

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU MODÈLE DE PLANIFICATION DE LA
PRODUCTION EN AÉRONAUTIQUE

NICOLAS RENAUD
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUE ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

Août 2006

© Nicolas Renaud, 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-19327-3

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-19327-3

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU MODÈLE DE PLANIFICATION DE LA
PRODUCTION EN AÉRONAUTIQUE

présenté par : RENAUD Nicolas

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. PELLERIN Robert, ing., Ph.D., président

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, membre et directeur de recherche

M. ALSÈNE Éric, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. FORTIN Clément, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Merci à Pierre Baptiste qui n'a pas compté son temps pour m'orienter tout au long de ce projet. Merci aussi à Laurent Cabos pour avoir été un guide et un générateur d'idée essentiel à la réalisation de ce mémoire. Ce travail n'aurait pas non plus été possible sans les conseils et l'ouverture d'Éric Alsène, Nikolas Malo et l'ensemble des employés de l'entreprise qui ont eu la gentillesse d'accepter nos entrevues.

Finalement, un merci tout particulier à Christine Colin pour son soutien, ses encouragements et sa patience.

RÉSUMÉ

Ce mémoire porte sur l'étude de certaines difficultés de planification de production rencontrées par des entreprises devant intégrer la fabrication de pièces expérimentales et standards tout en tentant d'optimiser leurs cellules manufacturières pour en tirer un rendement maximum. Ceci étant particulièrement le cas des entreprises aéronautique, ce travail s'y limitera.

Dans le but de dégager des pistes de solutions viables, ce mémoire présente une des premières études sur la possibilité d'utiliser un modèle agrégé pour contrôler la mise en production de pièces très diverses tout en lissant la charge de façon à ne pas dépasser la capacité de production disponible. Notre hypothèse est donc que ce modèle facilitera la production tout en optimisant l'utilisation des ressources éliminant ainsi l'occurrence de retard pouvant amener le non respect des dates de livraison.

Pour pouvoir nous concentrer sur cette hypothèse, nous supposons que la matière première est toujours disponible à temps et en quantité suffisante pour répondre à la demande. De plus, l'achat de nouveaux équipements ne sera pas envisagé puisque nous voulons étudier la possibilité d'optimiser les ressources actuellement disponibles.

Pour permettre la formulation d'un modèle agrégé, l'industrie aéronautique en général et une entreprise en particulier ont été analysées.

La revue de littérature a permis d'établir les forces et faiblesses des systèmes de production en *flux poussés* (FP) et en *flux tirés* (FT). Ceci a permis d'établir que les systèmes en FT sont plus robustes que les systèmes en FP car il est plus facile de contrôler l'encours et de mesurer le flux que de mesurer l'encours et de contrôler le flux. C'est dire qu'une gestion en FT permet un meilleur contrôle sur l'inventaire. Néanmoins, dans le cas étudié, il est impossible de considérer une gestion en FT

classique utilisant un système kanban ou *Constant Work In Process* (CONWIP) pour gérer l'ensemble des demandes de production. En effet, le faible volume de production généré par l'industrie aéronautique doit supporter une forte mixité se traduisant par de très grandes variations dans les temps de production et d'attente tout en devant répondre à une demande très forte pour certaines pièces et faible pour d'autres. Même si l'on exclut les pièces expérimentales qui sont, de par leur nature, incompatibles avec une production par kanban ou par CONWIP, le recours à une de ces méthodes pour l'ensemble des pièces standards est exclus car elles génèreraient des inventaires intermédiaires incompatibles avec les pièces à très forte valeur ajoutée propres à l'aéronautique.

Pour palier à ces incompatibilités tout en profitant des avantages des systèmes en FT, nous avons développé une nouvelle technique de FT qui vient s'intégrer à un système hybride *flux poussés/flux tirés* gérant l'ensemble des demandes. Le nouveau système en FT proposés se base sur le système CONWIP, mais n'utilise pas d'inventaire intermédiaire entre les centres de travail et se limite aux pièces à fort volume de production.

Le modèle hybride développé, intègre une représentation graphique sous forme de roue qui représente la séquence de mise en production des pièces. Les quantités de pièces à produire durant une campagne ne sont déterminées que peu de temps avant son début. Pour représenter la capacité, la roue est limitée par un nombre de pièces maximales (toutes pièces confondues) pouvant être mises en production. Les pièces expérimentales sont mises en production de façon systématique selon des réservations de capacité effectuées au préalable alors que les pièces à faible volume le sont en fonction de la demande de façon à ne pas générer d'inventaire. Une fois les quantités de pièces expérimentales et à faible volume fixées, on détermine le nombre de pièces à fort volume pouvant être fabriquées sans dépasser la quantité totale maximale inscrite dans la roue. Par la suite, les quantités de chacune des pièces à fort volume sont décidées

grâce au nouveau système CONWIP-pièce de façon à maximiser le ratio encours_pièce_X sur $\text{encours_maximum_autorisé_pièce_X}$. Comme ces pièces sont considérées comme de l'encours tant qu'elles ne sont pas consommées par la demande, leur mise en production est indirectement contrôlée par la demande et permet de contrôler les inventaires tout en nivelant la charge de production. De plus, cette méthode permet de fournir une flexibilité extrême à la fabrication de pièces expérimentales puisque des échanges de dernière minute entre pièces expérimentales et pièces à fort volume sont possibles.

Une simulation de cette nouvelle méthode se basant sur des données réelles a été effectuée pour une cellule de l'entreprise étudiée. Elle a permis d'établir que le modèle développé est valide et qu'il permet d'unir des demandes prévisionnelles pour la production de pièces expérimentales à des demandes fermes pour les pièces de production régulière.

Ce nouveau modèle est donc prêt pour une implantation expérimentale sur le terrain. Il réalise une avancée dans les systèmes de planification de la production existants car il est le premier à intégrer un mécanisme de réservation de capacité manufacturière à des fins de recherche et développement. Il permet aussi de traiter différemment les pièces en fonction de leur volume de production pour planifier en *flux poussés* les pièces à faible volume, éliminant ainsi les inventaires, et en *flux tirés* les pièces à fort volume, permettant l'apparition d'inventaire stratégique pour optimiser la capacité de production disponible.

ABSTRACT

This project studies some production planning problems encountered by companies that integrate production of experimental and standard parts while trying to optimise their manufacturing cells in order to reach the best efficiency. This is especially the case of aeronautic industry, the topic of this study.

In order to generate viable solutions, this dissertation presents one of the first studies about the viability of using an aggregated model to plan the production of different parts while levelling the load in order not to exceed available capacity. Our hypothesis is that this model will facilitate production while optimizing the use of resources, thus eliminating the occurrence of delay which can result in non-meeting of delivery dates.

To test this hypothesis, we will assume that raw material is always available on time and in sufficient quantity to fulfill demand. Moreover, the purchase of new equipment will not be considered since we want to study the possibility of optimising currently available resources.

To explore this aggregated model, one aeronautic company in particular has been analysed.

Current literature review pretty well the pros and cons of push and pull production systems. This literature review made it possible to establish that pull systems are more robust than push systems because it is easier to control work in process (WIP) and measure throughput than measuring WIP and controlling throughput. Pull systems allow a better control of inventories. Nevertheless, in this case study, it is impossible to consider a pure pull system using kanban or Constant Work In Process (CONWIP) to manage all production requests. Indeed, the low volume of production generated by the aeronautic industry must support a high production mix resulting in great variations in

lead times while having to support very high demand for some parts and very low for others. Even if we exclude experimental parts which are, by their nature, incompatible with a production by kanban or CONWIP, the use of one of those methods for all standard parts is rejected because it would generate high process inventories, incompatible with high value added parts suitable to aeronautics.

To overcome this incompatibility while benefiting from the advantages of pull systems, we developed a new pull technique which is to be integrated into a hybrid push/pull system dealing with all demands. The proposed pull system is based on CONWIP, but does not use any intermediate inventory between work centers and is dedicated to parts with high production output.

The developed hybrid model, integrates a graphical wheel representation to illustrate the sequence of production of parts on the shop floor. The quantities of parts to be produced during a production run are established just before the start. To represent the capacity, the wheel is limited by a maximum number of parts (all parts together) to be put in production during a given period. The experimental parts are systematically issued according to capacity reservation made in advance by R&D engineers whereas the parts with low volume are planned according to the demand in order not to generate inventory. Once the quantities of experimental and low volume parts are assigned, the number of high volume parts to be manufactured is determined in order not to exceed the maximum number of parts allowed. Thereafter, the quantities of each part produced in high volume are decided using a new CONWIP-part system in order to maximize the ratio of the *number of part X in WIP* on the *maximum number of part X allowed in WIP*. Since parts are considered WIP as long as they are not consumed by demand, their production is indirectly controlled by demand and makes it possible to control inventories levels while levelling the load on manufacturing cells. Moreover, this method makes it possible to provide extreme flexibility for manufacturing experimental

parts since last minute changes between experimental parts and high volume ones are possible.

A simulation of this new method based on actual data was carried out for a manufacturing cell of the studied company. It made it possible to establish that the developed model is valid and allow the integration of provisional order for R&D purposes and firm order for regular production.

This model is ready for an experimental test in a factory. It provides an improvement in existing production planning methods because it is the first to integrate a capacity reservation mechanism for research and development purposes. It also treats parts differently according to their volume of production: to plan in “push” the parts with low volume, thus eliminating inventories, and in “pull” the parts with high volume, allowing the appearance of strategic inventories to optimize production capacity.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xvii
LISTE DES ANNEXES.....	xviii
AVANT-PROPOS.....	xix
CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	5
1.1 Contexte et analyse critique	5
1.1.1 Aménagement d'usine	6
1.1.2 Demandes	7
1.1.3 Planification de production	10
1.1.4 Suivi de la production.....	13
1.1.5 Recherche et développement.....	15
1.2 Problématique et méthodologie	17
CHAPITRE 2 : PARTICULARITÉS DE L'INDUSTRIE ET LEVIERS DE	
FLEXIBILITÉ.....	18
2.1 Inspections	19
2.2 Taille de lots.....	20
2.3 Personnel.....	20
2.4 Temps de mise en course	21
2.5 Gammes alternatives.....	22

2.6	Recours à la sous-traitance.....	23
2.7	Recours aux heures supplémentaires et à l'ajout de personnel	24
	CHAPITRE 3 : REVUE DE LITTÉRATURE.....	25
3.1	Planification en flux poussé.....	26
3.1.1	Étude Sommaire de Capacité (ÉSC).....	27
3.1.2	Planification à capacité finie	30
3.2	Planification en flux tirés.....	32
3.2.1	Kanban	33
3.2.2	Constant Work In Process (CONWIP).....	36
3.2.3	Autres méthodes.....	38
3.3	HYBRID « Push / Pull »	39
3.4	Conclusion de la revue de littérature	41
	CHAPITRE 4 : DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE	42
4.1	Pistes de solution	42
4.1.1	Pièces + gammes de fabrication comme base du modèle.....	43
4.1.2	Cellules de production comme base du modèle	43
4.1.3	Machines critiques comme base du modèle	45
4.1.4	ROUE EPEI comme base du modèle	46
4.2	Solution proposée.....	49
4.2.1	Fonctionnement du modèle	50
4.2.2	Variables du modèle.....	51
4.2.3	Pièces expérimentales – fabrication sur demande	52
4.2.4	Pièces à faible volume – fabrication sur demande.....	53
4.2.5	Pièces à fort volume – approche CONWIP-pièces.....	54
4.2.6	Mode opératoire	55
4.3	Cellules de service	56
4.3.1	Contexte	57
4.3.2	Solution proposée.....	58

CHAPITRE 5 : EXEMPLE D'UTILISATION ET	
VALIDATION DU MODÈLE	61
5.1 Description des paramètres simulés	61
5.2 Description du simulateur	64
5.3 Identification des W_v_{max} par simulation/optimisation.....	69
5.4 Résultats et Analyse – Sommaire des simulations.....	73
5.5 Résultats et Analyse – Meilleur scénario (W_v_{max} optimum)	76
5.6 Recherche d'une loi régissant W_v_{max}	79
5.7 Résultat final de la simulation.....	80
CHAPITRE 6 : DISCUSSION.....	81
6.1 Avancement des connaissances	81
6.2 Avantage pour la R&D	84
6.3 Autres avantages	85
6.4 Limites.....	88
6.5 Travail restant à accomplir.....	88
CONCLUSION.....	89
RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE.....	91
ANNEXES.....	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 - Indices du modèle proposé.....	51
Tableau 4.2 - Variables du modèle proposé.....	51
Tableau 4.3 - Constantes du modèle proposé.....	52
Tableau 4.4 - Détail du traitement des pièces expérimentales	52
Tableau 4.5 - Détail du traitement des pièces à faible volume	53
Tableau 4.6 - Détail du traitement des pièces à fort volume.....	54
Tableau 5.1 - Valeurs des paramètres simulés	62
Tableau 5.2 - Détails des pièces simulées	63
Tableau 5.3 - Quantité à mettre en production (Q_t)	65
Tableau 5.4 - Détails des variables stochastiques modélisées	68
Tableau 5.5 - Description des 4 optimisations effectuées.....	70
Tableau 5.6 - Détails des simulations retenues	72
Tableau 5.7 - Autres simulation analysées.....	72
Tableau 5.8 - Sommaire des simulations	73
Tableau 5.9 - Mise en production des pièces (Q_{vt}).....	77
Tableau 5.10 - Inventaire généré et valeur des ratios d'encours.....	78
Tableau 5.11 - Sommaire des inventaires	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Fluctuations créées par la sommation des demandes	9
Figure 1.2 - Vue global de fonctionnement théorique d'un système MRPII.....	12
Figure 1.3 - Situation actuelle : nivellement par report	14
Figure 3.1 - Schéma détaillé d'un système MRPII avec aperçu des techniques de contrôle de capacité (adaptation de Scott 1994 et Rossier 1991).....	26
Figure 3.2 - Système de gestion de la production par kanban pour des machines en séries (Bonvik et Gershwin 1996).....	33
Figure 3.3 - Système de gestion de la production par kanban pour des machines en parallèle (Takahashi et al. 2005)	34
Figure 3.4 - Système de gestion de la production par CONWIP pour des machines en séries (Bonvik et Gershwin 1996).....	36
Figure 3.5 - Système de gestion de la production par CONWIP pour des machines en parallèle (Takahashi et al. 2005)	37
Figure 3.6 - Exemple d'une ligne de production utilisant des FIFO au lieu des kanbans	38
Figure 4.1 - Nombre de pièces produites par cellules de production.....	44
Figure 4.2 - Nombre de pièces de type différent produites par cellule	45
Figure 4.3 - Description de la simulation d'une roue nouveau genre	48
Figure 4.4 - Utilisation des roues pour une cellule fonctionnant sur 5 jours	55
Figure 4.5 - Interactions cellules de service / production	57
Figure 4.6 - Exemple de roue pour cellule de service.....	59
Figure 5.1 - Description de la période simulée	63
Figure 5.2 - Séquence de mise en production - Roue simulée	67
Figure 5.3 - Description schématique de la simulation.....	71
Figure 5.4 - Prégression de l'optimisation #1	71
Figure 5.5 - Graphique Critère 1 vs Critère 2 pour simulation en FIFO.....	74
Figure 5.6 - Valeur des inventaires moyens et des probabilités de pénurie par simulation	75

Figure 5.7 - Tendence Inventaire Moyen vs LT	78
Figure 5.8 - Étude de la solution retenue	80
Figure 6.1 - Nivellement par anticipation pour les pièces à fort volume	84
Figure 6.2 - Intégration des demandes	87
Figure I.1 - Exemple d'une cellule de production en U (PEPS = FIFO)	101
Figure II.1 - Nomenclature de fabrication d'un Turbofan	104

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACA	Analyste de la Chaîne d'Approvisionnement
APS	Système avancé de gestion de la production (<i>Advanced Planning & Scheduling systems</i>)
CONWIP	Encours constant (<i>Constant Work In Process</i>)
CRP	Planification des besoins en capacité (<i>Capacity Requirements Planning</i>)
DMS	Calendrier journalier de production (<i>Daily Manufacturing Schedule</i>)
EDD	Date de fin au plus tard croissante (<i>Earliest Due Dates</i>)
ERP	Progiciel de gestion intégré (<i>Enterprise Resource Planning</i>)
ÉSC	Étude Sommaire de Capacité (<i>Rough Cut Capacity Planning - RCCP</i>)
FIFO	Premier entré premier servi (<i>First In First Out</i>)
FP	<i>Flux poussés (Push)</i>
FT	<i>Flux tirés (Pull)</i>
JAT	Juste à Temps (<i>Just In Time - JIT</i>)
LT	Temps de mise à disposition, incluant le temps de fabrication et le temps d'attente (<i>Lead Time</i>)
MNC	Méthode des Nomenclatures de Capacité (<i>Bill of labor approach</i>)
MNDC	Méthode des Nomenclatures Décalées de Capacité (<i>Resource profile approach</i>)
MRG	Méthode de Répartition Globale (<i>Capacity planning using overall factors</i>)
PBM	Planification des Besoins de Matières (<i>Materials Requirements Planning - MRP</i>)
PDP	Programme Directeur de Production (<i>Master Production Schedule - MPS</i>)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I – EXEMPLE DE CELLULE DE PRODUCTION	100
ANNEXE II – NOMENCLATURE TYPE.....	102
ANNEXE III – DÉTAILS DE CONSTRUCTION D’UN INTERVALLE EPEI	105

AVANT-PROPOS

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un partenariat Entreprise-Université, où nous¹ avons été invités à mener une étude visant à proposer à l'entreprise des pistes de solutions sur l'intégration de ses demandes de production. Laurent Cabos a travaillé avec le professeur Alsène sur l'aspect organisationnel alors que ce mémoire est le fruit du travail que j'ai réalisé avec le professeur Baptiste sur l'aspect technique.

