemble des simulations vaut 3350 colis, est montrée sur la Figure 83.

Le pilotage par ordonnancement centralisé assure une production quotidienne proche de la moyenne (3345 colis). Le passage en kanbans, par la perte des mécanismes d'optimisation, génère une perte de production de l'ordre de 1%. La mise en œuvre des mécanismes liés au kanban actif permet de rétablir une bonne production, supérieure à celle fournie par l'ordonnancement centralisé.

La possibilité de faire varier la capacité au fil du temps permet également d'améliorer la production. En effet, la disponibilité de capacité supplémentaire permet d'augmenter l'ouverture des ressources en cas de forte charge, et donc de produire plus. Tout comme pour le temps d'écoulement, les gains les plus importants sont faits avec une faible capacité de variation. Le gain supplémentaire apporté par une souplesse plus grande doit être étudié au regard des coûts engendrés.

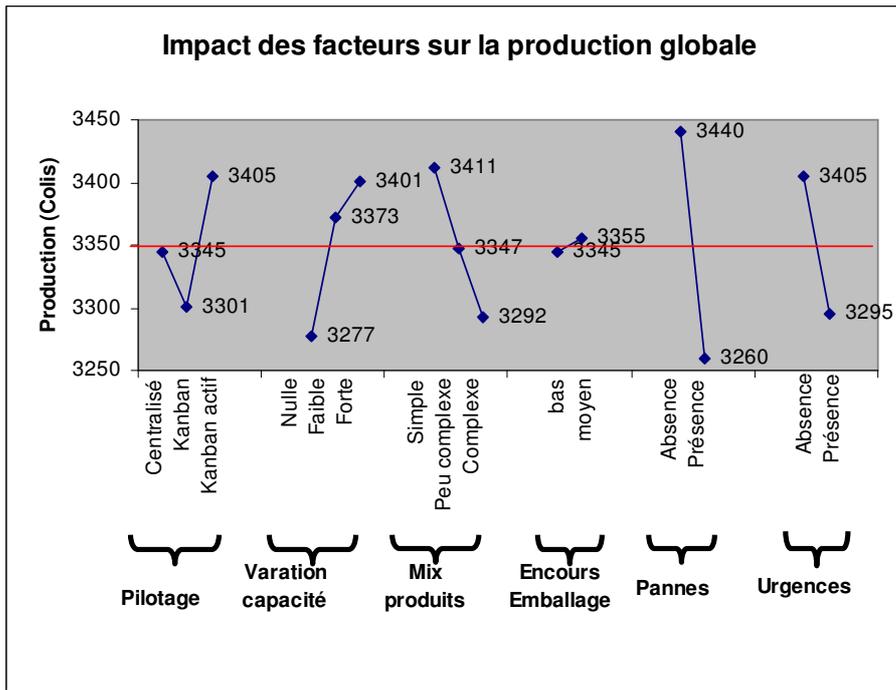


Figure 83. Impact des facteurs sur la production

Le niveau d'en-cours du stock de pièces finies en début de scénario impacte peu la production globale. Il est cependant possible de constater une légère amélioration avec un niveau d'en-cours moyen, celui-ci permettant d'absorber une partie des aléas générés en amont par les différentes longueurs de gamme.

La présence de pannes altère la production de manière importante (-6%). Cette mesure permet de mettre en évidence la nécessité d'efforts de maintenance sur la ressource goulot permettant d'assurer une disponibilité optimale. Le kanban actif peut représenter un moyen d'alimentation d'un système de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur), notamment en permettant l'analyse en temps réel de la variabilité des temps opératoires. Cependant cette fonctionnalité ne fait pas partie du cadre de notre étude.

Enfin, la présence d'urgences dégrade également la production avec un impact moyen de 4%, qui reflète la perturbation induite par un ordre urgent sur les autres ordres.

2.1.4 Effets sur la productivité

La productivité à l'emballage reflète l'utilisation faite des ressources engagées. Elle est le reflet du nombre de colis produits par rapport aux ressources mises en œuvre. La productivité moyenne est de 65,15%.

Le pilotage par un ordonnancement centralisé permet d'atteindre une productivité de la ressource d'emballage de 65%, soit la valeur moyenne. Ceci s'explique par une capacité à anticiper les variations de charge et à adapter préalablement la capacité mise en œuvre. Le pilotage en kanban entraîne une perte de la productivité : la perte de visibilité à moyen terme ne permet pas d'ajuster suffisamment l'ouverture, et l'ordonnancement ne prend pas en compte les contraintes d'emballage. Le pilotage par kanbans actifs permet de prendre en

compte de manière réactive les variations, et permet d'obtenir une productivité moyenne de 67%.

La possibilité d'ajuster la capacité a un impact direct sur la productivité de l'emballage. En effet, ce paramètre permet d'ajuster dynamiquement la capacité de la ressource d'emballage en fonction de la charge disponible. L'augmentation de la productivité est donc proportionnelle à la marge laissée pour adapter la capacité.

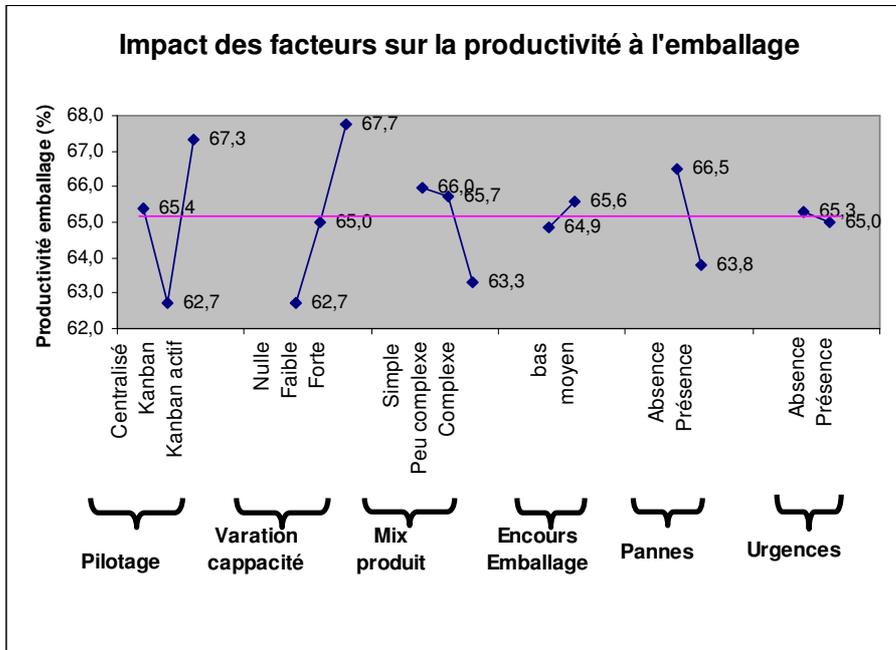


Figure 84. Impact des facteurs sur la productivité

La présence de pannes ou d'urgences impacte également la productivité. Cependant, la présence d'urgences affecte assez peu la productivité avec une perte de performance de 1% contre une dégradation de 3% pour la présence de pannes. Le système de production est donc plus affecté par les pannes que par les urgences.