¹ Pr. Éric Alsène, Pr. Pierre Baptiste, Laurent Cabos (candidat PhD) et moi-même Nicolas Renaud

INTRODUCTION

L'efficacité de la planification de la production industrielle est un défi constant notamment à cause du contexte changeant de l'offre et de la demande. En particulier, dans le domaine aéronautique de larges fluctuations de la demande sont survenues au cours des dernières années. En janvier 2002, l'industrie a plongé dans ce qui risquait d'être un long et pénible malaise résultant de la perte de confiance des voyageurs après le 11 septembre 2001. Pourtant, 2005 a été une année record pour les grands de l'industrie (Schofield 2006) et les prévisions pour 2006 sont excellentes (Morrison 2006). La reprise a été plus rapide et plus forte qu'anticipée et ce malgré une série d'événements ébranlant la confiance des voyageurs (SRAS, guerre en Iraq, attaques terroristes et prix du carburant).

Les larges fluctuations et les incertitudes qui y sont liées obligent l'industrie à mettre à jour ses stratégies de production. Les constructeurs et leurs sous-traitants doivent réviser leurs approches pour être en mesure de posséder la capacité manufacturière requise pour répondre à la demande. Néanmoins, le problème de la maturation des investissements est omni présent. Si les entreprises investissent leurs profits pour augmenter la capacité de production, ils n'en sentiront pas les bienfaits avant des années. D'ici là, la demande aura peut être chuté à nouveau.

Il est donc essentiel pour une entreprise de s'assurer de pouvoir utiliser ses infrastructures actuelles de production au maximum de leurs capacités avant de se lancer dans des projets d'investissements massifs. Depuis la formalisation des systèmes MRP (Olriky 1975), plusieurs auteurs ont proposé des pistes de solutions. Parmi ceux-ci, on retrouve Sugimori et al. (1977) avec le *juste à temps* issu du Toyota Production System ou encore Goldratt et Cox (1984) et leur *théorie des contraintes* et finalement la *cartographie de la chaîne de valeur* de Rother et Shook (1999). De nombreux autres

développements, touchant l'amélioration continue, ont aussi fait leur apparition (6 sigma, TPM, TQM) (Stevenson 2005).

Issues initialement du milieu manufacturier automobile, plusieurs de ces techniques ont été adaptées et sont devenues la norme en gestion de production. Le milieu aéronautique ne fait pas exception à la règle et plusieurs de ces méthodes y ont été implantées avec succès. Néanmoins, certains secteurs de l'industrie éprouvent une certaine difficulté à trouver dans les modèles existants celui qui répondrait parfaitement à leurs besoins particuliers. Un de ces secteurs est l'industrie des moteurs d'avion où le faible volume et la grande mixité des pièces à produire rendent complexe l'identification du modèle idéal.

En plus du problème de capacité de production, l'industrie aéronautique est menacée par la flambée des prix des combustibles fossiles et la diminution des réserves (The Economist, 2006). Une pression grandissante est donc mise sur les manufacturiers de moteurs pour qu'ils développent des produits beaucoup moins énergivores. Dans son rapport annuel de 2005, l'Association Internationale du Transport Aérien (IATA) déclare qu'une amélioration de 1% de la consommation de carburant résulterait en une économie de 4 milliard de \$US par année pour l'industrie (IATA 2005).

Il n'est donc pas étonnant que les constructeurs de moteurs investissent massivement en recherche et développement. Il n'est pas non plus étonnant que ces départements soient extrêmement valorisés dans les entreprises. Un des résultats de cette attitude est le traitement particulier des demandes de pièces à vocation expérimentale. Cette flexibilité accordée aux départements de recherche et de développement facilite le travail des employés de ces départements, mais complexifie grandement celui du personnel de production. La capacité étant limitée, il est en effet difficile de répondre aux besoins particuliers du secteur expérimental sans menacer la production des commandes régulières.

Pour répondre à ce problème, ce mémoire vise à faciliter le travail de planification de la production sans compromettre la flexibilité dont jouit le secteur expérimental, mais en s'assurant de tirer pleinement profit du potentiel manufacturier disponible. Pour ce faire, cette étude se basera sur le cas d'une usine appartenant à une entreprise multinationale fabriquant et concevant des turbines à gaz à vocation aéronautique.

Le premier chapitre présentera le contexte et la problématique entourant l'entreprise étudiée. Une analyse critique de la planification de la production sera effectuée. Les atouts de l'entreprise ainsi que les aspects à améliorer seront discutés. Parmi ces derniers, nous soulignerons les lacunes de l'évaluation de la capacité liée à la planification à capacité infinie et au recours à une gestion manuelle des priorités. Il sera aussi fait état des problèmes issus de la non-intégration entre les demandes expérimentales, de moteurs neufs et de pièces de rechange. Les impacts en production d'un département de recherche et développement fort seront discutés. Cela permettra d'identifier plus spécifiquement le sujet d'étude soit la révision du système de planification de la production. Pour clore ce chapitre, les objectifs visés seront formalisés.

Dans un deuxième chapitre, la description de certaines particularités de l'industrie mettra en évidence les exigences auxquelles l'entreprise doit répondre ainsi que ses implications en organisation de la production.

Pour tenter d'identifier des solutions viables à ce problème, une revue de la littérature sur les outils existants en gestion de production sera effectuée dans le troisième chapitre. Les systèmes à *flux poussés* (FP) seront étudiés en regard des études sommaires de capacité et en regard du concept plus moderne de capacité finie. Les systèmes à *flux tirés* (FT) seront pour leur part discutés en s'attardant aux principaux modèles, soit les systèmes kanban et *Constant Work in Process* (CONWIP). Finalement les avantages et

inconvenients des systèmes à FT et à FP seront discutés en présentant les différents modèles hybrides FT/FP existants.

Après avoir traité différentes pistes de solution, le quatrième chapitre présentera un modèle agrégé développé pour planifier la production. Ce modèle présente une structure hybride FT/FP permettant d'optimiser la capacité de production disponible en considérant 3 types de demandes de pièces (expérimentales, à faible volume et à fort volume de production). Finalement les cellules de services seront discutées et un modèle auxiliaire les concernant sera présenté.

Le cinquième chapitre présentera une simulation de l'application du modèle de planification de la production présenté au chapitre précédent à une cellule manufacturière de l'entreprise étudiée en utilisant la demande actuelle en pièces produites par cette cellule.

Finalement, avant la conclusion, une discussion sur les avantages du modèle et les avancées qu'il apporte sera présentée.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Dans le but d'étudier les problèmes de planification de production rencontrés dans l'industrie aéronautique, une entreprise a été identifiée et étudiée pour donner des bases concrètes à ce travail. Cette dernière est une multinationale employant plus de 10 000 personnes à l'échelle mondiale. Elle conçoit et fabrique des moteurs d'avions, d'hélicoptères et de sous-marins destinés aux marchés corporatifs, d'affaires, régionaux, militaires, etc. Elle offre également des services après-ventes : fabrication de pièces de rechange, opérations de maintenance, programmes de location, etc. Pour mettre les bases d'une solution réalisables, ce chapitre présentera une analyse critique du fonctionnement de l'entreprise en insistant sur les aspects ayant un lien avec le sujet d'étude et se terminera par la formalisation de la problématique et de la méthodologie qui sera utilisée.

1.1 Contexte et analyse critique

L'entreprise est en constante évolution. Après avoir vécu une dure période de déclin induit par les conditions du marché, elle renoue avec des commandes en forte hausse (Morrison 2006). Dans ces conditions, il est normal que l'entreprise ne fonctionne pas de façon totalement optimisée et que certains problèmes fassent surface. C'est pourquoi nous détaillons ici certaines préoccupations touchant le système de gestion de production en plus de souligner certains atouts de l'entreprise.

1.1.1 Aménagement d'usine

L'entreprise étudiée s'adapte aux attentes spécifiques de ses clients et fait, malgré sa taille, de l'« artisanat de luxe », voire de l'art pour certains employés². Au niveau de la fabrication, cela se traduit souvent par du « *one piece flow* ». Si l'on se réfère à la terminologie de Woodward (1965), l'entreprise serait répertoriée comme ayant une technologie de production à l'unité ou en petite série. Elle travaille donc beaucoup plus dans une logique de différenciation (nombre limité de concurrents), de « sur-mesure » et d'excellence vis-à-vis des clients plutôt que dans une logique de coûts de fabrication.

Pour ces raisons, on peut associer la production de l'entreprise étudiée à une production en petites séries, mais avec une grande variété de produits à très forte valeur ajoutée (*low volume, high mix*). De façon à satisfaire le plus adéquatement possible les exigences de volume et de mixité, de même que celles propres à l'industrie, l'usine étudiée utilise deux types d'aménagement. Elle est organisée en aménagement cellulaire pour les cellules de production propres à une pièce/assemblage de haut niveau et en atelier multigammes pour des opérations dites « de service » (cellules de service).

Cellules de production³

Une cellule de production est responsable de la production d'un type d'assemblage pour l'ensemble des produits de l'entreprise. À titre d'exemple, la cellule des arbres fabriquera les arbres pour tous les moteurs fabriqués. Une cellule regroupe la majorité des machines nécessaires à la fabrication de l'assemblage dont elle est responsable. Néanmoins, si des opérations requièrent une expertise particulière ou encore que la cellule n'utilise pas une machine suffisamment pour en justifier l'installation dans la cellule, les ressources correspondantes seront regroupées dans des cellules dites « de service ».

² La majorité des employés de production rencontrés voient les pièces sur lesquelles ils travaillent comme des bijoux.

³ Un exemple d'organisation physique d'une cellule de production est donné à l'Annexe I.

Cellules de service

De façon générale elles sont constituées d'une machine en plusieurs exemplaires. Ces unités manufacturières reçoivent des pièces des cellules de production, les traitent (selon une logique *First In First Out* (FIFO), puis les renvoient à l'expéditeur. À titre d'exemple, le traitement thermique, le lavage aux ultrasons, la soudure, la peinture ainsi que différents procédés d'inspection constituent des cellules de service. Ces cellules ne sont d'aucune façon gérées par le système *Enterprise Resource Planning* (ERP) et aucune planification impliquant du personnel administratif n'intervient.

En utilisant à la fois des cellules de production dédiées à un type de pièce et des ateliers multigammes dédiés à un processus, l'entreprise optimise ses machines et ses ouvriers tout en gardant un maximum de flexibilité dans le processus (Aquilano, Chase et Balakrishnan 2004). En effet, en travaillant spécifiquement sur un type de pièce ou sur un processus, il est possible de concevoir les processus de façon à minimiser le temps de mise en course. Cette pratique est tout à fait conforme aux principes du *Juste À Temps* (JAT) et s'inscrit parmi les 7 aspects clés du design d'un processus de production efficace (Stevenson 2005).

1.1.2 Demandes

La fabrication des composantes de moteurs répond à trois différents types de demandes : la fabrication de moteurs neufs, la fabrication de pièces ou de moteurs de rechange et la fabrication de prototypes à des fins expérimentales. Les exigences relatives à ces produits varient fortement :

1. Une demande de moteur neuf offre une visibilité⁴ à long terme et nécessite un long temps de mise à disposition (*Lead Time*, LT) avec une légère variabilité dépendamment du type de moteur.

⁴ Visibilité : délai (court, moyen, long) entre l'apparition d'une demande dans le système ERP et la date de livraison.

2. Une demande de pièces de rechange offre une visibilité à moyen terme issue de prévisions basées sur l'historique des ventes. Dans certain cas, cette visibilité est à très court terme dans le cas urgent où un avion est cloué au sol. Le LT pour ces pièces est généralement court, mais exceptionnellement long lorsqu'il s'agit d'un moteur complet.
3. Une demande expérimentale offre une visibilité mixte, mais généralement à court terme. Les designs ainsi que les quantités à produire sont directement liés à l'issue des tests ayant lieu avant la mise en production. Selon le type de pièce, le LT est plus ou moins long.

Il est à noter qu'il existe 2 types de pièces à vocation expérimentale⁵. Dans le cadre de cette étude, nous considérerons les prototypes comme des pièces « nouvelles » et donc différentes de la production régulière. Par contre, dans les faits, certaines pièces expérimentales sont des pièces de production régulière intégrées aux moteurs expérimentaux. Ces pièces sont donc assimilables à des demandes régulières et sont commandées de façon similaire. Pour cette raison, elles ne seront pas considérées ici comme expérimentales, mais plutôt comme assimilables à une demande classique pour une pièce de rechange ou pour un moteur.

Le problème de l'intégration de ces trois types de demandes dans la planification de la production est intrinsèque à leur visibilité et à leurs LT différents. Il est impossible de prioriser en permanence des types de requêtes, car elles sont toutes critiques au développement de l'entreprise :

1. Les demandes de nature expérimentale sont essentielles au développement de l'entreprise.
2. Les demandes issues des ventes de moteurs neufs sont essentielles, dans la mesure où elles sont la principale source de revenus de l'entreprise. De plus, il

⁵ Pièces commandées par le département de R&D.

est important de respecter les échéanciers de livraison, car cela constitue un aspect important de la satisfaction de la clientèle.

3. Les demandes de pièces de rechange sont tout aussi critiques, puisque la qualité du service après vente est capitale. Compte tenu du coût important d'un avion cloué au sol pour des raisons de maintenance, il est peu probable qu'un motoriste incapable de fournir des pièces de rechange de façon très rapide voit son carnet de commandes augmenter.

Le résultat du manque d'intégration des 3 types de demandes est une planification de la production un peu chaotique. Comme on peut le voir à la figure 1.1, l'absence d'une planification agrégée des demandes entraîne la mise en production non optimale des pièces. Étant donné qu'aucune intégration des demandes n'est faite, il est possible que des commandes soient livrées en retard, posant ainsi des problèmes de service à la clientèle.

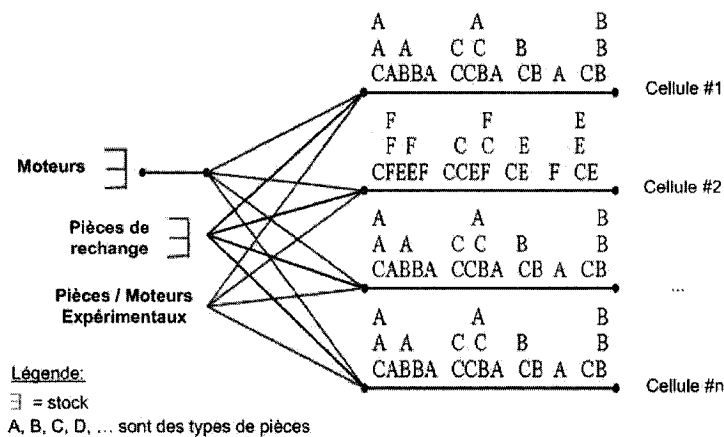


Figure 1.1 – Fluctuations créées par la sommation des demandes

Notons que dans le cas spécifique de l'entreprise étudié, un groupe de travail a été formé pour se pencher sur ce problème et a amené le département responsable de la commande des pièces de rechange à réduire le délai entre ses commandes, les faisant passer d'une

commande par mois à une ou deux commandes par semaine. Cela permet de regrouper les commandes de moteurs neufs et de pièces de rechange. On obtient ainsi un meilleur aperçu de la charge de production et il est possible de la planifier de façon commune afin d'optimiser le temps de mise en course nécessaire. Néanmoins, le problème des pièces expérimentables demeure.

1.1.3 Planification de production

La majeure partie du volume de production provient des ventes de moteurs. Pour planifier la fabrication des assemblages de haut niveau (environ 25 pour un moteur standard)⁶, l'entreprise a recours à un modèle de planification à capacité infinie utilisant le schéma classique *Programme Directeur de Production - Planification des Besoins Matières* (PDP-PBM, MPS-MRP II) accompagné d'une Étude Sommaire de Capacité (ÉSC) faite séparément et utilisant les nomenclatures décalées de capacité.

De façon détaillée, la PBM utilise le PDP des assemblages de haut niveau. Cela permet d'établir les quantités et les dates de mise en production des pièces. La PBM suppose que la capacité est suffisante pour produire les composantes nécessaires puisqu'elle a été grossièrement validée au niveau du PDP par une Étude Sommaire de Capacité. Si aucun stock n'est disponible, la date de mise en production, est alors la date de livraison au client interne (assemblage) moins le temps de mise à disposition (LT). C'est aussi ce système qui transmet les ordres de commande aux acheteurs pour que ceux-ci s'assurent de la disponibilité de la matière première⁷.

Malheureusement, ce système ne représente pas un système convenable pour traiter la production car le Programme Directeur de Production (PDP) surévalue la capacité réellement disponible. En effet, le PDP ne tient compte que de la capacité des lignes d'assemblage. La charge induite sur les cellules alimentant cette ligne est alors soit

⁶ Une nomenclature type est donnée à l'Annexe II

⁷ Tout au long de ce mémoire, nous supposons que la matière première est disponible à temps et en quantité suffisante. Cet aspect de la planification de la production sera donc négligé.

surchargées, soit non lissée. Ceci peut s'observer par la mise en production des pièces. Normalement, les ACA (les Analystes de la Chaîne d'Approvisionnement sont responsables de la mise en production des pièces dans les cellules) devraient respecter le rapport journalier de production (Daily Manufacturing Schedule, DMS) produit par la PBM (voir figure 1.2). Pourtant, dans les faits, ils procèdent à de nombreux ajustements.

Les ajustements relatifs à la production des pièces de rechange et des pièces provenant des ventes de moteurs se limitent aux dates de production et aux tailles de lots. Par contre, pour les pièces expérimentales, l'ACA joue un rôle beaucoup plus important. C'est lui que les ingénieurs de développement contacteront pour « négocier » la production de leurs pièces. Ce processus informel est très fréquent. L'ingénieur responsable de la production d'une pièce expérimentale téléphonera à l'ACA pour lui demander s'il a la capacité de produire ses pièces. Compte tenu de l'urgence et de la charge de la cellule, les pièces seront mises en production plus ou moins rapidement. Il est à noter que la production de ces pièces expérimentales n'étant pas planifiée, elle peut avoir un effet perturbateur sur les autres pièces en production dans la cellule.

Malgré les ajustements fait par l'ACA, la DMS commande l'émission de plus de pièces que ce que le plancher de production peut vraiment accomplir. Cela entraîne l'augmentation du stock d'encours et de matières premières car le nombre de pièces mises en production est plus grand que le nombre de pièces complétées et expédiées. Du même coup, les files d'attente augmentent dans l'usine. Les pièces doivent ainsi attendre plus longtemps pour être traitées ce qui entraîne l'augmentation des temps de mise à disposition et des retards sur l'échéancier de production. La solution à ces problèmes réside classiquement dans la validation du plan de production avec la capacité, ce qui est fait à l'aide d'une Étude Sommaire de Capacité (ÉSC) comme on peut le constater à la figure 1.2.

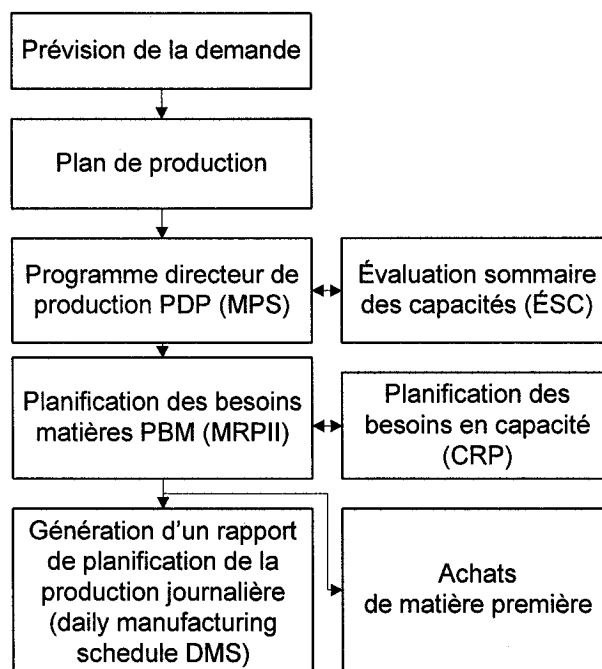


Figure 1.2 - Vue global de fonctionnement théorique d'un système MRPII⁸

Pourtant, les problèmes persistent bien que l'entreprise étudiée effectue bien une ÉSC. La technique utilisée estime la capacité disponible par semaine et la compare à la charge projetée issue des demandes provenant des ventes et des pièces de rechange. Malheureusement, et c'est pourquoi la méthode est inefficace, cette étude de capacité ne tient pas compte des demandes de pièces expérimentales et des arriérés de production. Ces omissions, de même que des impondérables, dont le besoin de retravailler des pièces pour des raisons de qualité, viennent sérieusement compromettre la crédibilité des résultats de l'évaluation sommaire des capacités.

Au niveau de la planification des besoins matières (PBM), la planification des besoins en capacité (CRP) n'est pas non plus appropriée car elle ne se base que sur des données théoriques. La seule donnée concrète donnant une rétroaction de la production dans le système est le volume de stock. Hors, ceci est largement insuffisant. La CRP calcule de façon très détaillée la charge que chaque machine doit supporter. Si ce calcul se base sur

⁸ Tiré de Stevenson (2005) p.592

des données erronées, c'est l'ensemble du processus de validation de la capacité qui est compromis. Pour être valide, cette étude de capacité aurait besoin d'un ensemble de données qui sont impossibles à fournir actuellement. Il faudrait connaître le temps exact de fabrication des pièces expérimentales ainsi que leur date de fabrication. Il faudrait aussi anticiper les rebus et les besoins de reprise (*rework*) de pièces. Finalement, il faudrait que les FIFO soient respectées (pas de modification de l'ordre des chariots). Une telle quantité d'information est non seulement difficile à amasser, mais engendrerait un système bien trop complexe pour qu'il s'avère efficace.

Dans une période où le taux d'utilisation des différents équipements est très élevé, la production est dans les faits gérée par une planification humaine et non pas par des rapports. Le système actuel travaillant en capacité infinie n'est tout simplement pas valable.

1.1.4 Suivi de la production

Un des résultats de la planification à capacité infinie est de planifier les différentes mises en production par un mode de jalonnement aval. Lorsque la capacité est insuffisante, la production doit être reportée à la semaine suivante ce qui, comme illustré à la figure 1.3, provoque un effet domino. Cela ne fait donc que compromettre d'avantage le système de planification puisque la capacité réellement disponible est alors nettement inférieure à la capacité anticipé lors de la planification. De plus la présence d'arriérés de production provoque une insatisfaction de la clientèle.

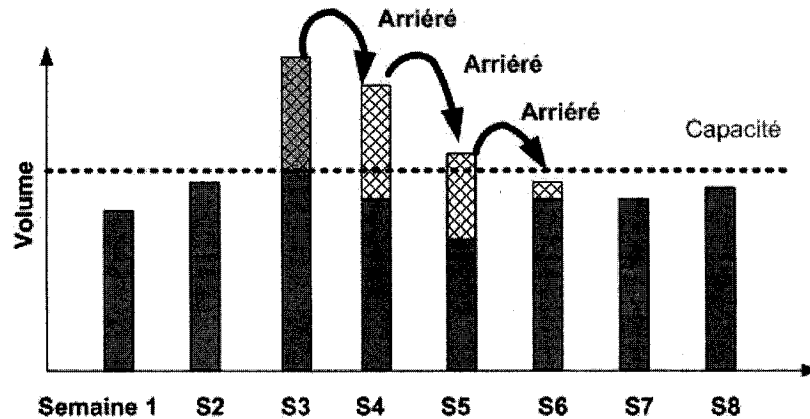


Figure 1.3 - Situation actuelle : nivellement par report

En plus des différents problèmes précédemment décrits dans ce chapitre, plusieurs facteurs expliquent ces arriérés de production. En voici les principaux :

- Une augmentation de la demande de l'ordre de 40% durant les 2 dernières années.
- Un rapport de force à l'avantage des clients. Ces derniers disposent d'un délai plus court pour annuler ou modifier une commande (6 mois contre 1 an auparavant).
- Une pression des clients poussant l'entreprise à minimiser ses coûts. Ceci pousse à une meilleure planification de la production car il n'est plus acceptable de simplement augmenter la capacité pour mieux répondre à la demande. En effet, les machines utilisées sont extrêmement dispendieuses et il est impossible de connaître la tendance de la demande à moyen terme. Il est donc préférable de profiter plus efficacement des capacités actuelles de production avant de s'étendre et d'acheter de nouvelles machines.

Pour minimiser les inconvénients liés à la planification à capacité infinie, un groupe de « vieux sages » est chargé de faire le suivi des commandes et d'établir les priorités dans le traitement des pièces en retard. Ce « groupe de pénurie » (*shortage group*) se réunit plusieurs fois par semaine. Des représentants des divers départements de l'entreprise

(marketing, recherche et développement, approvisionnement, etc.) participent à ces rencontres. C'est durant ces réunions que la décision de favoriser un client au détriment d'un autre est prise si la capacité de production l'exige.

Une fois ces priorités de haut niveau décidées, une supervision hiérarchique directe prend le relais pour assurer le bon fonctionnement de l'usine. Cette tâche est effectuée par l'ACA en partenariat avec le superviseur de la cellule qui a le mandat de gérer le personnel ouvrier. De façon quotidienne, l'ACA et le superviseur⁹ participent à une réunion de secteur où ils doivent faire état de l'avancement de leurs pièces. Ces réunions permettent de s'assurer que les priorités de l'entreprise sont bien respectées. Par exemple, si seulement quelques pièces retardent l'assemblage d'un moteur, les ACA responsables de ces pièces devront en accélérer la production. Dépendamment du niveau de priorités, l'ACA assurera un suivi plus ou moins étroit de la pièce. Dans les cas extrêmes, il suivra la pièce partout où elle passe (incluant les cellules de service) pour s'assurer qu'elle soit placée en avant dans les lignes de FIFO. Pour les pièces expérimentales, il n'est pas rare de voir cette tâche de suivi rapproché assurée par les ingénieurs de développement eux-mêmes.

1.1.5 Recherche et développement

Dans un domaine aussi compétitif que l'aéronautique, la capacité de générer des avancées technologiques est la clé non seulement du succès, mais aussi de la survie d'une entreprise (Bedard 2005). En plus de ces percées technologiques, l'entreprise doit être en mesure de satisfaire sa clientèle. De nos jours cette clientèle réclame des moteurs plus puissants, moins bruyants, moins polluants, mais surtout moins coûteux à acheter et à opérer (consommation de kérosène réduite).

⁹ Il y a un ACA et un superviseur par cellule. Dans certains cas les ACA/superviseurs sont responsables de plusieurs cellules.

Par contre, la fabrication des pièces expérimentales est plus longue et laborieuse que celle des pièces régulières. On estime que le temps de production d'une pièce expérimentale est 2.5 fois¹⁰ supérieur à celui d'une pièce de production comparable. Différents facteurs justifient cette marge. Tout d'abord, les pièces expérimentales sont généralement fabriquées à l'aide d'accessoires de fixation modulaires qui demandent beaucoup plus d'ajustements que les accessoires de fixation classiques utilisés pour la production régulière. Ensuite, des problèmes d'outillage sont extrêmement fréquents avec les pièces expérimentales. Finalement, il est très rare que des calibres existent pour ces pièces, ce qui implique qu'elles doivent passer beaucoup plus de temps en inspection, ce qui rend leur LT difficile à estimer.

La planification de la production des pièces expérimentales est d'autant plus complexe que même si elles sont entrées dans le système ERP, il est impossible de les fabriquer tant que leurs designs et leurs gammes de fabrication ne sont pas finalisés, ce qui rajoute de l'incertitude sur les dates de mise en production. De plus, les quantités à produire peuvent changer à la dernière minute selon le résultat de tests.

Il est clair que ce dernier point est particulièrement problématique. L'ajout de commande de dernière minute et portant une priorité « pour hier » introduit de fortes perturbations en production. Toute planification de la production est littéralement anéantie par de telles commandes imprévues. Ceci est d'autant plus problématique que les priorités sont gérées de façon manuelle, ce qui peut laisser penser à du favoritisme sur des bases personnelles. Cette instabilité au niveau du PDP rend impossible une étude de capacité conventionnelle. Ces changements de dernière minute ne sont pas planifiés car ils devraient être exceptionnels. Pourtant, dans les faits, ils surviennent. Il est donc essentiel de tenir compte de ces fluctuations dans un système de planification de la production « nouveau genre ».

¹⁰ Cette valeur a été obtenue suite à diverses entrevues avec du personnel de production ainsi que des ingénieurs de procédé et de développement. Elle a aussi été validée par des observations sur le plancher de production de l'usine étudiée.

1.2 Problématique et méthodologie

Le modèle de planification de la production en vigueur présente des lacunes et doit être revu. En effet, comme on l'a vu, l'entreprise accepte présentement toutes les demandes qui lui sont faites et adopte une logique de « pompier » pour gérer les priorités de fabrication. Cela engendre des retards et des arriérés de production.

De façon à proposer une solution viable, nous considérerons un horizon de planification de 20 semaines de façon à valider deux hypothèses fondamentales :

1. Il est possible d'utiliser un outil de capacité agrégée pour gérer des demandes de nature diverse (ferme et prévisionnelle).
2. Cet outil peut fonctionner en flux tirés pour certaines demandes.

Après une revue de la littérature traitant de la planification de la production, nous développerons un nouveau modèle adapté au contexte à l'étude. Le comportement de ce modèle sera étudié et validé à l'aide d'une simulation. Finalement, les hypothèses de départ seront revues puis analysées suite aux résultats obtenus.

CHAPITRE 2 : PARTICULARITÉS DE L'INDUSTRIE ET LEVIER DE FLEXIBILITÉ

Les constructeurs d'avions doivent satisfaire aux exigences statistiques de sécurité imposées par les organisations internationales. D'ailleurs, malgré une augmentation de 20% du nombre d'accidents impliquant des aéronefs en 2005 (Learmont 2006), les risques d'avoir un accident en se rendant à l'aéroport par voie terrestre restent plus élevés qu'à bord d'un avion (IATA 2004). Dans un avion moderne, la probabilité d'un scénario catastrophique (scénario conduisant au crash sans survivant) ne doit pas dépasser 1 sur 1 milliard. Un maximum de 100 scénarios de ce genre est autorisé sur un type d'avion donné. De plus, une panne simple ne doit pas conduire à un scénario catastrophe (l'avion doit être autonome sur un seul moteur et, éventuellement, il doit pouvoir planer). Si un avion n'obéit pas à ces règles, il ne peut pas être certifié et ne pourra pas effectuer de vols commerciaux.

Aucune autre industrie n'est soumise à de telles règles. La source de puissance étant un élément clé de la sécurité de tout engin volant, les fabricants et concepteurs de moteurs doivent respecter des règles strictes. Aussi novateur que puisse être un moteur, le refus des autorités de le certifier entraînera un échec commercial retentissant. En lien avec ces exigences, nous examinerons ici certaines particularités de l'industrie ayant des répercussions évidentes sur la production. Ces répercussions seront donc présentées par le biais des particularités liées aux inspections, aux tailles de lots, au personnel de production, au temps de mise en course et à la fabrication de prototypes. Finalement, les répercussions sur les leviers de flexibilité disponibles seront discutées. Nous examinerons donc la valeur du recours aux gammes de fabrication alternative, à la sous-traitance et aux heures supplémentaires.