2.1.5 Validation des résultats

Ce plan d'expériences permet de définir une combinaison des différents facteurs permettant d'atteindre la performance optimale. Cette combinaison serait la suivante :

- **Mode de pilotage** : Kanban actif ;
- **Variation de capacité** : forte ;
- **Mix-produits** : standard ;
- **En-cours emballage** : moyen ;
- **Pannes** : absence de pannes ;
- **Urgences** : absence d'urgences.

Le cumul des impacts de ces facteurs aux niveaux préconisés devrait être de -97 palettes sur le niveau d'en-cours (-16,1%), une réduction du temps d'écoulement de 12 heures

(-12,3%), une augmentation de la production de 307 colis (+9,1%) et une amélioration de la productivité de 10,4%.

	Niveau d'en-cours moyen	Temps d'écoulement	Production	Productivité
Attendu	506	84	3657	72
Obtenu	518	87	3589	70
Ecart(%)	2,4%	3,5%	-1,9%	-2,7%

Figure 85. Résultats de la réplication de validation

La réalisation de 10 réplications de la simulation pour cette combinaison des facteurs a donné les résultats obtenus sur la Figure 85. Les performances obtenues sont légèrement inférieures à celles attendues (de l'ordre d'1 à 3%), ce qui met en évidence l'existence probable d'interactions entre les différents facteurs (qui n'ont pas été étudiées) mais valide cependant l'étude réalisée.

2.2 Discussion sur les modes de pilotage

L'objectif de cette étude était d'analyser de façon comparative les trois modes de pilotage possibles de la production. Afin de mesurer l'impact des différentes modalités des facteurs sur les performances, celles-ci ont été analysées par rapport à la valeur moyenne. La meilleure performance est donc représentée par un pourcentage élevé. Un pourcentage supérieur à 100 représentant une performance supérieure à la moyenne.

L'amélioration de la performance du système de pilotage, par rapport au niveau d'en-cours et au temps d'écoulement, signifie une diminution de la valeur des indicateurs mesurés. Ainsi, nous pouvons définir un taux de performance représentatif du maintien d'un taux d'en-cours le plus bas possible, et un taux de performance du temps d'écoulement, calculés suivant les formules suivantes :

$$Performance_{en-cours} = - \frac{Valeur_{configuration} - valeur_{moyenne}}{valeur_{moyenne}}$$

$$Performance_{Ecoulement} = - \frac{Valeur_{configuration} - valeur_{moyenne}}{valeur_{moyenne}}$$

L'amélioration de la performance sur les indicateurs de production et de productivité se traduit en revanche par une augmentation de la valeur de l'indicateur, ce qui se traduit par les calculs suivants :

$$Performance_{Production} = \frac{Valeur_{configuration} - valeur_{moyenne}}{valeur_{moyenne}}$$

$$Performance_{Productivité} = \frac{Valeur_{configuration} - valeur_{moyenne}}{valeur_{moyenne}}$$

L'analyse graphique de l'impact du mode de pilotage sur les performances est représentée sur le diagramme en radar de la Figure 86.

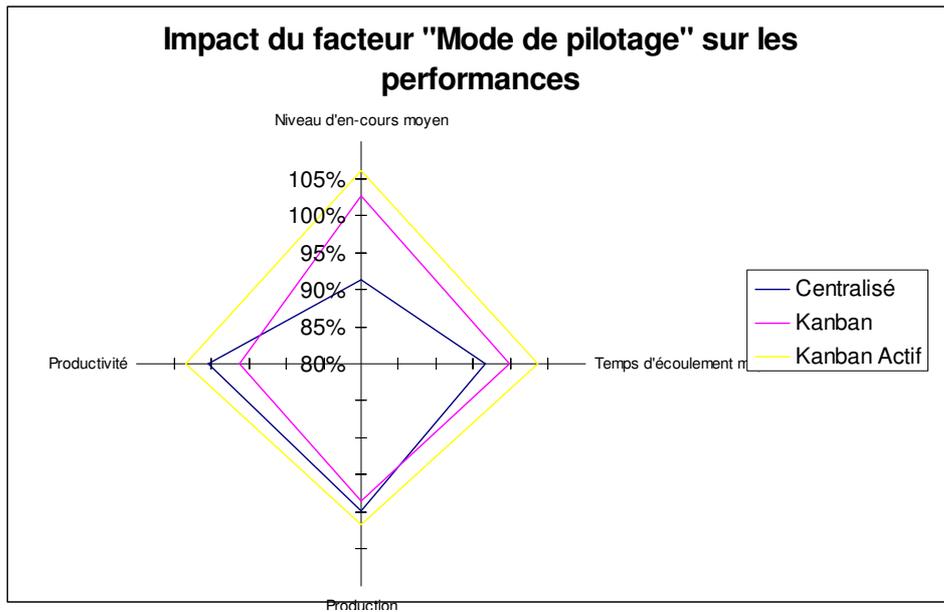


Figure 86. Diagramme en radar de l'impact du mode de pilotage sur les performances du système de production

Ce diagramme met en évidence la complémentarité des approches de pilotage par un ordonnancement centralisé prédictif ou en kanban. Le premier est principalement axé sur la production et la productivité, où il réalise de bonnes performances, alors que pour la maîtrise du niveau d'en-cours et du temps d'écoulement il montre des capacités assez faibles. En effet, les opérations sont ordonnancées en prenant en compte les différentes longueurs de gammes et le nombre de composants à usiner pour chaque colis. Une représentation graphique permet de visualiser a priori les ruptures de charge, et d'affiner l'ordonnancement pour assurer une alimentation continue de la chaîne d'emballage pendant ses heures d'ouvertures. L'ordonnancement à la semaine permet également de réaliser des regroupements de réglages à la semaine permettant d'optimiser la productivité. Cependant cet outil ne permet pas d'estimer a priori le niveau des en-cours et peut conduire à des engorgements, qui pénalisent le temps d'écoulement moyen des produits.