2.1 Inspections

Différents types d'inspections sont requis au cours de la production d'une pièce. Bien que très présentes, certaines de ces inspections dépendent de la maturité du processus manufacturier. Le nombre d'inspections requises par un nouveau produit est supérieur au nombre nécessaire pour un moteur dit « mature ». Il en est ainsi car, les sources de problèmes de qualité résultant d'un mauvais processus manufacturier sont corrigées au fil du temps, conformément au programme d'amélioration continue très développé de l'entreprise. Il n'est donc plus nécessaire d'inspecter aussi systématiquement ces produits : un échantillon statistique peut suffire. En contre partie, chaque pièce d'un nouveau moteur sera soigneusement inspectée après les opérations majeures. Voici une brève description qui illustre le nombre et la complexité des différentes inspections :

Inspections dans un département de service :

Ces inspections requièrent du matériel et/ou du personnel particulier. Elles sont donc effectuées dans des cellules de service.

- « Fluorescent Penetrant Inspection » (FPI) - Inspection de soudure qui consiste à tremper la pièce dans un liquide spécial et à l'examiner manuellement sous une lumière ayant une longueur d'onde mettant en évidence la pénétration anormale du liquide dans la pièce.
- Contrôle magnétoscopique (MPI) – Inspection de surface de pièce ferromagnétique qui consiste à enduire la pièce de fines particules magnétiques et à en observer la distribution. Une région présentant des défauts ne génèrera pas un champ magnétique uniforme et attirera les particules.
- X-Ray – Inspection de soudure aux rayons X.
- Métrologie – Utilisation d'une machine munie d'un palpeur qui parcourt la pièce et en donne les dimensions de manière extrêmement précise.
- Diverses autres inspections plus marginales.

Inspections dans la cellule de production :

Ces inspections réalisées dans les cellules de production peuvent avoir lieu durant la réalisation d'une opération ou de façon indépendante.

- Validation manuelle de dimension – À l'aide de calibre et d'autres outils de mesure manuelle, l'opérateur valide la valeur de différents diamètres, longueurs ou épaisseurs.
- Inspection visuelle – L'opérateur examine attentivement certaines sections de la pièce en y cherchant des défauts.

2.2 Taille de lots

Des tailles de lots¹¹ figurent généralement dans les systèmes ERP des entreprises. Néanmoins, ces tailles de lots ne sont pas toujours respectées pour gagner en réactivité. Ceci s'explique par la nature des pièces produites. L'aéronautique est le milieu manufacturier le plus exigeant au niveau des contrôles de qualité¹². Si l'on prend l'exemple de pièces jumelles (taille de lot = 2 unités), il est possible qu'elles ne se rendent pas côte à côte jusqu'à la fin du cycle de production. Il n'est pas rare qu'une pièce se fasse inspecter après une opération de soudure et/ou après une opération majeure de machinage. Il est donc fréquent qu'une pièce soit retardée par le besoin d'une inspection plus approfondie et éventuellement par le besoin de la reprendre.

2.3 Personnel

Un opérateur doit être présent en permanence lorsqu'une machine à commande numérique (majorité des centres de travail) est en fonction. Ceci est loin d'être le cas dans d'autres industries où les opérateurs peuvent assurer le fonctionnement de plusieurs

¹¹ Nombre de pièces identiques qui seront traitées ensemble en production pour minimiser le temps de mise en course.

¹² Exception faite de l'aérospatiale.

machines de façon simultanée. Dans l'industrie aéronautique, la présence des opérateurs est nécessaire pour deux principales raisons : l'inspection et l'outillage. Compte tenu du prix prohibitif des problèmes de qualité (DeFeo 2001) l'entreprise se doit de minimiser leur apparition. C'est pourquoi les opérateurs inspectent régulièrement la pièce durant sa fabrication. Ils suivent aussi étroitement le niveau d'usure des outils de la machine.

Prenons l'exemple d'une machine 5-axes à commande numérique devant effectuer une opération de perforation à canon pour plusieurs trous dans une pièce d'un matériau très dur. La machine devra travailler sur la pièce plusieurs heures. Elle créera un trou d'un diamètre X en en perçant une série d'autres de diamètres inférieurs de façon concentrique. Pour ce faire, la machine utilisera différents outils pour ultimement obtenir le diamètre souhaité, et ce sans induire de contraintes de surface dans le matériau. L'opérateur aura à prendre des mesures dimensionnelles des trous à diverses étapes de manière à détecter un problème immédiatement après son apparition. L'opérateur devra aussi valider à l'aide d'un ordinateur l'usure de chacun des outils utilisés (Olexa 2003). Il est possible qu'un outil soit en mesure de travailler sur 2 trous et qu'il doive ensuite être changé de façon à toujours fonctionner en condition optimale.

De plus, l'opérateur doit surveiller la pièce. Dans certains cas, il doit régulièrement utiliser un canon à air comprimé pour nettoyer la pièce et l'outil. Si une retaille reste collée à la tête de l'outil, il est probable que cette retaille provoquera une entaille sur la pièce. Aussi petite soit cette marque, dans le domaine aéronautique, elle est inacceptable.

2.4 Temps de mise en course

De façon générale, le temps de mise en course dans les cellules de service est court et propre à chaque pièce. Que ce soit pour une opération d'inspection ou de lavage, si un traitement préalable doit être appliqué, il doit l'être indépendamment pour chaque pièce.

Dans les cellules de production, ce temps de mise en course est très variable. Le temps de mise en course peut varier entre 1 minute pour une opération manuelle dite de banc, et 1h30 pour l'installation et la configuration d'une machine à commande numérique. Cette longueur s'explique par la nécessité de charger le programme informatique propre à l'opération dans la machine en plus d'effectuer un certain nombre d'ajustements et/ou vérifications sur la machine. En fait, les machines sont de plus en plus équipées de capteurs qui permettent de minimiser les délais d'ajustement et d'inspection. Ce temps de configuration est applicable par opération associée à une pièce donnée. Si deux pièces identiques doivent subir la même opération, on peut économiser du temps en effectuant une seule fois la mise en course.

Pour être installée sur une machine à commande numérique, une pièce doit être montée sur un accessoire de fixation qui doit lui-même être installé sur une palette propre à la machine. Les accessoires de fixation sont généralement spécifiques à une famille de pièces et généralement en exemplaire unique. Il faut donc attendre qu'une pièce soit terminée avant de pouvoir monter sa jumelle sur l'accessoire de fixation. Par contre, si le bon accessoire est déjà installé sur une palette, la mise en course sera plus rapide.

Finalement, notons que la courbe d'apprentissage des différents processus manufacturiers est faible, puisque beaucoup d'opérations sont effectuées sur des machines à commande numérique et que les opérateurs sont dans l'ensemble très expérimentés.

2.5 Gammes alternatives

L'entreprise étudiée utilise très peu de gammes de fabrication alternatives. Cela s'explique par la lourdeur du maintien de ces processus de fabrication auxiliaire. Tel que précédemment mentionné le nombre et le type d'inspections sont revus en parallèle à

l'amélioration des processus manufacturiers. Puisque par définition une gamme de fabrication alternative est différente de la gamme de fabrication standard, il faut revoir les processus manufacturiers alternatifs (et les inspections qui y sont associées) dès qu'une modification est apportée à la gamme standard. Une telle procédure alourdit grandement le suivi des procédés de fabrication.

Notons aussi que bien que deux machines soient identiques sur papier, elles ne le sont pas nécessairement en pratique. Par exemple, deux machines 5-axes à commande numérique de même modèle n'utilisent pas nécessairement des fluides de refroidissement/lubrification identiques. Les fluides de refroidissement sont propres à l'usinage d'un matériau donné. Le machinage d'une pièce en titane sur une machine utilisant un fluide pour l'aluminium entraînera des fissures de surface et la pièce devra être mise au rebut. De plus, certains processus sont « engineering source approved », ce qui signifie que certaines spécifications ne figurent pas sur les dessins de fabrication. Seuls le personnel et les machines désignées sont autorisés à mener à bien ces opérations. L'existence de gammes alternatives entraînerait un plus grand besoin de formation et augmenterait le nombre d'erreurs.

2.6 Recours à la sous-traitance

Les gammes de fabrication sont extrêmement complexes et strictes en aéronautique. Seul un nombre limité de sous-traitants peut être appelé en renfort. Compte tenu de la rigueur des inspections requises, il est peu probable qu'un sous-traitant soit appelé de façon ponctuelle à fournir une capacité de production supplémentaire. En effet, si un sous-traitant est certifié pour une série d'opérations, il est fort probable qu'il effectuera de façon permanente l'ensemble de la production de ces pièces.

2.7 Recours aux heures supplémentaires et à l'ajout de personnel

L'usine étudiée est ouverte 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Selon le temps opératoire et la charge de travail, certaines unités manufacturières fonctionnent sur 2 ou 3 quarts de travail sur 5 ou 7 jours. Il est donc impossible d'évaluer globalement l'effet des heures supplémentaires. Compte tenu du fait que les opérations critiques sont des opérations nécessitant une machine spécifique, l'ajout de personnel ne permet pas vraiment une augmentation de capacité pour les cellules fonctionnant sur 7 jours, puisque les machines critiques sont déjà utilisées à leur capacité maximale.

Néanmoins, le recours au temps supplémentaire permet pour certaines cellules fonctionnant sur 5 jours d'augmenter la capacité de leurs machines critiques en ayant recours à du temps supplémentaire la fin de semaine.

CHAPITRE 3 : REVUE DE LITTÉRATURE

Compte tenu des économies qu'elles peuvent engendrer, les recherches touchant les méthodes de gestion de la production sont très nombreuses. Elles touchent principalement deux secteurs, soit la planification et l'ordonnancement. Puisque ce projet ne touche que la planification, seules les études s'adressant à cet aspect seront revues dans ce chapitre.

Deux approches bien distinctes ont fait l'objet de la majorité des études. La gestion de la production en *flux poussés* (FP) communément appelé « push » est généralement effectuée par un logiciel et donne le signal de début de production. La pièce est ensuite « poussée » tout au long du processus manufacturier jusqu'à ce qu'elle soit complétée. D'une toute autre façon, la production en *flux tirés* (FT) communément appelé « pull » est issue du *Juste-À-Temps* (JAT) et est directement gérée sur le plancher de production. De façon grossière, le signal de début de production est directement envoyé lorsqu'un inventaire de produits semi-finis atteint un certain seuil minimal : la production est « tirée » par la demande. Selon l'angle de la gestion d'usine, on peut dire que les systèmes à FP mesurent le niveau d'encours¹³ et contrôlent le flux alors que les systèmes à FT contrôlent le niveau d'encours et mesurent le flux.

Ce chapitre présentera une revue de la littérature relative aux différents outils de FP, de FT et hybrides en tentant de mettre l'emphasis sur la flexibilité, la simplicité et l'efficacité de chaque technique.

¹³ L'encours représente le nombre de pièces non finies présentes sur le plancher de production (nombre de pièces en cours de fabrication)

3.1 Planification en flux poussé

Jusqu'aux années 2000, le système Manufacturing Requirement Planning (MRP) étaient l'outil de planification de la production à FP le plus populaire. Ce système fonctionne selon le modèle présenté à la figure 3.1 et explicité à la section 1.1.3.

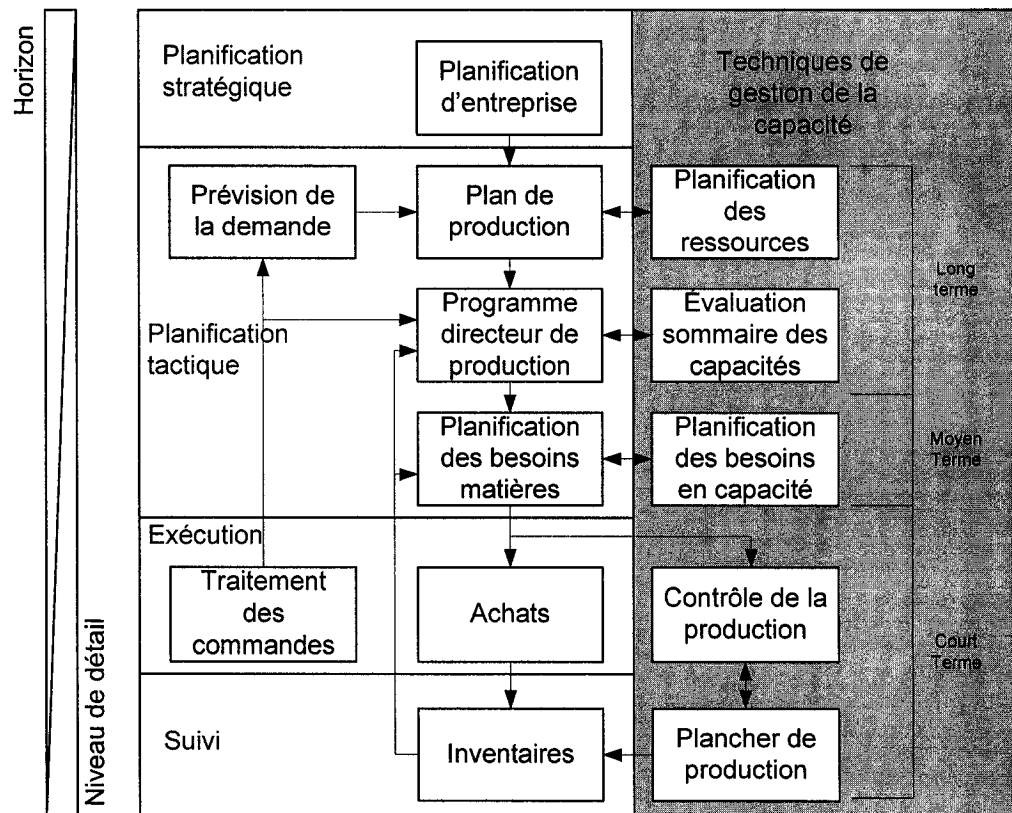


Figure 3.1 - Schéma détaillé d'un système MRPII avec aperçu des techniques de contrôle de capacité (adaptation de Scott 1994 et Rossier 1991)

Malheureusement, ce système présente plusieurs problèmes et selon Aggarwal (1985), 90% des utilisateurs en sont mécontents. Ceci peut s'expliquer par plusieurs dysfonctionnements. Duncan (1998) mentionne que les techniques utilisées par les systèmes MRP, bien que valables en théorie, ont dans beaucoup de cas, automatisé la génération de mauvaises demandes. Les systèmes MRP sont complètement dépendants

de la validité des nomenclatures, des gammes de fabrication, des délais d'exécution, des analyses de capacités, etc. Pour se protéger des erreurs, le niveau d'encours est souvent gonflé pour y inclure des stocks de sécurité qui engendrent des coûts inutilement élevés (Loren et al. 1989). De plus, cet encours excessif masque souvent des problèmes dans le système et engendre une variation accrue des temps de mise à disposition (Hopp 1996).

Pour assurer l'efficacité d'un tel système, il est essentiel de réduire au minimum les risques et particulièrement ceux liés aux études de capacité. Comme le disent Thacker et al. (2005) : « sans capacité pour répondre à la demande, le plan de production ne peut pas être valide ». Or, parmi les divers processus de validation de capacité présentés à la figure précédente, l'Étude Sommaire de Capacité (ÉSC) est la plus critique (Blackstone 1989). Elle sera donc étudiée plus en profondeur dans cette section. Cependant, bien que la capacité soit étudiée, les systèmes MRP utilisent une capacité infinie, ainsi que des temps de mise à disposition (Lead Time, LT) et des tailles de lot fixes. Cela pose souvent problème car les LT sont à la fois une donnée du système et une variable¹⁴ (Petty et al. 2000). La planification à capacité finie, rendue possible grâce aux systèmes de planification avancée (APS), permet de répondre à ces problèmes. Elle sera brièvement discutée à la section 3.1.2.

3.1.1 Étude Sommaire de Capacité (ÉSC)

L'Étude Sommaire de Capacité (ÉSC) utilise la flexibilité issue de la connaissance de la capacité disponible pour rencontrer les désirs des clients tout en tenant compte du besoin de stabilité du plancher de production (Plossl et Welch 1979).

Il existe 3 techniques d'ÉSC formellement définies. Elles ont des buts semblables, mais utilisent des données et une complexité de calculs substantiellement différentes. Ces

¹⁴ Le LT est fonction du nombre d'encours car plus le nombre de pièces en production est élevé, plus les files d'attente seront grandes et plus le temps nécessaire pour produire une pièce sera long.

trois techniques convertissent les assemblages majeurs issus du programme directeur de production en un temps requis sur certaines ressources clés. Puisque le temps disponible sur ces ressources peut être connu longtemps à l'avance, l'ÉSC permet de planifier une augmentation de capacité si le besoin s'en fait sentir (Olriky 1995).

Les trois techniques sont la *Méthode de Répartition Globale* (MRG), la *Méthode des Nomenclatures de Capacité* (MNC) et la *Méthode des Nomenclatures Décalées de Capacité* (MNDC).

L'évaluation de la capacité utilisant la MRG est la technique la plus facile à calculer et qui demande le moins de données. Elle multiplie les quantités de pièces requises par le PDP par le temps total de production et répartit le résultat par machines critiques en utilisant les proportions historiques. Du fait de l'utilisation de valeurs historiques, c'est la méthode la plus sensible à des changements de mix¹⁵ de produits en production.

La MNC utilise des données détaillées sur le temps standard¹⁶ requis pour compléter chacun des produits avec les ressources clés. Puisque les processus peuvent s'améliorer, il est possible de penser qu'un temps standard datant de quelques mois est conservateur et non exact, ce qui pose problème (Pandey et Ahsan 1997). Néanmoins, certaines compagnies, particulièrement celles avec un système de bonus basé sur la performance, font un bon travail de mise à jour des temps standards (Blackstone 1989).

¹⁵ Exemple de changement de mix :

Semaine 1 : 8 produits A, 2 produits B et 25 produits C

Semaine 2 : 15 produits A, 20 produits B et 5 produits C

¹⁶ Le temps standard est le temps que devrait prendre un ouvrier moyen allant à un rythme « normal » pour produire une unité d'un produit donné. Le temps standard inclut les pertes de temps inévitables (maintenance, pauses, repas, ...).

La dernière et la plus détaillée des techniques est la MNDC. Elle utilise la même technique que la MNC, mais tient compte de la période d'exécution des diverses opérations¹⁷.

Très peu d'études sur l'ÉSC ont été effectuées à ce jour. Il en est ainsi en grande partie car chaque entreprise développe son propre modèle adapté à ses produits. Il n'est pas nécessairement avantageux pour une entreprise en surcapacité ou pouvant facilement modifier sa capacité de production par le biais de leviers de flexibilité d'investir dans un système d'évaluation de capacité très développé. En contre partie, comme le décrivent Thacker et al. (2005) une entreprise ayant un « hard ceiling »¹⁸, se doit d'avoir une étude de capacité lui permettant de maximiser ses immobilisations. De plus, Edson et Correl (1998) notent qu'une bonne ÉSC doit se baser sur l'expertise des intervenants sur le plancher et ne doit pas être une boîte noire développée par du personnel « de bureau ». Malheureusement, ils notent aussi que l'évaluation sommaire de capacité est trop souvent prise à la légère par les dirigeants d'entreprise. Ceux-ci ont trop souvent tendance à penser que la production est élastique et qu'il suffit de mettre de la pression sur le personnel de production pour que les produits sortent dans les temps. Ils ne voient pas l'utilité de refuser des commandes puisque cela impliquerait des pertes de revenus. Pourtant, il est rare que la production soit « élastique ». Des retards surviennent et le niveau de service à la clientèle baisse ce qui entraîne des pertes de revenus non négligeables. Pour remédier à cette situation, l'ÉSC doit être soutenue par la haute direction de l'entreprise. Ainsi, elle permet une négociation entre les différents départements de l'entreprise aboutissant à un programme de production réalisable (Blaskstone 1989 et Spearman et al. 1990). Néanmoins, une bonne ÉSC n'est pas facile à obtenir (Plossl 1994). Aucune règle ne régit de façon claire le niveau de détails qui doit être pris en compte par l'ÉSC (Vollman 2005). Aucune des 3 méthodes décrites précédemment ne parvient à estimer la capacité de façon adéquate lorsque utilisée dans

¹⁷ L'ensemble des opérations nécessaires à la production d'un produit ne sont pas simultanées.

¹⁸ Entreprise pour laquelle il est extrêmement difficile de modifier la capacité de production.

un contexte où le processus manufacturier est complexe, où le volume de production est faible et où les délais d'exécution sont très longs. Parmi certains obstacles à leur pleine efficacité notons :

- La gestion de la capacité demande une grande quantité de données (Turner 1991)
- Le processus est itératif et prend beaucoup de temps (Turner 1991)
- Le programme directeur de production doit être stable pour permettre une étude de capacité valable. (Turner 1991)
- Le débit des diverses machines de l'usine n'est pas nécessairement égal (Plossl 1994)
- La gamme de fabrication peut être différente pour 2 machines produisant la même pièce (Plossl 1994)
- La capacité peut varier selon le calendrier (Plossl 1994)
- Les priorités peuvent perturber la production (Plossl 1994)
- L'espace de stockage est limité (Plossl 1994)
- Les files d'attente sont ignorées malgré leur effet sur le délai d'exécution des pièces (Plossl 1994)
- Les séquences de production ne sont pas prises en compte, mais ont pourtant une influence notable sur la production (Pandey et Ahsan 1997)
- Les courbes d'apprentissage ne sont pas prises en compte (Pandey et Ahsan 1997)
- La variabilité dans le temps de production est négligée (Pandey et Ahsan 1997)

3.1.2 Planification à capacité finie

La planification à capacité finie permet de planifier la production selon un ou plusieurs critères/contraintes. Selon Schultz (2002), il est essentiel d'avoir recours à cette technique pour les entreprises faisant face à une forte variabilité dans la mixité de

production et étant sous la pression de dates de livraison strictes. Cette technique permet de mieux gérer les ressources critiques et de réduire les encours. C'est pourquoi 38% des entreprises utilisant un système MRP pour gérer leur production disent planifier l'implantation d'un système de planification à capacité finie (Botta-Genoulaz et Millet 2005).

La planification à capacité finie est la solution au plan de production irréalisable, issu d'une ÉSC valable mais manquant de précision (Turner 1991). On peut faire l'analogie avec un restaurant ayant 100 places. Le restaurateur peut accepter 2 réservations de 99 personnes se disant qu'elles sont inférieures à la capacité de son restaurant. Néanmoins, si les deux réservations sont pour midi, il sera incapable d'y satisfaire simultanément.

Les outils de planification à capacité finie sont très versatiles et permettent d'élaborer un système de planification épousant les réalités et les contraintes propres à une entreprise donnée (Taylor et Plenert 1999). Ce n'est qu'en considérant l'usine dans son ensemble qu'il est possible d'en optimiser la production (Schultz 2002). Parmi ces outils à capacité finie, on retrouve dans les *Advanced Planning Systems (APS)* une nouvelle structure appelée *Operation-Centric BOM* ou *Production Process Model* (selon les auteurs) qui permet d'intégrer les nomenclatures classiques (Bill Of Material) et les séquences de fabrication issues des gammes de fabrication. Cette technique permet d'avoir recours à un ensemble de contraintes s'assurant que le plan de production sera réalisable. En étant assuré qu'une tâche planifiée sera exécutée, le système gagne en crédibilité et, du fait même, en efficacité et en flexibilité. Ce type de système permet, par exemple, d'introduire des stocks tampons (Eungab et Van Oyen 2000) se rapprochant ainsi de l'idéologie du JAT (Faria et al. 2006)

3.2 Planification en flux tirés

La gestion de la production par *flux tirés* (FT) est directement issue de la philosophie du JAT. Grossièrement, elle peut se décrire comme une méthode s'assurant de la production en continu d'une pièce sans qu'elle soit arrêtée ou accumulée comme encours à une étape X. Schonberger (1982) décrit le JAT comme un idéal esthétique visant la simplicité naturelle. Bien que souhaitable, il est néanmoins impossible de réduire à 0 les inventaires (Ohno et Mito 1988). Le JAT a aussi comme qualité d'être économique à implanter puisqu'il ne requiert pas de nouvelles machines ou équipement (Schonberger 1986).

Krajewski (1987) note que les systèmes à FT sont bons non pas à cause du système lui-même, mais parce qu'ils permettent de révéler les problèmes de l'environnement de production. Hopp et al. (1996) ajoutent que les systèmes à FT contrôlent plus efficacement le niveau d'encours que les systèmes à FP contrôlent les erreurs dans le taux de mise en production. De façon synthétique, Monden (1983) et Spearman et al. (1992) s'entendent pour dire que les systèmes à FT sont plus efficaces que ceux à FP car :

- Ils génèrent moins d'inventaires.
- Ils augmentent le contrôle sur la production en ayant une gestion « plancher » plutôt que « bureau ».
- Ils minimisent et mettent une limite au niveau d'encours.
- Ils empêchent la transmission de fluctuation amplifiée de la demande ou du volume de production.

Landers et al. (1998) présente une étude approfondie de divers système de JAT. On y retrouve le système MAN (*Material As Needed*) de Harley Davidson, le système ZIP (*Zero Inventory Production System*) de Omark Industries ainsi que le système MIPS (*Minimum Inventory Production Systems*) et CFM (*Continuous Flow Manufacturing*). Néanmoins le succès n'est pas automatique. Plusieurs compagnies ont eu des problèmes

à implanter de tels systèmes (Hall 1983), alors que pour d'autres, les résultats ont pris plus de 10 ans avant de se matérialiser (Shingo 1989 et Chang et Lee 1995). Pour bien comprendre les forces et faiblesses de ces techniques, les 2 principaux systèmes de FT soit le système kanban et le système CONWIP seront présentés avant une discussion portant sur d'autres méthodes.

3.2.1 Kanban

Le système kanban est considéré comme la colonne vertébrale des systèmes JAT (Im et Schonberger 1988). Le *Juste-À-Temps* prône la minimisation des stocks, mais comme le disent Spedman, Hopp et Woodruff (1989) les inventaires sont un « *necessary evil* » donc mieux vaut en avoir en petite quantité à des endroits stratégiques qu'une grande quantité à un seul endroit. Surtout quand cet endroit représente des produits finis puisque plus un produit se rapproche du marché plus il est coûteux de le garder en inventaire (Ashayeri et Selen 2005).

Comme on peut l'observer aux figure 3.2 et figure 3.3, le système kanban consiste à garder des inventaires de produits en cours de fabrication entre chaque centre de travail. Aucune norme précise ne régit la dimension de ces inventaires. Lorsqu'une pièce est retirée d'un inventaire, la « carte » kanban qui y était attachée est envoyée à l'unité responsable de la production de la pièce donnant ainsi l'ordre d'en fabriquer une autre.

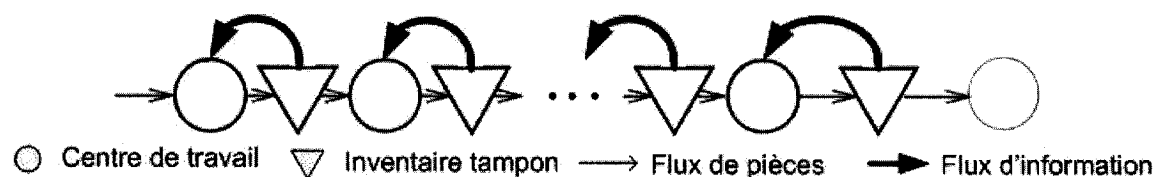


Figure 3.2 - Système de gestion de la production par kanban pour des machines en séries (Bonvik et Gershwin 1996)

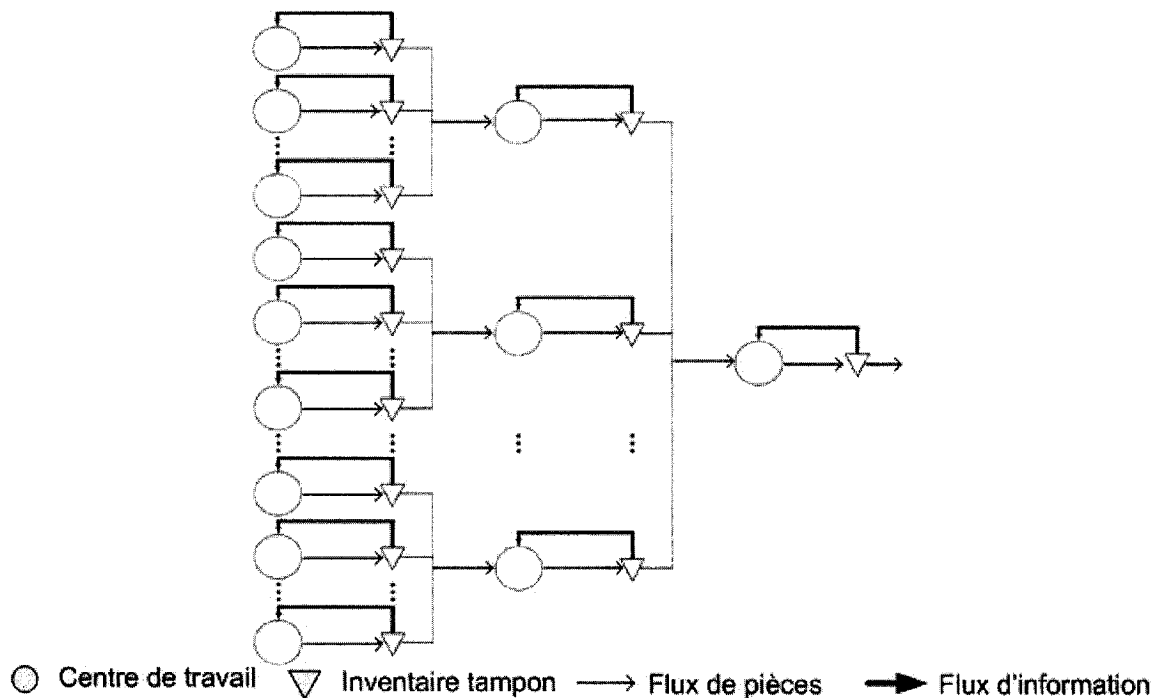


Figure 3.3 - Système de gestion de la production par kanban pour des machines en parallèle
(Takahashi et al. 2005)

Philipoom et al. (1986) détaillent JACKS (*Just-in-time Algorithm for Containers, Kanban and Sequence*) mais se basent sur l'hypothèse que les tâches peuvent commencer sur n'importe quel centre de travail ce qui est rarement le cas dans la réalité.

Britan et Chang (1987) ainsi que Bard et Golany (1991) présentent un modèle mathématique ayant pour but de déterminer mathématiquement le nombre de kanbans pour une chaîne d'assemblage à plusieurs étapes. Leurs recherches montrent la supériorité du système kanban sur le système MRP dans un univers où la demande est stable et où les produits sont fabriqués sur une ligne de production avec des gammes de fabrications similaires entre les familles.

Rees et al. (1987) appliquent l'approche Toyota dans un contexte de forte variabilité en utilisant les prévisions de la demande pour la période suivante et le délai d'exécution

observé lors de la période précédente. En utilisant ces données, ils estiment la fonction de densité du délai d'exécution ainsi que la fonction de probabilité du nombre de kanbans. À l'aide de ces fonctions, ils déterminent le nombre de kanbans qui minimise les pénuries et les coûts d'inventaires. Dans la même étude un des membres de l'équipe (Philipoom) utilise la simulation pour déterminer les délais d'exécution aux centres de travail et ainsi le nombre de kanbans nécessaire à chaque station pour prévenir la pénurie dans un système de production dynamique. Ils soulignent aussi que la vitesse du flux de production, les variations des processus de fabrication entre les familles, le taux d'utilisation des machines ont un grand effet sur le nombre de kanbans requis.

Deleersnyder et al. (1989) développent un modèle basé sur les chaînes de Markov pour déterminer le nombre de kanbans requis dans un univers présentant des demandes et des bris de machines stochastiques. Leur conclusion est que le nombre de kanbans situés dans les points d'inventaire en amont est la clé de la performance du système.