A contrario, le pilotage par kanban permet une bonne maîtrise des facteurs logistiques comme le temps d'écoulement ou le niveau d'en-cours moyen. Le niveau d'en-cours est maîtrisé par le nombre d'étiquettes mises en circulation dans la boucle de production à l'instant t. Cependant, la typologie du système kanban mise en place, plus proche d'un système CONWIP que kanban, permet de maîtriser le niveau d'en-cours global, sans toutefois permettre d'anticiper ses évolutions : un niveau d'en-cours constant ne permet pas systématiquement de protéger la ressource d'emballage de toute rupture de charge, et la gestion physique sur le terrain permet difficilement l'anticipation de ces difficultés. Ce phénomène se traduit par une perte de production, liée aux arrêts de la ressource d'emballage causés par des famines, ainsi qu'une perte de productivité : ces ruptures étant difficilement prévisibles au delà de quelques heures, la capacité ne peut pas toujours être adaptée.

Ainsi donc nous postulons que le kanban actif permet de véhiculer de l'information et d'apporter un support permettant d'améliorer la pertinence des décisions prises sur le terrain, et par conséquent les performances du système global. Les expériences réalisées montrent un

résultat satisfaisant, les performances sur chacun des critères étant légèrement supérieures au pilotage par kanban ou par un ordonnancement centralisé. La mise en œuvre des mécanismes d'optimisation autorisée par les informations portées par le kanban permettent de maîtriser l'en-cours et le temps d'écoulement de la même manière qu'en kanban, et même mieux : en effet les pièces à gammes longues sont accélérées, ce qui conduit à réduire le temps d'attente des autres composants des colis impactés et diminue donc à la fois le temps d'écoulement et le niveau d'en-cours. L'en-cours disponible devant l'emballage (WIP3) est également pris en compte afin d'assurer que les adaptations réalisées sur le terrain ne génèrent pas de ruptures : toute décision d'optimisation locale prend en compte ce critère, ce qui permet d'assurer de bonnes performances de production et de productivité. (Bousbia, 2006) a fait le lien entre les performances du système de production dans un contexte perturbé et l'agilité de son système de pilotage. Par conséquent, l'amélioration des performances logistiques et de productivité apportée par le kanban actif et mesurée par le biais de ce plan d'expériences traduit une amélioration de l'agilité du système de production qui était un élément essentiel de notre problématique industrielle.

L'expérience de validation (Figure 85) fait apparaître un impact des facteurs influents, contrôlables ou non, que sont la typologie du mix-produits, la présence d'urgences ou de pannes. En ce sens, le kanban actif s'inscrit de façon cohérente dans une démarche Juste À Temps, qui va tendre à mettre en place une politique de maintenance rigoureuse pour minimiser les pannes et à assurer une politique de stock qui minimise les urgences en production.

Par ailleurs, un traitement réactif et pertinent des aléas comme les pannes machines ou la présence d'urgences, ainsi que la robustesse à des variations du mix-produits peut être montrée par une analyse des écarts types sur les différents facteurs (Figure 87).

Analyse du facteur pilotage	Niveau d'en-cours	Temps d'écoulement	Production	Productivité	
Centralisé	1	3,81%	4,24%	3,67%	5,22%
Kanban	2	2,85%	3,05%	2,83%	5,96%
Kanban Actif	3	2,14%	2,38%	2,13%	3,12%

Figure 87. Impact du facteur "Mode de pilotage" sur la variabilité des performances

Cette analyse des écarts montre que le kanban et le kanban actif permettent de stabiliser les niveaux d'en-cours et temps d'écoulement, ainsi que la production, par rapport au système centralisé plus sensible aux perturbations. Le système kanban ne permet, par contre, pas de stabiliser la productivité de l'emballage. Les écarts relevés montrent une robustesse du pilotage par kanban actif face aux variations des facteurs non contrôlables supérieure aux deux autres modes de pilotage.

La réalisation de ce plan d'expériences a permis de mettre en avant l'intérêt des mécanismes liés au kanban actif, tant par une amélioration des performances que par le fait qu'elles soient relatives à l'écoulement des flux ou à la productivité, par une stabilisation et une amélioration de la robustesse du système de production face aux aléas non contrôlables.

Rappelons toutefois que ces résultats ont été obtenus avec un paramétrage donné du système de pilotage par kanbans actifs, établi à partir des éléments recueillis auprès des acteurs du terrain. Les informations portées par le kanban sont des informations techniques (nomenclature, gamme d'usinage et alternatives possibles) et logistiques (date d'emballage souhaitée). Les algorithmes d'optimisation locale sont de types itératifs. Par conséquent, si

ces résultats prouvent qu'il est possible d'améliorer les performances, et donc l'agilité du système de production en mettant en œuvre un pilotage par kanbans actifs, les informations à porter par le kanban actif et les algorithmes à mettre en œuvre peuvent encore être améliorés.

Synthèse :

Ce chapitre a présenté le protocole expérimental basé sur les plans d'expériences, qui a permis de mesurer l'impact de différents facteurs sur les performances du système de production. Les performances des différents systèmes de pilotage ont été discutées et les apports du pilotage par kanbans actifs ont été illustrés.

Conclusion et perspectives

L'objectif initial de ce travail de thèse était d'étudier les opportunités apportées par les technologies infotroniques dans le cas particulier du pilotage d'un système de production de meubles en kits, pour la société Parisot Meubles. Les démarches d'amélioration du service client et de réduction de la trésorerie ont conduit l'entreprise à déployer une organisation de type Juste À Temps avec une gestion des flux physiques par Kanbans, en lieu et place de l'ancienne gestion par un ordonnancement centralisé.

Cette vision des résultats de deux types d'approches différentes sur les performances du système de production et l'analyse de la littérature nous ont permis d'identifier l'hybridation du pilotage comme un facteur clé permettant d'améliorer l'agilité du système de production. Notamment une phase de modélisation détaillée des deux modes de pilotage et une analyse de leurs forces et faiblesses ont permis proposer une solution crédible permettant de cumuler les intérêts tout en réduisant les faiblesses identifiées.

Notre proposition repose sur un système de décision centralisé élaborant la séquence d'ordres à réaliser en accord avec la politique de satisfaction client et de stock de l'entreprise, en prenant en compte une optimisation locale des performances de production à partir de séquences FIFO générées par un système kanban. L'infotronisation de ces kanbans pour en faire des « *kanbans actifs* » permet à la fois la synchronisation des flux physiques et informationnels et la cohérence et la coordination de l'ensemble des décisions par rapport au programme pré-établi.

La structure du système d'information support, les objets informationnels permettant de maintenir une vision de l'état du système de production et du flux de produits en temps réel, ainsi que des mécanismes permettant de respecter la séquence d'emballage prévue dans les meilleures conditions de performance, ont été spécifiés.