À titre d'exemple positif de l'implantation de système kanban, Boeing a diminué ses inventaires de 75% et réduit son LT de 50% en établissant un système kanban pour certaines pièces machinées des F-16 (Flight International 1998). Ils ont aussi doublé la production des 737-700 et des C-17 sans augmenter le nombre d'employés en installant un système kanban dans l'usine produisant ces avions (Kelkar 1999).

Le système kanban est à la base conçu pour des tâches manufacturières répétitives. Sa flexibilité est donc limitée lorsque mis dans un univers présentant une grande variation de mix (Hall 1983). Pour tenter de palier à ce problème Takahashi (2003) propose un contrôle dynamique des kanbans. Le système ajuste ainsi de façon dynamique le nombre de cartes selon qu'il détecte des changements dans la demande en utilisant les données relatives aux moments des retraits de produits de l'inventaire. Tardif et Maaseidvaag (1999) pour leur part proposent un système ayant recours à des extra-kanban qui sont libérés en fonction du niveau d'inventaire ainsi que la liste de pénurie.

Finalement, des modèles de kanbans plus « réactifs » comprennent le « *Generalised kanban* » de Buzacott (1989), l'« *Extended kanban* » de Dallery et Liberopoulos (1995) et le « *Flexible kanban* » de Gupta et al. (1999)

3.2.2 Constant Work In Process (CONWIP)

Ce système de gestion de production a été formalisé par Spearman et al. (1990) et, selon des simulations, est supérieur au système MRP ou kanban. Il intègre les avantages des systèmes à FP sans gonfler inutilement les inventaires. Comme illustré aux figure 3.4 et figure 3.5, avec un système CONWIP, la production d'une pièce n'est pas commencée tant qu'une pièce n'est pas consommée par la demande.

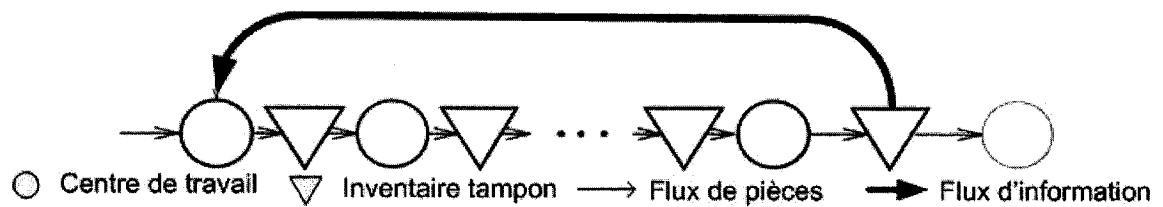


Figure 3.4 - Système de gestion de la production par CONWIP pour des machines en séries (Bonvik et Gershwin 1996)

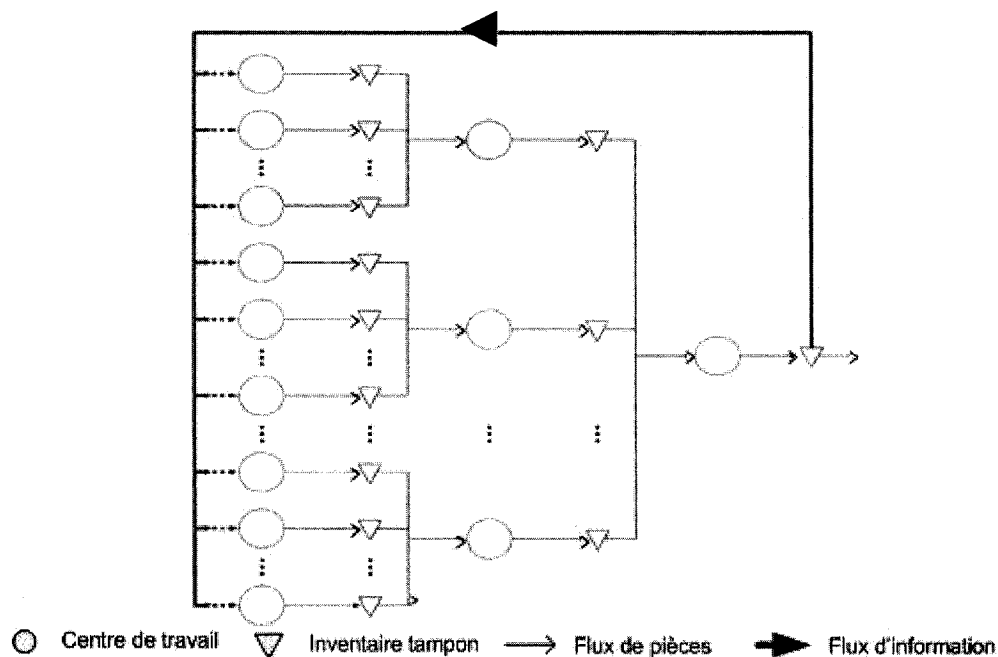


Figure 3.5 - Système de gestion de la production par CONWIP pour des machines en parallèle (Takahashi et al. 2005)

Un système CONWIP permet de conserver un encours constant dans une ligne de production en opposition à un système kanban qui garde l'encours constant à un centre de travail (Spearman et al. 1989). Les cartes d'un système CONWIP sont liées à une ligne de production et ne sont pas attachées à un type de pièce particulier comme dans le système kanban (Hopp et al. 1996).

Takahashi et al. (2005) proposent une variation du CONWIP classique pour une application avec des machines en parallèles (illustré à la figure 3.5). Ils proposent de tenir compte des temps d'exécution de façon à ce que toutes les pièces soient disponibles en même temps au dernier poste. Ils nomment leur approche le *Synchronized CONWIP*. Finalement, Framinan et al. (2005) proposent d'avoir recours à un dimensionnement dynamique du nombre d'encours autorisés de façon à avoir un processus plus flexible.

Le système de gestion de production par encours constant serait selon plusieurs auteurs la technique la plus efficace pour optimiser le rendement tout en minimisant les

inventaires de produits finis et les risques de pénuries (Roderick 1992, Roderick 1994, Gstettner 1996, Davis et Stubitz 1987, Bonvik 96).

3.2.3 Autres méthodes

Les méthodes kanban et CONWIP présentées précédemment présentent une lacune majeure. Elles supposent des temps de mise en course négligeables. Pourtant, il est assez rare que cette hypothèse puisse s'appliquer.

Pour palier à ce problème, Rother et Shook (1999) proposent d'étudier les flux de matériel pour ensuite linéariser au maximum les processus. Une fois ceci fait, un système kanban peut être appliqué aux endroits nécessaires. Cette approche privilégie la réduction du nombre de points d'inventaire de type kanban. Pour ce faire, les machines sont gérées par des systèmes de FIFO avec valeur maximale comme illustré à la figure 3.6. Ainsi la même machine peut servir à la fabrication de plusieurs pièces sans nécessairement être gérée par kanban.

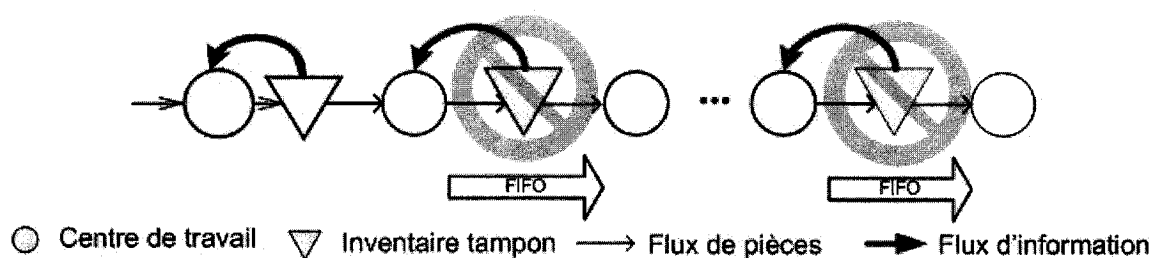


Figure 3.6 - Exemple d'une ligne de production utilisant des FIFO au lieu des kanbans

Tel que reprise par Duggan (2002), cette méthode favorise l'identification d'un point unique de planification. Idéalement, la planification est effectuée en FT par la demande du client.

Duggan (2002) présente aussi le concept de EPEI (*Every Part Every Interval*) qui vise à déterminer le plus petit intervalle de temps permettant à l'unité manufacturière de servir

tous ses clients tout en répondant à 100% de la demande. Cette technique permet de minimiser les tailles de lots au minimum pour pouvoir assurer un plus grand roulement de production et ainsi gagner en flexibilité. Plus un intervalle est petit, plus les inventaires seront petits. L'intervalle minimum est calculé en considérant le temps disponible sur la machine goulot (critique). Ceci s'effectue en utilisant la formule suivante¹⁹ :

$$\frac{[(A \times U) - \sum D \times T_c]}{\sum T_{mc}} = \# \text{ d'intervalles par jour}$$

A = Temps de travail disponible

U = Pourcentage du temps de travail réellement disponible (*uptime*)

D = Demande journalière par pièce

T_c = Temps de cycle par pièce sur la ressource

T_{mc} = Temps de mise en course par type de pièce sur la machine critique

Le concept de linéarisation de la charge intégrée à l'EPEI est conforme au principe japonais de *heijunka*²⁰, mais peut s'avérer difficile à implanter dans un contexte de petit volume et de grande mixité (Invistics 2004).

3.3 HYBRID « Push / Pull »

La supériorité des systèmes à FT sur les systèmes à FP n'est pas garantie par les avantages énoncés précédemment. Huang et al. (1983) soulignent que les systèmes à FT ne sont peut-être pas économiquement viables pour les entreprises où la demande est très variable. Dans le même ordre d'idées, Rees et al. (1989) mentionne que la variabilité de la demande affecte les systèmes à FT plus que les systèmes à FP. Finalement Sarker (1989) et Sarker et al. (1989) montrent à l'aide d'études de cas, que dans un contexte de forte variabilité de la production, les systèmes à FP sont meilleurs que les systèmes à FT.

¹⁹ Le détail de calcul est présenté en annexe III

²⁰ Synonyme de production nivelée

Spearman et Zazanis (1992) présentent une étude sur le niveau de contrôle et de robustesse des systèmes à FT en comparaison avec ceux à FP. Ils concluent que, parce qu'il est plus facile de contrôler les encours et de mesurer le flux, les systèmes à FT sont plus robustes. En d'autres mots, ils avancent qu'il est plus facile de contrôler le nombre de pièces présentes simultanément à un appareil ou un ensemble d'appareils et de mesurer le volume produit par unité de temps que de tenter de contrôler le volume à la sortie et de mesurer le nombre de pièces qui y étaient présentes (encours). Il est en effet facile de limiter le nombre de pièces sur le plancher, mais très complexe de fixer avec précision un volume de sortie, celui-ci étant tributaire de beaucoup de facteurs. Pour sa part, Lovell (1992) affirme qu'en réalité, aucune entreprise ne fonctionne selon un modèle totalement en FT ou totalement en FP. Ceci ouvre donc la porte à l'étude de modèle « hybride » ou « Hybride pull/push ».

Monden (1984 et 1993) traite d'un cas de système hybride où le système MRP planifie la production pour une semaine et où ensuite l'exécution s'effectue en FT. D'autres systèmes comme le syncro-MRP se sont avérés impopulaires en pratique car beaucoup trop complexes à utiliser (Deleersnyder et al. 1992). Le syncro-MRP consiste en une double autorisation de production. La production est planifiée par le système MRP et est autorisée par un kanban (Hall 1981). Geraghty et Heavey (2004) avancent que l'utilisation d'un système CONWIP est plus efficace qu'un système hybride push/pull dans un cas simple à 4 niveaux (2 en parallèles et 2 en séries). Il existe aussi des modèles de kanbans répondant aux variations saisonnières de mixité de production (Groenevelt et Karmarkar 1988). Dans ce cas, les cartes sont directement envoyées à la machine critique. Les pièces sont ensuite poussées jusqu'à ce qu'elle soit terminées. L'utilisation d'un système à FP pour la première moitié de production et en FT pour la deuxième moitié a aussi été analysée (Takahashi 1994). Finalement, le système le plus simple est énoncé par Hodgson et al. (1991) et consiste en un système MRP qui initie la production et un système en FT qui s'assure de la mener à bien.

3.4 Conclusion de la revue de littérature

Le problème de planification de production qui est à la base de ce travail est complexe et aucune méthode discutée dans ce chapitre ne permet d'y répondre de façon idéale. En effet, les méthodes documentées utilisent toutes des environnements manufacturiers relativement simples et ne font aucune différenciation entre le type de demande. Le nombre de centres de travail est généralement inférieur à 5 et bien que les variations dans le mix de production soient étudiées, elles ne le sont jamais en profondeur. De plus, la variation des opérations à accomplir selon les gammes de fabrication est mineure. Bien que la durée de chaque opération puisse varier sensiblement, l'ensemble des gammes utilisent les mêmes centres de travail dans le même ordre. Ce qui est loin d'être le cas des pièces produites dans une usine aéronautique.

Néanmoins, en regard à la littérature revue, il semble clair que l'axe de solution doit résider dans une approche hybride. Ainsi, il sera possible de tirer profit de la réactivité aux variations de mix de production des systèmes à *flux poussés* sans laisser tomber la robustesse des systèmes à *flux tirés*. Finalement, au meilleur de nos connaissances, aucune étude n'a été faite sur les besoins particuliers de la réservation de capacité à des fins expérimentales.

CHAPITRE 4 : DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE

Plusieurs approches ont été étudiées de façon à élaborer une solution à la problématique énoncée à la section 1.2 qui respecte les particularités de l'industrie présentées au chapitre 2. La présente section détaillera donc brièvement les principales pistes qui ont été envisagées pour ensuite présenter le modèle intégré de planification de la production qui a été retenu et développé. Finalement, la dernière partie de ce chapitre présentera une discussion sur les cellules de service ainsi qu'une proposition touchant leur gestion.

4.1 Pistes de solution

Les commandes de moteurs représentent la principale source de demande et génèrent la plus grande partie de la charge sur les unités manufacturières. Le lissage des lignes d'assemblage permet donc indirectement le lissage des cellules de production, puisqu'il nivelle la demande des moteurs. Ce n'est qu'une fois la planification des assemblages décidée que la période où les pièces doivent être mises en production est déterminée de façon à minimiser la période où elles seront conservées en inventaire. Néanmoins, les temps de fabrication d'un même type de pièces varient grandement selon les matériaux et les spécifications. Cela veut donc dire que les délais de fabrication dans une cellule donnée varient grandement selon les pièces (une cellule fournit plusieurs lignes d'assemblage de moteur). La différence de ces délais de fabrication et l'ajout de demandes pour des pièces de rechange ne permettent pas au lissage des assemblages de niveler suffisamment la charge sur les cellules de production. De plus, des considérations d'optimisation du temps de mise en course forcent à envisager un raffinement supplémentaire. Quelle information doit être utilisée pour permettre ce raffinement et comment doit-elle être utilisée sont les questions auxquelles nous tenterons de répondre dans cette section.

4.1.1 Pièces + gammes de fabrication comme base du modèle

L'obtention d'un plan de production s'approchant de l'optimum implique de prendre en compte le niveau de détails le plus raffiné. Ces détails se trouvent au niveau des pièces et de leurs gammes de fabrication. À titre indicatif, l'usine étudiée gère la fabrication d'environ 1 500 pièces différentes. En ce sens, garder à jour toutes les informations relatives aux pièces représente un travail important. De plus, si un ordinateur considère en détail les gammes de fabrication de chacune des pièces, il est à prévoir que le temps de calcul nécessaire pour obtenir un plan de production sera long.

4.1.2 Cellules de production comme base du modèle

Les cellules de production sont responsables de la mise en production des pièces. Elles contrôlent les séquences et s'assurent que la capacité disponible est suffisante. Si une cellule surestime sa capacité, elle générera inévitablement un encours considérable tout en occasionnant des délais de livraison. De façon à bien prendre en compte cette capacité dans la production d'un plan de production réaliste, n'étant ni sous ni sur capacitive, il est impératif d'établir des contraintes valables. Comme discuté précédemment, ces contraintes peuvent rapidement devenir très lourdes. La simplicité est donc visée, car plus les contraintes se complexifient, plus elles deviendront rapidement désuètes et plus il sera difficile d'en comprendre le fonctionnement.

Il est par contre intéressant d'observer la figure 4.1 illustrant le volume de pièces complétées par cellule par mois dans l'usine étudiée. On peut y remarquer que le nombre de pièces produites par cellule au cours d'une année est relativement constant. Le cas des cellules 2, 14 et 19 semble par contre particulier et problématique. Il suggère que des

facteurs extérieurs sont venus perturber la production et que le nombre de pièces produites par cellule ne peut pas être utilisé comme contrainte unique de capacité.

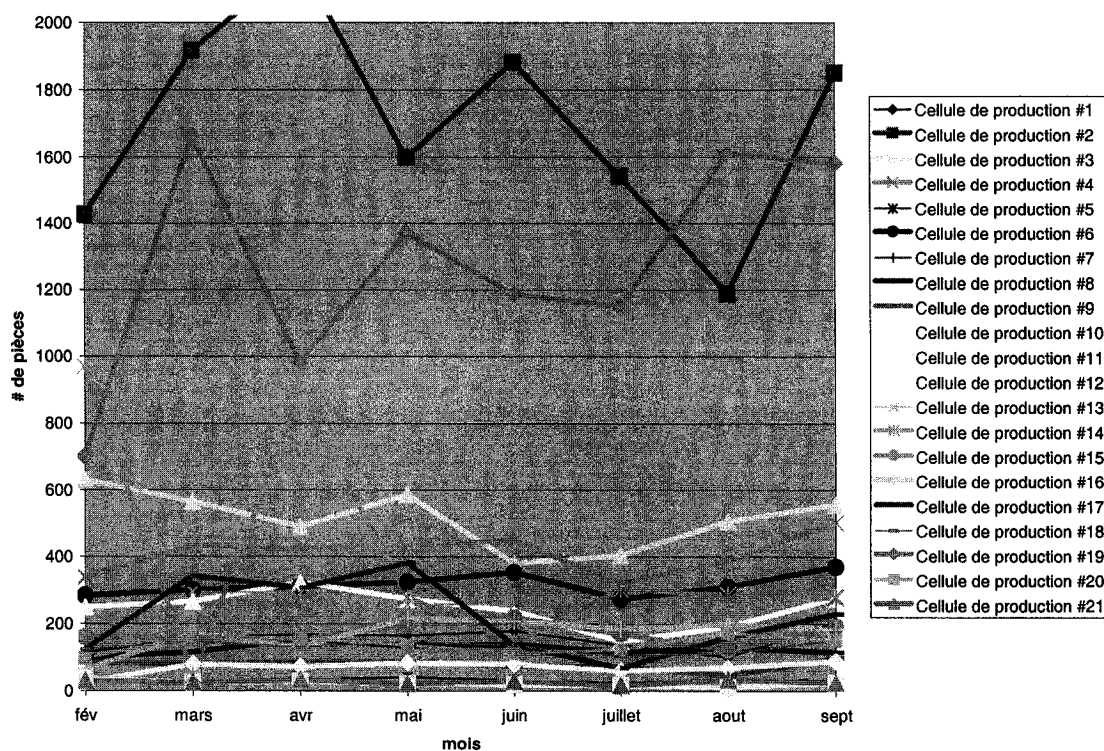


Figure 4.1 - Nombre de pièces produites par cellules de production

Dans le même ordre d'idée, la figure 4.2 présente le nombre de pièces différentes produites par cellule. On peut y observer qu'une cellule donnée produit sensiblement les mêmes pièces au cours de l'année.

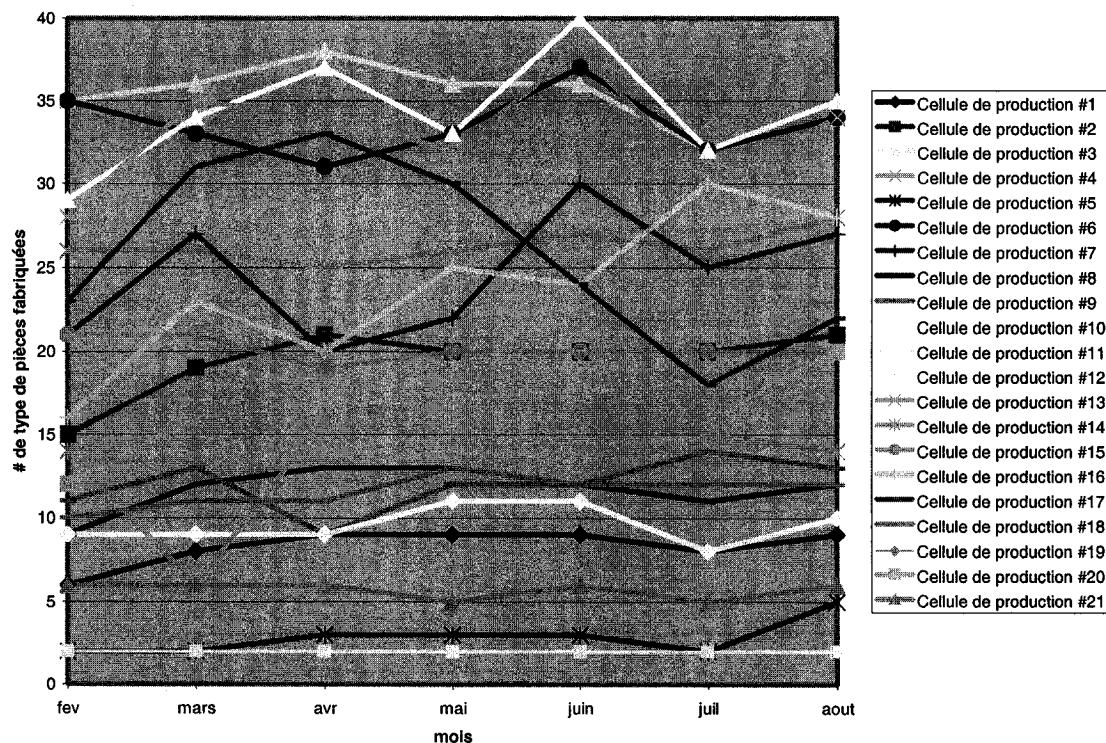


Figure 4.2 - Nombre de pièces de type différent produites par cellule

Se basant sur une usine de l'entreprise étudiée, les graphiques des figure 4.1 et figure 4.2 montrent qu'une certaine stabilité existe pour une cellule donnée. Il est donc possible de penser que les cellules peuvent fournir un certain nombre d'information agrégées pouvant simplifier la validation de la capacité.

4.1.3 Machines critiques comme base du modèle

Toutes usines possèdent des machines critiques. Dans le cas de l'usine étudiée, nous avons établi que le quart des machines peuvent être considérées comme critique pour une des raisons suivantes :

- Goulot capacitif
- Âge de la machine et risque de bris
- Caractère unique d'une machine

- Temps d'attente lié à son utilisation
- Complexité des opérations effectuées
- Quantité de problèmes de qualité et/ou possibilité de reprise (*rework*) des pièces

Une fois ces machines identifiées, il est possible d'optimiser les ressources disponibles en ayant recours et en limitant l'*OPERATION-CENTRIC BOM*²¹ aux opérations touchant ces machines dites critiques. Il est ainsi possible de tirer profit d'une partie des avantages d'une approche par pièce sans avoir à tenir compte de l'ensemble des données. Malgré cela, cette approche présente le risque de reposer davantage sur un logiciel et ses algorithmes que sur une connaissance humaine approfondie de la cellule.

4.1.4 ROUE EPEI comme base du modèle

Pour augmenter le contrôle sur la capacité disponible et lisser la charge, l'EPEI²² (Every Part Every Interval) (Duggan 2002) est un outil intéressant. Cette technique consiste à trouver le plus petit intervalle de temps nécessaire pour produire l'ensemble des pièces d'une cellule manufacturière sans dépasser sa capacité. Les tailles de lot sont alors déterminées pour chacune des pièces (ou familles de pièces si elles utilisent les mêmes configurations de machine) en essayant de minimiser l'intervalle²³.

Cette technique est conçue pour une production en « *flow shop* » et n'est pas applicable telle quelle dans l'industrie aéronautique. Dans le cas qui nous occupe, l'EPEI devrait gérer la production d'une cellule, mais 2 problèmes se posent :

²¹ Fonctionnalité des *Advanced Planning and Scheduling System* (APS) incorporant les nomenclatures et les gammes de fabrication.

²² Présenté à la section 3.2.3

²³ Exemple : Si une campagne de production répétitive des pièces AAAABBCCDEFGGGG est minimale (selon EPEI) et prend 2 jours, l'intervalle entre les campagnes de production est de 2 jours.

1. Les pièces à produire présentent des temps et des gammes de fabrication très variables²⁴.
2. La demande n'est pas constante et il est donc impossible de produire la même quantité de pièces durant chaque Intervalle.

Pour tenter de palier ces problèmes, l'entreprise étudiée a déjà fait une adaptation « maison » de cette technique et l'a intégrée dans une roue de façon à y ajouter un aspect graphique. Néanmoins les « roues EPEI » ne sont pas vraiment utilisées dans l'usine, car elles posent toujours un certain nombre de problèmes. En effet, une roue unique ne peut pas englober l'ensemble du processus de production puisqu'elle ne se base que sur une ressource critique alors que dépendamment des pièces, ces ressources critiques peuvent varier. Les roues sont néanmoins très appréciées pour l'aspect séquentiel (produire pièce A puis pièce B puis C, ...) qu'elles procurent.

De façon à ce que la roue EPEI soit pleinement applicable, nous avons considéré un certain nombre d'ajustements. Parmi ceux-ci, notons :

- Les quantités à produire doivent être déterminées de façon plus élaborée et plus dynamique.
- Une représentation de la capacité agrégée doit être incorporée à la roue.
- La position du point de planification (*one point scheduling*) (Rother et Shook 1999) devra être clairement définie.

De façon à mieux comprendre les possibilités de cet outil, nous avons simulé la planification de production à l'aide d'une roue nouveau genre représentant la mise en production des pièces. Cette roue est limitée en capacité par le nombre de pièces s'y inscrivant (ici 10) et ne tient pas compte des pièces expérimentales. Un système informatique détermine ensuite les quantités à produire. La simulation représentée à la figure 4.3 utilise 5 pièces représentatives d'une cellule et observe la capacité requise sur

²⁴ Les pièces de la cellule simulée ont des temps de fabrication de 8 à 45 jours (2 à 9 semaines).

2 machines à caractère critique. L'intervalle est fixé à une semaine pour des raisons pratiques. La simulation effectuée sur *Microsoft Excel* s'étale sur 10 semaines. Il faut toutefois éliminer les semaines 1 à 5 qui sont en régime transitoire.

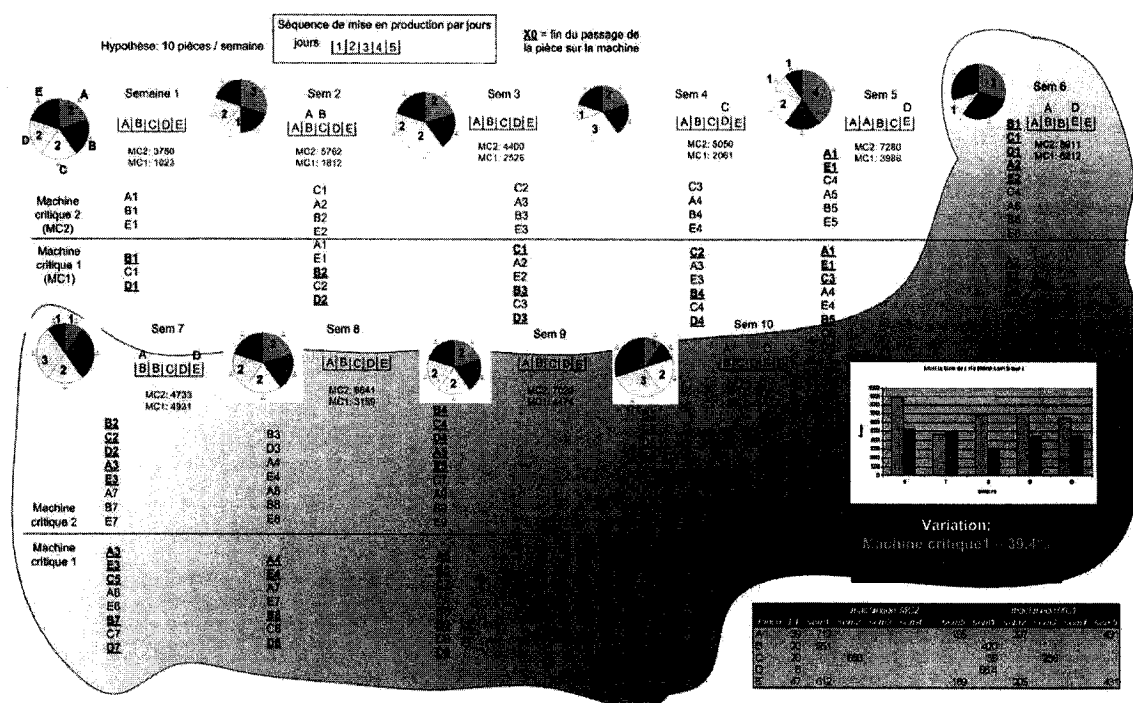


Figure 4.3 - Description de la simulation d'une roue nouveau genre

Une observation sommaire des résultats du temps d'utilisation des machines permet de constater qu'il est essentiel de considérer le facteur de mixité. Pour mieux contrôler ce dernier, la roue gagnerait à tenir d'avantage compte des machines critiques. Puisque selon la simulation, la machine critique #1 subit une variation de sa charge de l'ordre de 39,4% alors que la machine critique #2 en subit une de 46,9%. Les roues ne peuvent donc pas uniquement se baser sur le temps de cycle nécessaire et le temps disponible. Cette fluctuation dans la charge des machines est dû au fait que le type de pièces produites en semaine t_2 influera inévitablement la capacité en semaine t_0 . La roue simulée gère la mise en production. Elle contrôle donc de façon étroite l'initiation de la production, mais au-delà du temps total nécessaire par machine elle ne tient pas compte

des opérations subséquentes. Il serait idéal que les roues modélisent l'ensemble de la production d'une machine et non uniquement les premières opérations. Cela permettrait une optimisation pure des machines, mais cela semble impossible. De façon à contourner ce problème, l'utilisation d'un Manufacturing Execution System (MES) gérant l'aval et l'amont d'un point de planification unique (*one point scheduling*) a été étudié, mais non retenu compte tenu de la complexité de gestion d'un tel système.

4.2 Solution proposée

Suites aux différentes pistes discutées précédemment, un certain nombre de points semblent clairs :

1. Le volume de pièces produites par cellule étant relativement constant, il est plausible d'utiliser ces volumes comme contraintes globales de capacité.
2. Les cellules de production doivent être traitées séparément de façon à tirer profit de leurs spécificités. Prises indépendamment, elles peuvent constituer une base solide pour le modèle.
3. Les machines à l'intérieur d'une cellule n'ont pas toutes la même importance. Certaines machines, dites critiques, devront être intégrées à une contrainte de capacité.
4. L'utilisation de roue pour représenter la production permet une représentation simple des pièces devant être mises en production tout en permettant d'ordonnancer la mise en production des pièces de façon à optimiser la séquence.

Le modèle qui sera proposé ici pose deux hypothèses. Premièrement, les commandes des pièces de rechanges sont incluses aux demandes de moteurs neufs. Deuxièmement, on suppose que l'approvisionnement n'est pas une contrainte. C'est donc dire que le matériel nécessaire à la production des pièces est toujours disponible à temps.

4.2.1 Fonctionnement du modèle

Le modèle de planification de la production qui a été développé traite indépendamment la production des cellules en considérant 3 types de pièces : des pièces à fort volume, des pièces à faible volume et des pièces expérimentales. Un système hybride est utilisé pour traiter de façon indépendante et en *flux poussés* les pièces à faible volume et les pièces expérimentales, alors que la mise en production des pièces à fort volume est effectuée en *flux tirés* et est dépendante des quantités à produire en *flux poussés*.

La planification est effectuée par cellule avant le début d'une campagne de production et détermine la quantité de chaque pièce à produire. Globalement, on peut dire que :

- Les pièces expérimentales sont mises en production la semaine souhaitée à la seule condition que le nombre de pièces expérimentales à mettre en production ne dépasse pas une certaine valeur maximale.
- Toutes les demandes de production pour des pièces à faible volume sont exécutées de façon à ne pas générer d'inventaire.
- En utilisant la capacité de production restante on produit des pièces à fort volume pour maximiser le ratio $\left(\frac{\text{encours_pièce_}V}{\text{encours_maximum_pièce_}V} \right)^{25}$ et cela pour l'ensemble des pièces.
- La mise en production des pièces est dictée par une séquence propre à une cellule et représentée par une roue.