La proposition répond aux problèmes industriels afférents à l'optimisation de la gestion des flux de production :

- **mesure** : l'infotronisation des étiquettes kanban et le déploiement d'une structure adaptée permet d'assurer la fiabilité qualitative et temporelle des informations remontées;
- **méthode** : sans assurer l'optimalité, des mécanismes d'optimisation locale permettent d'optimiser la productivité et les performances logistiques du système ;
- **management** : la distribution des capacités de décision à même le flux améliore la réactivité du système et sa robustesse aux perturbations ;

Conclusion

- **moyens** : les décisions de pilotage sont prises localement en considérant à la fois les objectifs locaux et l'impact sur la performance globale ;
- **milieu** : l'amélioration de la visibilité permet au système de traiter un nombre supérieur d'ordres, plus complexes et en plus faible quantité, en maintenant un niveau de performance satisfaisant ;
- **maturité** : l'architecture proposée a été éprouvée à l'aide d'une émulation du système opérant. Le système d'information a été connecté au système de production réel et sa consistance a été montrée. Toutefois l'architecture n'a, à l'heure actuelle, pas été appliquée au système opérant réel.

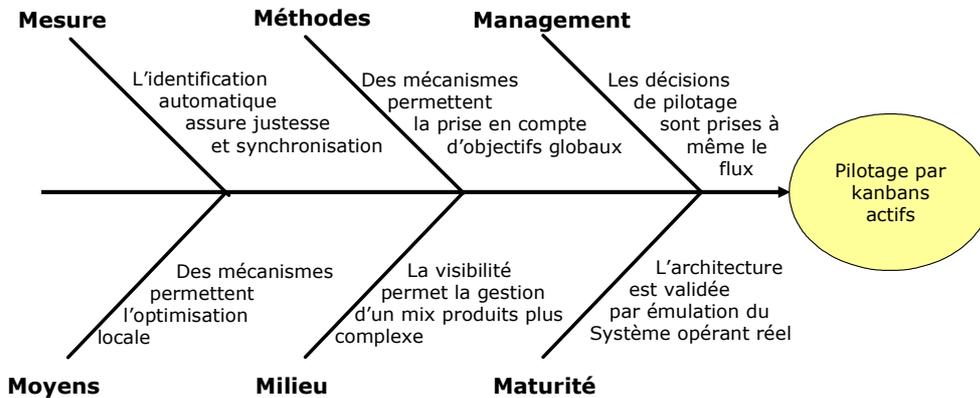


Figure 88. Réponses du kanban actif aux problématiques industrielles

L'implémentation des différents modèles, ainsi que la définition et la mise en œuvre d'une architecture d'évaluation basée sur l'émulation du système opérant ont permis de quantifier les apports de l'approche « kanbans actifs » par rapport aux approches de pilotage centralisé ou par kanbans traditionnels. L'expérimentation à travers un plan d'expériences a permis avec un nombre minimum d'expériences de mesurer l'impact de différents facteurs sur les performances du système de production et montré l'intérêt du kanban actif.

Le plan d'expériences réalisé a montré que le pilotage par ordonnancement prédictif favorisait la productivité par rapport aux performances logistiques comme le temps d'écoulement ou le niveau d'en-cours. Le kanban traditionnel montre quant à lui une bonne maîtrise des performances logistiques avec toutefois une dégradation de la productivité et de la production. Le kanban actif cumule les intérêts des deux approches et permet d'obtenir des performances supérieures, tant en termes de production et productivité que par rapport aux indicateurs logistiques.

1. Retour sur la problématique industrielle

L'analyse du système industriel de production menée au premier chapitre a fait émerger un ensemble de questionnements :

- Comment obtenir et exploiter une représentation juste de l'état du système de production en *temps réel* ?

- Les technologies d'identification automatique, de type RFID par exemple, présentent un moyen fiable de capter les événements significatifs sur le terrain. Nous proposons une architecture éprouvée permettant la collecte, le filtrage, le stockage et l'accès aux données de flux en temps réel. La mise en œuvre de vues en fonction des besoins de chaque entité décisionnelle permet de mettre à disposition les informations, opportunes et exactes, afin d'assurer la pertinence des décisions prises sur le terrain.
- Quelles **informations** permettraient d'améliorer la **pertinence des décisions** prises sur le terrain et leur **cohérence** par rapport aux objectifs ?
 - L'architecture proposée permet aux décideurs de terrain de disposer à la fois d'informations relatives à l'état du flux de produits en temps réel (contenu des différents stocks d'en-cours, avancement de chacun des ordres) ainsi que d'informations sur le pilotage global comme le degré d'urgence ou les dates de production cibles. De la sorte, les décisions sont prises en prenant en considération la situation réelle et les objectifs, de manière exhaustive, et non à partir d'une perception visuelle ou orale.
- Comment **optimiser la gestion des flux**, notamment comment maîtriser au mieux le niveau d'en-cours pour faire face à la complexification du mix-produits ?
 - Une plus grande visibilité sur le flux d'en-cours permet une gestion plus efficace. Par ailleurs, les mécanismes implémentés par le kanban actif permettent de modifier dynamiquement les priorités dans les files d'attente devant les ressources, afin de satisfaire une urgence ou de fluidifier l'écoulement des différents ordres, en accélérant par exemple des produits à cycle long en mesurant toutefois à priori la perturbation induite sur les ordres « dépassés ».
- En quoi l'« **activation** » **du produit** dans les processus décisionnels permettra-t-elle d'optimiser les performances ?
 - L'activation du produit, ou plus particulièrement dans notre cas du kanban, permet à celui-ci, en plus d'être un vecteur de synchronisation et de transmission d'informations, de déclencher des processus décisionnels et de suggérer des optimisations aux décideurs de terrain. Notamment les différents kanbans actifs d'une même file d'attente pourraient collaborer afin d'ajuster dynamiquement la séquence de priorités, afin de permettre le respect de la séquence d'emballage : la perturbation induite par la modification est mesurée et prise en compte à priori.
- Comment montrer la **pertinence** et la **maturité** d'une proposition d'architecture de pilotage ?
 - L'architecture d'évaluation présentée au chapitre 4 permet de mettre en œuvre différentes stratégies de pilotage sur un modèle d'émulation représentatif de l'atelier réel. La mise en œuvre sur cet émulateur du système de pilotage réel permet de valider cette représentativité. Les expérimentations montrent la pertinence de la structure proposée, tant vis-à-vis des problèmes d'exécution en temps réel que par rapport au facteur d'échelle. La démarche expérimentale présentée au chapitre 5 a permis de mettre en œuvre la stratégie de pilotage dans différentes situations représentatives de la réalité.

2. Retour sur la problématique scientifique

La proposition présentée dans ce mémoire répond également à la problématique scientifique posée dans le chapitre 2.

- Comment coupler la **réactivité** d'une **approche hétérarchique** et les capacités d'**optimisation globale** autorisées par une **approche centralisée prédictive** ?
 - Les principes de base du pilotage en kanban ont été conservées afin d'assurer la satisfaction du client final. Un séquençement prédictif permet de prioriser la réalisation des différents ordres par rapport au niveau de stock de produits finis et par rapport à la demande client. La gestion de l'ordonnancement par des tableaux FIFO permet la proposition d'un ordonnancement que des mécanismes (itératifs à l'heure actuelle) permettent d'améliorer. La vision globale apportée par les kanbans actifs permet de prendre en compte la dégradation des performances des autres ordres lors de la prise de décision d'accélération d'un ordre.
- Comment le **kanban actif** peut-il contribuer à l'**interopérabilité décisionnelle** entre un **système centralisé** et **entités décisionnelles distribuées** ?
 - Le kanban actif contribue à l'interopérabilité décisionnelle au sens où il est porteur d'informations, comme la séquence prévisionnelle d'emballage ou la date de disponibilité souhaitée, et la diffuse, permettant ainsi la prise en considération de la stratégie globale lors de reconsidération sur le terrain. Inversement, la remontée en temps réel d'informations permet le maintien à jour des dates de disponibilité prévisionnelles, ce qui permet un niveau d'information suffisant des fonctions de gestion pour informer le client.
- Comment démontrer la validité d'approches novatrices avant application industrielle ?
 - L'architecture utilisée pour valider l'approche proposée dans les chapitres 4 et 5 peut être transposée à d'autres systèmes industriels, par exemple pour constituer une base de benchmarking, ou pour permettre au groupe Parisot de disposer d'une bibliothèque de modèles de ses différents sites de production. Cette structure permet de mettre en œuvre tout système de pilotage sur tout modèle d'évaluation, et ainsi de réaliser des études comparatives des performances de différents modes de pilotage sur un même système de production, mais également de coupler des systèmes de pilotage dits « agiles » avec différentes typologies de systèmes de production afin d'évaluer et de quantifier cette agilité.

3. Perspectives

Cependant, le système de pilotage par kanban actif proposé n'est pas encore totalement abouti. Le kanban actif se caractérise d'une part par les informations portées par le kanban et d'autre part par les mécanismes de décisions mis en œuvre. Comme évoqué au chapitre 5, les résultats ont été mesurés pour un ensemble de paramètres donnés, établis de manière empirique à partir des éléments collectés sur le terrain. Si ces résultats permettent d'affirmer l'intérêt du kanban actif pour améliorer l'agilité du système de production, les résultats restent améliorables par une étude rigoureuse des informations à porter par le kanban

Conclusion

et des mécanismes décisionnels à déployer. Les règles d'optimisation implémentées sont simples, et basée sur des algorithmes de type itératifs. Une analyse plus complète des mécanismes d'optimisation possibles permettrait probablement d'améliorer encore les performances, notamment en implémentant des algorithmes de type méta heuristiques par exemple.

Enfin, la méthodologie de construction de l'architecture de validation est reproductible, elle pourrait donc dans le futur être utilisée au sein du groupe Parisot pour mettre en place un référentiel et une base de connaissances commune à l'ensemble des sites de production, permettant de réaliser des benchmarks mais également de réaliser des études a priori pour tout projet de modification des règles de pilotage.

Conclusion

Bibliographie

- (Artigues *et al*, 2005) Artigues C, Billaut J-C, Esswein C, 2005. *Maximization of solution flexibility for robust shop –floor scheduling*. European Journal of Operational Research, 165, pages 314-328.
- (Babiceanu *et al*, 2006) Babiceanu R, Chen F, 2006. *Development and applications of holonic manufacturing systems : a survey*. Journal of Intelligent Manufacturing,17, pages 111-131.
- (Baïna, 2006) Baïna S. *Intéropérabilité dirigée par les modèles : Une approche orientée produit pour l'intéropérabilité des systèmes d'entreprise*. Thèse de l'Université Henri Poincaré de Nancy 1, France, 2006.
- (Balasubramian *et al*, 2002) Balasubramanian J, Grossmann I, 2002. *A novel branch and bound algorithm for scheduling flowshop plants with uncertain processing time*. Computers and Chemical Engineering, 26(1), pages 41-57.
- (Balasubramian *et al*, 2003) Balasubramanian J, Grossmann I, 2003. *Scheduling optimization under uncertainty – an alternative approach*. Computers and Chemical Engineering, 27, pages 469-490.
- (Barkmeyer *et al*, 2007) Barkmeyer E, Kulvatunyou B, 2007. *An Ontology for the e-Kanban Business Process*. NISTIR 7404, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- (Berkley, 1996) Berkley B, 1996. *A simulation study of container size in two-cards kanban systems*. International Journal of Production Research 34(12), pages 3417-3445..
- (Bicheno *et al*, 2001) Bicheno J, Holweg M, Niessmann J, 2001. *Constraint batch sizing in a lean environment*. International Journal of Production Economics 73, pages 41-49.
- (Blanc, 2006) Blanc P. *Pilotage par approche holonique d'un système de production de vitres de sécurité feuilletées*. Thèse délivrée conjointement par l'école centrale de Nantes et l'université de Nantes, France, 6 décembre 2006.
- (Bongaerts *et al*, 1998) Bongaerts L., Monostori L., McFarlane D., Kadar B. *Hierarchy in distributed shop floor control*, IMS-EUROPE 1998, The first open Workshop of Esprit working group on IMS, Lausanne, 15-17 April 1998.
- (Bousbia, 2006) Bousbia S, 2006. *Proposition d'une architecture logique d'un système de pilotage hétéroarchique évolutif par apprentissage*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- (Brennan *et al*, 2005) Brennan R.W., Soundarajan K. *A hybrid environment for real-time distributed manufacturing control benchmarking*. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 1(3), 2005, pages 412–428.
- (Brusey *et al*, 2003) Brusey J., Floerkemeier C., Harrison M., Fletcher M. *Reasoning about Uncertainty in Location Identification with RFID*. International Joint Conference on Artificial intelligence, IJCAI 2003, Acapulco, Mexique.

- (**Bussmann et al, 2000**) Bussmann S., Schild K, 2000. *Self-organising manufacturing control : an industrial application of agent technology*. In Proceedings of th 4th international conference on multi-agent systems, boston, USA, pages 87–94.
- (**Cardin, 2007**) Cardin O, 2007. *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*. Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France.
- (**Chan, 2001**) Chan F, 2001. *Effect of kanban size on JIT manufacturing systems*. Journal of Materials Processing Technology 116, pages 146-160.
- (**Chow et al, 2006**) Chow H.K.H., Choy K.L., Lee W.B. *A dynamic logistics process knowledge-based system – An RFID multi-agent approach*. Knowledge-Base System, 2006.
- (**Crama, 2002**) Yves CRAMA. *Eléments de gestion de la production, Notes de cours de l'école d'Administration des Affaires*, Université de Liège, Année académique 2002-2003.
- (**Donald et al, 2002**) Donald E., Douglas C. *Planning, scheduling and control systems: why cannot they work together*. Computers and Chemical Engineering 26(2), pages 149-160.
- (**Duffie et al, 1986**) Duffie N, Piper R, 1986. *Non-Hierarchical control of manufacturing systems*. Journal of Manufacturing Systems 5(2), pages 137-139.
- (**El Haouzi et al, 2007**) El Haouzi H, Thomas A, Pétin J-F, 2007. *Contribution to reusability and modularity of manufacturing systems simulation models : application to distributed control simulation within DFT context*. International Journal of Production Economics.
- (**ENV, 1990**) ENV 40 003, *Computer Integrated Manufacturing – Systems Architecture – Framework for enterprise modelling*, CEN / CENELEC, 1990.
- (**Forget et al, 2007**) Forget P, D'amours S, Frayret J, 2007. *Multi-behavior agent model for planning in supply chains : an application to the lumber industry*. Robot and Computer Integrated Manufacturing, doi:10.1016/j.rcim.2007.09.004.
- (**Framinan et al, 2006**) Framinan J, Gonzalez P, Ruiz-Usano R, 2006. *Dynalmic card controlling in a Conwip system*. International Journal of Production Economics 99, pages 102-116.
- (**Fusaoka et al, 1983**) Fusaoka A, Seki H, Takahashi K, 1983. *A description and reasoning of plant controllers in temporal logic*. International Joint Conference on Articial Intelligence, pages 405-408.
- (**Geneste et al, 2003**) Geneste L, Grabot B, Letouzey A, 2003. *Scheduling uncertain orders in the customer-subcontractor context*. European Journal of Operational Research 147, pages 297-311.
- (**Goldratt et al, 1986**) Goldratt E.M., Cox J. *Le but*. Editions AFNOR Gestion, 1986.
- (**Giebels et al, 2001**) Giebels M, Kals H, Zjim W, 2001. *Building holarchies for concurrent manufacturing planning control in EtoPlan*. Computers in Industry, 46, pages 301-314, pages 133-141.
- (**Gouyon, 2004**) Gouyon D, 2004. *Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse*. Thèse de l'Université Henri Poincaré de Nancy 1, France, 2004
- (**Gunasekaran, 1999**) Gunasekaran A, 1999. *Agile manufacturing: A framework for research and development*. International Journal of Production Economics, 62, pages 87-105.

- (Gupta *et al*, 1997) Gupta S, Al-Turki A, 1997. *An algorithm to dynamically adjust the number of kanbans instochastics processing times and variable demand environment/*. Production Planning and Control 8, pages 133-141.
- (Husseini *et al*, 2006) Husseini M, O'Brien C, Hosseini S, 2006. *A method to enhance volume flexibility in JIT production control*. International Journal of Production Economics 104, pages 653-665.
- (ISA, 2000)(IEC/ISO 62264) ISA *The Instrumentation, Systems, and Automation Society. American National Standard, Enterprise-Control System Integration, Part 1: Models and Terminology*. ANSI/ISA-95.00.01-2000, 2000.
- (Iung, 2002) Iung B, *Contribution à l'Automatisation des Systèmes Intelligents de Production: Interopérabilité des Processus de Contrôle, Maintenance et Gestion Technique*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 17 décembre 2002.
- (Jennings *et al*, 1998) Jennings N, Wooldridge M, 1998. *Applications of Intelligent agents. Agent Technology : foundations, applications and markets*. Jennings N and Wooldridge M (Eds.) Springer, pages 3-28.
- (Joshi, 2000) Joshi Y. *Information visibility and its impact on supply chain dynamics*. Thèse du Massachussets Institute of Technology, Etats Unis, 2000.
- (Kanakamedala *et al*, 1994) Kanakamedala K, Reklaitis G, Venkatasubramanian V, 1994. *Reactive schedule modification in multipurpose batch chemical plants*. Industrial and Engineering Chemical Research, 30, pages 77-90.
- (Klein *et al*, 2008) Klein T, Thomas A, 2008. *An emulation-based execution control system evaluation tool, Application to a furniture manufacturing group*. INCOM06's Special Issue of The International Journal of Simulation & Process Modelling (IJSPM), soumission acceptée, à paraître en 2008.
- (Koestler, 1967) Koestler A. *The ghost in the machine*, Arkana Books, 1967.
- (Koren *et al*, 1999). Koren Y, Heisel U, Jovane F, Moriwaki T, Pritschow G, Ulsoy G, Van Brussel H, 1999. *Reconfigurable Manufacturing systems*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 48, Issue 2, Pages 527-540.
- (Kosanke, 1995) Kosanke, K. *CIMOSA – Overview and status*, Computer in Industry, 27, pages 101-109, 1995
- (Le Moigne, 1977) Le Moigne J-L, 1977. *La Théorie du système général*. Editions PUF.
- (Lee *et al*, 2004) Lee YM., Cheng F., Ying TL, 2004. *Exploring the impact of RFID on supply chain dynamics*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.
- (Lhote *et al*, 1999) Lhote F., Chazelet P., Dulmet M. *The extension of principles of cybernetics towards engineering and manufacturing*, Annual Reviews in Control, 23, pages 139-148, 1999
- (Marik *et al*, 2007) Marik V., Lazansky J. *Industrial applications of agent technologies*. Control Engineering Practice, Elsevier, 2007.
- (Marty, 1997) Marty C. *Le juste à temps : produire autrement*. Hermes, 1997.
- (Matta *et al*, 2005) Matta A, Dallery Y, Di Mascolo M, 2005. *Analysis of assembly systems controlled with kanbans*. European Journal of Operational Research 166, pages 310-336.

- (Mayer, 1995) Mayer F, 1995. *Contribution au génie productique : application à l'ingénierie pédagogique en Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain*. Thèse de l'Université Henri Poincaré de Nancy 1, France.
- (McClain et al, 1992) McClain J, Thomas LJ, Sox C, 2007. *On-the-fly" line balancing with very little WIP*. International Journal of Production Economics, Volume 27, Issue 3, October 1992, Pages 283-289.
- (McFarlane et al, 2003) McFarlane D., Sarma S., Chirn J. L., Wong C. Y., Ashton K *Auto id systems and intelligent manufacturing control*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16(4), pages 365–376, 2003.
- (Mekaouche, 2007) Mekaouche, L. *Pilotage holonique auto-organisé de réseaux logistiques : Validation par modélisation et simulation distribuée*. Thèse de l'université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 2007.
- (Monden, 1981) Monden Y, 1981. *Adaptable Kanban system helps Toyota maintain just-in-time production*. Industrial Engineering 13 (5), 29-46.
- (Mönch, 2007) Monch L. *Simulation-based benchmarking of production control schemes for complex manufacturing systems*. Control Engineering Practice, (2007).
- (Morel et al, 2003a) Morel G, Grabot B (Editeurs), 2003. Intelligent Manufacturing, Engineering Application of Artificial Intelligence, Vol. 16, Issue 4.
- (Morel et al, 2003b) Morel G, Panetto H, Zaremba M, Mayer F, 2003 *Manufacturing Enterprise control and management system engineering: paradigms and open issues*, Annual Reviews in Control 27.
- (Morel et al, 2007) Morel G., Valckenaers P., Faure J-M., Pereira CE., Diedrich C. *Manufacturing plant control challenges and issues*. Control Engineering and Practice 15, pages 1321-1331, 2007.
- (Nof et al, 2006) Nof S, Morel G, Monostori L, Molina A, Filip F, 2006. *From plant and logistic control to multi enterprises communication*. Annual Review in Control 30, pages 55-68 .
- (Norrie et al, 2002) Norrie DH., Ulieru M, 2002. *Special issue on Holons : Autonomous and cooperative agents for industry*. Journal of Integrated Computer-Aided Engineering 9/3.
- (Ohno et al, 1981) Ohno T, Kumagai T, 1981. *Toyota production system*. Dans Abdulhan, Tabucanon, (Eds.), *Decision Models for Industrial Systems Engineers and Managers*. Asian Institute of Technology, Pergamon Press, Bangkok, Elmsford, NY (chapitre 8). Japon.
- (Pannequin, 2007) Pannequin R. *Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures de pilotage par le produit*. Thèse de l'Université Henri Poincaré de Nancy 1, France, 2007.
- (Parlikad et al, 2007) Parlikad A., McFarlane, D, 2007. *RFID-based product information in end-of-life decision making*, Control Engineering Practice, doi:10.1016/j.conengprac.2006.08.008.
- (Plossl, 1985) Plossl GW. *Production and Inventory Control : Principles and Techniques (2nd Edition)*. Prentice Hall, 1985.
- (Plossl, 1993) Plossl GW. *La nouvelle donne de la gestion de production*. AFNOR Gestion.

- (Rees *et al*, 1987) Rees L, Philipoom P, Taylor W, Huang W, 1987. *Dynamically adjusting the number of kanbans in a Just-In-Time production system using estimated values of lead time*. IIE Transactions 19, pages 199-207.
- (Ruiz *et al*, 2001) Ruiz D, Canton J, Mara N, Espuna A, Puigjaner L, 2001. *On-line fault diagnosis system support for reactive scheduling in multipurpose batch chemical plant*. Computer and Chemical Engineering 25, pages 829-837.
- (Roslöf *et al*, 2001) Roslöf J, Harjunkosky I, Bjorkqvist J, Karlsson S, Westerlund T, 2001. *An MILP Based reordering algorithm for complex industrial scheduling and rescheduling*. Computer and Chemical Engineering 25, pages 821-828.
- (Sahin, 2004) Sahin E, 2004. *A Qualitative and quantitative analysis of the impact of the Auto ID technology on the performance of supply chains*. Thèse de l'école centrale de Paris, France.
- (Sénéchal, 2004) Sénéchal O, 2004. *Pilotage des systèmes de production vers la performance globale*, Habilitation à Diriger des Recherches de l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- (Sénéchal, 1996) Simon H, 1996. *The Sciences of the artificial*. MIT Press, third edition.
- (Shahabudeen *et al*, 2008) Shahabudeen P, Sivakumar G, 2008. *Algorithm for the design of single-stage adaptive kanban system*, Computers & Industrial Engineering 54, pages 800-820.
- (Shingo, 1988) Shingo, 1988. *Maitrise de la production et méthode kanban (Toyota)*, Editions Organisation.
- (Sousa *et al*, 1999) Sousa P, Ramos C, 1999. *A distributed architecture and negotiation protocol for scheduling in manufacturing systems*. Computer in Industry 38, pages 103-113.
- (Takahashi *et al*, 2004) Takahashi K, Morikawa K, Nakamura N, 2004. *Reactive JIT ordering system for changes in the mean and variance of demand*. International Journal of Production Economics 92, pages 181-196..
- (Tardif *et al*, 2001) Tardif V., Maaseidvaag L, 2001. *An adaptive approach to controlling kanban systems*. European Journal of Operational Research 132, pages 411-424.
- (Terzi, 2005) Terzi S. *Elements of Product Lifecycle Management: Definitions, Open Issues and Reference Models*. Thèse l'Université Henri Poincaré Nancy I en cotutelle avec le Politecnico di Milano (Italie), 27 mai 2005.
- (Thomas, 2003) Thomas A, 2003. Impact du concept de chaîne logistique dans le domaine aéronautique :
- (Thomas *et al*, 2005) Thomas A., Charpentier P, 2005. *Reducing simulation models for scheduling manufacturing facilities*. European Journal for Operational Research, 161, pages 111-125.
- (Thomas *et al*, 2008) Thomas A., Klein T., El Haouzi H., Belmoktar S. *Architecture de systèmes contrôlés par le produit pour un environnement en juste à temps*. MOSIM 08, Paris, France.
- (Trentesaux, 2007) Trentesaux, 2007. *Les systèmes de pilotage hétérarchiques : innovations réelles ou modèles stériles ?* Journal Européen des Systèmes Automatisés, 41(9), pages 1165-1202.

- (Valckenaers *et al*, 1997) Valckenaers P., Van Brussel H., Bongaerts L., Wyns J. *Holonic manufacturing systems*. Integrated Computers Aided Engineering 4, pages 191-201, 1997.
- (Valckenaers *et al*, 2006a) Valckenaers P., Verstraete P., Van Brussel, H. *Emergent short-term forecasting through ant colony engineering in coordination and control systems*. Advanced Engineering Informatics, 20(3) pages 261–278, 2006.
- (Valckenaers *et al*, 2006b) Valckenaers P, Cavalieri S, Germain B, Verstraete P, Hadeli, Bandinelli R, Terzi S, Van Brussel H, 2006. *A benchmarking service for the manufacturing control research community*. Journal of Intelligent Manufacturing, 17(6), pages 667-679.
- (Van Brussel *et al.*, 1998) Van Brussel H., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters, P. *Reference architecture for holonic manufacturing systems: Prosa*. Computers in Industry, 37(3) pages 255–274, 1998.
- (Vollmann *et al*, 1992) Vollmann TE., Berry WL., Whybark DC, 1992. *Manufacturing Planning and Systems Control* (Quatrième édition). McGraw-Hill.
- (Von Bertalanffy, 1973) Von Bertalanffy, 1973. *Théorie générale des systèmes*. Edition Dunod, ISBN 2-04-007504-6.
- (Vyatkin, 2005) Vyatkin, V., Christensen J., Lastra, J, 2005. *OOONEIDA: an open, object-oriented knowledge economy for intelligent industrial automation*. IEEE Transactions on Industrial Informatics (1), pages 4-17.
- (Yimer *et al*, 2007) Yimer A, Demirli K, 2007. *Fuzzy scheduling of job orders in a two stage flowshop with batch processing machines*. International Journal of Approximate Reasoning, doi:10.1016/j.ijar.2007.08.013.

Publications relatives à nos travaux

Articles dans des revues internationales

Klein Thomas, Thomas André. *An emulation-based execution control system evaluation tool, Application to a furniture manufacturing group*. INCOM06's Special Issue of The International Journal of Simulation & Process Modelling (IJSPM), soumission acceptée, à paraître en 2008.

Klein Thomas, Thomas André. *Opportunities to reconsider decision making processes due to Auto-ID*. IESM'07 Special Issue of the International Journal of Production Economics (IJPE) soumission acceptée, à paraître en 2008-2009.

Contribution à un ouvrage

P. Castagna, A. Thomas, P. Blanc, O. Cardin, H. El Haouzi, **T. Klein** et R. Pannequin *Simulation for Supply Chain Management*, Chap. *Simulation for Product Driven Systems*, Wiley Science Publications, 2008. Editeurs: G. Bel, A. Thomas et C. Thierry 2008. ISBN 978-1-8482-1090-5.

P. Castagna, A. Thomas, P. Blanc, O. Cardin, H. El Haouzi, **T. Klein** et R. Pannequin *Simulation pour la gestion des chaines logistiques* chap. *La simulation pour les systèmes pilotés par le produit*, Hermes Science Publications, 2008. Editeurs: G. Bel, A. Thomas et C. Thierry. ISBN 978-2-7462-1843-7.

Communications avec comité de lectures et avec actes

Pétin Jean-Francois, **Klein Thomas**, Morel Gérard. *Function Block model for dynamic reconfiguration of Discrete Event Systems*. 17th World Congress Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation (IMACS'05). Paris, France - 11-15 juillet 2005.

Klein Thomas, Thomas André. *Développement d'un modèle de simulation pour l'évaluation des systèmes de pilotage distribués*. 6ème conférence francophone de MODélisation et SIMulation : Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et opportunités (MOSIM'06). Rabat, 3-5 avril 2006.

Klein Thomas, Thomas André. *Distributed supply chain control system simulation, application to a furniture manufacturer*. International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS'06). Lyon, France, 15-17 mai 2006.

Klein Thomas, Thomas André. *A simulation testbed for decision system evaluation in a furniture manufacturing group*. 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing : Information Control : a complex challenge for the 21st Century (INCOM'06). Saint-Etienne, France, 17-19 mai 2006.

Klein Thomas, Thomas André. *Opportunities to reconsider decision making processes due to Auto-ID. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'07). Pékin, Chine, 30 mai-2 juin 2007.*

Klein Thomas, Thomas André, Morel Gérard, El Haouzi Hind. *A simulation-based decision support system : The example of a furniture manufacturer. IFAC World Congress. Séoul, Corée, 3-8 juillet 2008.*

Communications sans comité de lectures

Klein Thomas. *Implantation des nouvelles technologies d'identification des produits : application à la traçabilité et aux processus de décision centralisés/distribués dans une entreprise d'ameublement. Journées du GDR MACS, Pôle STP. Clermont Ferrand, 31 mars - 1er avril 2005.*

Klein Thomas. *Impact de la technologie RFID sur le pilotage des flux - Parisot Meubles. Forum application sur le thème "Traçabilité, Authentification, Visibilité - Développement de produits nouveaux" avec identification RFID. CRITT Bois, CRITT TTI. Epinal, 9 décembre 2005.*

Klein Thomas, André Thomas. *Opportunities to reconsider decision making processes due to Auto-ID. ICT for Supply Chains and Product Lifecycle Management. A Research Agenda for French-US Collaboration. Washington, USA, 10-11 novembre 2006.*

Rémi Pannequin, **Thomas Klein**, Hind El Haouzi, André Thomas. *De l'usage de la modélisation et de la simulation pour l'étude et la conception de systèmes contrôlés par le produit. Journées GDR MACS, Valenciennes 16-17 novembre 2006.*

Thomas Klein, Fabien Petitjean, Alexandre Villeminot, Emmanuel Muhl, Rémi Pannequin, Hind El Haouzi, Patrick Charpentier, André Thomas. *De l'usage de la modélisation et de la simulation pour le pilotage de flux de produits. Journée d'étude GDR MACS - GT Vendôme-OGP. Paris, 7 décembre 2006.*

Webographie

<http://www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS/punbb/upload/>

Forum du Groupe de Recherche GDR MACS.

<http://www.ims-noe.org>

Site Web du réseau d'excellence Intelligent Manufacturing System.

<http://www.wbf.org>

The forum for automation and manufacturing professionals

Site d'échange d'informations et de connaissances visant à exercer une influence positive sur l'industrie, hébergeant notamment les spécifications de B2MML.

<http://www.mesportal.org>

<http://www.pabadis-promise.org/>

<http://www.mega.com>

MES et RFID :

<http://rockwellautomation.com>

<https://www.swe.siemens.com>

e-Kanban :

<http://www.inova-group.com>

Glossaire

APS	Advanced Planning System - Système de planification avancée
Chant	Face la plus étroite d'une pièce.
DAP	Unité d'assemblage et d'ensachage des sachets de quincaillerie
ERP	Enterprise Resources Planning - Progiciel de gestion intégré
Lot de pièces	Ensemble des pièces correspondant à un OF pièce. Un lot de pièces représente généralement plusieurs ponts.
MES	Manufacturing Execution System - Système d'exécution de la production
MPCS	Manufacturing Planning and Control System
MRP	Materials Requirements Planning - planification des besoins en composants
MRP2	Manufacturing Resources Planning - planification des capacités de production
Panneau martyr	Désigne un panneau de particules de dimensions standard (1200*800*28 mm), utilisé comme palette dans les unités de production.
PDP	Plan Directeur de production
PIC	Plan Industriel et Commercial
PMK	C'est l'unité destinée à la fabrication de gros volumes de meubles peu complexes.
Pont de pièces	Ensemble d'un panneau martyr et des pièces d'une même référence qui y sont empilées.
UAP	Unité autonome de production.
UDC	(Unité de Distribution Clients), unité en charge du stockage et de l'expédition des colis.
UGV	Usinage Grande Vitesse. C'est l'unité autonome de production qui est la cible de notre travail,
UOR	(Unité d'ornementation) : Unité de réalisation de moulures en MDF (Medium Density Fiberboard).
UPFA	Unité de fabrication des pièces en formes.
UVA	Unité à Valeur ajoutée. C'est l'unité destinée à la fabrication de faibles volumes de meubles à forte valeur ajoutée.