Trois contraintes de capacité sont incorporées au modèle. La principale, nommé contrainte globale, permet de déterminer la quantité de pièces à fort volume pouvant être produite. En se basant sur l'historique, on détermine la quantité maximale de pièces (sans distinction de type) pouvant être mise en production par la cellule par semaine. À

²⁵ Les pièces sont considérées comme de l'encours tant qu'elles ne sont pas consommées par la demande (livrées au client).

ce nombre on soustrait les pièces à faible volume et les pièces expérimentales devant être mises en production durant la semaine pour obtenir le nombre de pièces non allouées. Notons que de façon à bien représenter le caractère particulier des pièces expérimentales, on leur affecte un coefficient de 2,5. C'est donc dire qu'une pièce expérimentale prend la place de 2,5 pièces régulières. Les deux autres contraintes de capacité touchent la quantité maximale d'une pièce pouvant être mise en production ainsi que la quantité maximale de pièces à très lourde charge sur les machines critiques pouvant être mise en production durant une semaine.

De façon à présenter plus explicitement le modèle développé, ses variables seront d'abord présentées. Ensuite les lois touchant chacun des 3 types de pièces considérées seront détaillées séparément.

4.2.2 Variables du modèle

Tableau 4.1 - Indices du modèle proposé

v	Pièces à faible volume de production
V	Pièces à fort volume
x	Pièces expérimentales
t	Période calendaire représentant une campagne de production (ici 1 semaine)
i	Cellules de production

Tableau 4.2 - Variables du modèle proposé

D_{vt} D_{Vt} D_{xt}	Demande de pièces v, V ou x en semaine t
D_{v_moy} D_{V_moy}	Demande moyenne sur 20 semaines des pièces v, V
D_{v_max} D_{V_max}	Demande maximale sur 20 semaines des pièces v, V
Q_{vit} Q_{Vit} Q_{xit}	Quantité de pièces v, V ou x à mettre en production dans la cellule i en semaine t
S_{vi} S_{Vi} S_{xi}	Temps de mise à disposition des pièces v, V ou x dans la cellule i (en semaine) (représente le Lead Time)
W_{Vt}	Nombre de pièces V en cours de production (on considère les pièces complétées mais non consommées par la demande comme de l'encours)

Tableau 4.3 - Constantes du modèle proposé

Q_{xi_max}	Quantité maximale de pièces expérimentales pouvant être mises en production dans une cellule i par semaine
Q_{vit_max}	Quantité maximale de pièces à fort volume pouvant être mises en production dans une cellule i en semaine t (cette valeur est le résultat de la contrainte globale)
Q_{vxi_max}	Quantité maximale de pièces pouvant être mises en production dans une cellule i par semaine
V_i	Quantité maximale autorisée de pièces entraînant une forte charge sur les machines critiques.
W_v_max	Valeur maximale d'encours de la pièce V
B_i_max	Quantité maximale de pièces identiques pouvant être mises en production dans une cellule i par semaine (correspond à la taille de lot maximum)
$D_v_moy_limite$	Limite inférieure de la demande moyenne sur 20 semaines pour qu'une pièce soit considérée à fort volume

4.2.3 Pièces expérimentales – fabrication sur demande

Tableau 4.4 - Détail du traitement des pièces expérimentales

Mode de planification de production	<i>Flux poussés</i> (push)	
Définition/Hypothèses	Pièces expérimentales non produites en masse	
Contraintes de capacité	Les pièces expérimentales sont considérées comme équivalentes à 2,5 pièces de production régulière (intervient dans la contrainte globale)	$Q_{xit} \approx 2,5 \times (Q_{vit} \cup Q_{vit})$
	Limite sur le maximum de pièces expérimentales pouvant être mises en production	$\sum_{x=1}^{\infty} Q_{xit} < Q_{xi_max}$ pour i donné
Acceptation des demandes sans conditions.	Oui, si $\sum_{x=1}^{\infty} Q_{xit} < Q_{xi_max}$	
LOI	Le personnel responsable de la production des pièces expérimentales réserve de la capacité dans la cellule en réservant à l'avance un créneau de mise en production de pièces EXP pour une semaine donnée. Ce sont ces personnes qui sont responsables de réserver de la capacité de production suffisamment à l'avance pour que les pièces soient complétées à temps.	
Note	Il est possible de faire des changements de dernières minutes dans les réservations en augmentant ou diminuant les pièces à fort volume.	

4.2.4 Pièces à faible volume – fabrication sur demande

Tableau 4.5 - Détail du traitement des pièces à faible volume

Mode de planification de production	<i>Flux poussés</i> (push)	
Définition / Hypothèse	Une pièce à faible volume représente une pièce dont on ne veut aucun inventaire puisqu'elle représente un faible roulement. De surcroît comme son volume est faible, elle ne représente pas une charge notable sur la cellule.	$D_{v_moy} < D_{v_moy_limite}$
Contraintes de capacité	Aucune contrainte de capacité n'est appliquée aux pièces à faible volume.	
Acceptation des demandes sans conditions.	Oui	
LOI	Les pièces à faible volume sont fabriquées de façon systématique et sans condition selon la date de livraison moins leur temps de mise à disposition (LT).	

4.2.5 Pièces à fort volume – approche CONWIP-pièces

Tableau 4.6 - Détail du traitement des pièces à fort volume

Mode de planification de production	<i>Flux tirés (pull)</i>	
Définition / Hypothèse	Une pièce à fort volume représente une pièce pour laquelle on tolère un inventaire. Ces pièces représentent la plus grande charge sur la cellule. On peut donc les utiliser pour niveler la charge.	$D_{V_moy} \geq D_{V_moy_limite}$
Contraintes de capacité	Contrainte globale de capacité.	$\left[\sum_{V=1}^{\infty} Q_{Vit} \leq Q_{Vit_max} = \left(Q_{V_{Vxi_max}} - \sum_{v=1}^{\infty} Q_{vit} - 2.5 \times \sum_{x=1}^{\infty} Q_{xit} \right) \right]_{i=\text{fixé}}^{t=0}$
	Limite sur la quantité de pièces identiques pouvant être produite durant une période	$Q_{Vit} \leq B_{i_max}$
	Limite sur la quantité des pièces présentant une charge notoire sur les machines critiques.	Exemple : $\left(Q_{Vit} \Big _{\substack{V=1 \\ i=1 \\ t=0}} + Q_{Vit} \Big _{\substack{V=3 \\ i=1 \\ t=0}} + Q_{Vit} \Big _{\substack{V=8 \\ i=1 \\ t=0}} + Q_{vit} \Big _{\substack{v=1 \\ i=1 \\ t=0}} \right) \leq V_i \Big _{i=1}$
Acceptation des demandes sans conditions.	Planification indépendante de la demande	
LOI	Après le calcul de Q_{Vit_max} , on remplit la roue en utilisant les pièces à fort volume de façon à maximiser les ratios $(Q_{Vt} + W_{Vt}) / W_{V_max}$	Objectif à maximiser : $Min \left[\left(\frac{Q_{Vt} + W_{Vt}}{W_{V_max}} \right) \Big _{t=0}^{V=1}, \left(\frac{Q_{Vt} + W_{Vt}}{W_{V_max}} \right) \Big _{t=0}^{V=2}, \left(\frac{Q_{Vt} + W_{Vt}}{W_{V_max}} \right) \Big _{t=0}^{V=3}, \left(\frac{Q_{Vt} + W_{Vt}}{W_{V_max}} \right) \Big _{t=0}^{V=4}, \dots \right]$
Dimensionnement de W_{V_max}	Le dimensionnement des valeurs maximales d'encours (W_{V_max}) sont obtenues par simulation/optimisation.	
Révision de W_{V_max}	De façon à toujours avoir des inventaires proportionnels à la demande et éviter le risque de désuétude, il est proposé de réévaluer les valeurs de W_{V_max} à tous les 3 mois. S'il est à propos de modifier les valeurs de W_{V_max} , la transition sur le plancher sera quasi-imperceptible puisque les lois de décisions restent inchangées.	

4.2.6 Mode opératoire

Comme on peut l'observer à la figure 4.4, une roue représente la séquence de mise en production des pièces. Cette séquence est établie par le personnel de production de façon à faciliter les transitions et à éviter de concentrer la charge sur une machine dans une période donnée. C'est cette roue que l'on remplit à l'aide des lois décrites précédemment. L'idée clé sous-jacente au modèle est la simplicité et la flexibilité. C'est pourquoi le modèle n'est fixé que très légèrement avant que la production ne commence. Il semble logique que le dimensionnement des parts de roue, en accord avec les lois du modèle, soit effectué par du personnel de production puisqu'ils sont les seuls à connaître avec exactitude le niveau d'encours des pièces. Cette tâche peut-être faite de façon purement manuelle ou en utilisant un solveur comme celui de *Microsoft Excel*. Néanmoins, il est aussi possible d'envisager que ce dimensionnement soit effectué par un *Advanced Planning and Scheduling System* (APS) tel qu'APO de la compagnie SAP. Un tel logiciel peu aisément dimensionner les parts de roue selon les lois énoncées précédemment et envoyer un rapport au personnel de production qui s'assurera de mettre les pièces en production le jour prescrit. Cette approche semble par contre moins intéressante car elle présente de nombreux risques d'erreurs et exigerait que le logiciel puisse avoir une vision exacte et en temps réel des pièces présentes sur le plancher de production. De façon à simplifier la gestion des approvisionnements, ceux-ci pourraient continuer d'être gérés par le système MRP en considérant des marges plus grandes pour les pièces à fort volume.

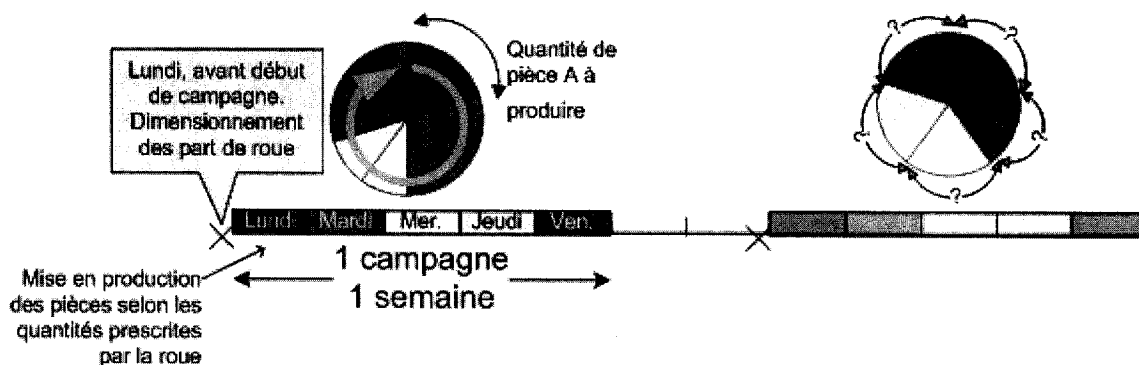


Figure 4.4 - Utilisation des roues pour une cellule fonctionnant sur 5 jours

Notons aussi que comme la planification n'est effectuée qu'à la toute dernière minute, il est possible d'accommoder la production de pièces expérimentales. Par exemple, si les ratios de CONWIP des pièces à fort volume sont déjà égaux à 1 (valeur maximale), mais que $Q_{vit} < Q_{vit_max}$, il est possible de proposer à l'expérimental de mettre une pièce supplémentaire en production. De façon inverse, si l'expérimental n'est pas en mesure de mettre les pièces planifiées en production, il est possible de remplacer ces pièces par des pièces à fort volume.

Finalement, la précision du modèle est liée aux valeurs de W_v_max (valeur d'encours maximal autorisé par pièce à fort volume). Dans le cadre de ce projet, celles-ci sont obtenues par simulation/optimisation et, comme nous pourrions le voir au prochain chapitre, de plus amples travaux sont nécessaires pour dégager une loi empirique régissant leur dimensionnement. Néanmoins, quelle que soit la technique utilisée pour établir ces valeurs, il est important de les réévaluer, ainsi que les différentes variables modélisant la capacité, plusieurs fois par année de façon à s'assurer qu'elles modélisent bien la demande et représentent toujours la réalité. Lors de la révision de ces paramètres, les différents intervenants peuvent analyser la capacité utilisée. Si, durant les mois

précédant la révision, l'utilisation de la capacité telle que définie par $\frac{\sum_{v=1}^{\infty} Q_{vt}}{Q_{vit_max}}$ est de

100% et que la demande reste inchangée, une augmentation de la capacité est souhaitable.

4.3 Cellules de service

Dû à leur globalité (toutes les pièces y ont recours), il est intéressant d'observer plus en détails les cellules de service puisqu'elles influent sur la production de toutes les pièces.

4.3.1 Contexte

Les pièces fabriquées dans l'usine étudiée ont entre 16 et 60% de leurs opérations effectuées dans les cellules de services. Ces mouvements de pièces entre cellules de production et cellules de service sont illustrés à la figure 4.5 pour un échantillon de 8 pièces. Pourtant, cela n'explique pas totalement la raison pour laquelle elles y passent autant de temps, puisque les opérations de « service » sont généralement de courte durée²⁶. Ceci s'explique plutôt par les pertes de temps en transport et en attente. Dans les deux cas, les délais engendrés sont non productifs (Connor 2003, Acord 1998).

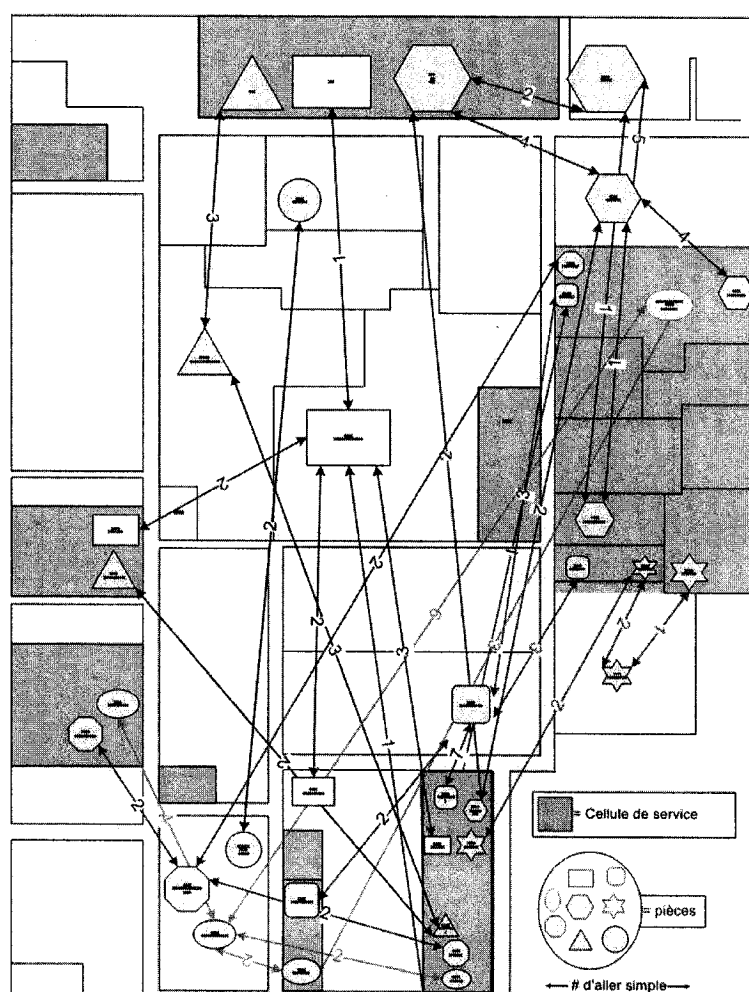


Figure 4.5 - Interactions cellules de service / production

²⁶ Exception faite du traitement thermique

Compte tenu de la capacité limitée, une gestion manuelle des priorités intervient dans la cellule de service pour favoriser certains clients. Une pièce pourra donc se faire « dépasser » par toute autre pièce considérée plus urgente (ceci est fréquemment le cas pour les pièces expérimentales). Bien entendu, plus la charge sur la cellule de service est élevée, plus la gestion manuelle des priorités sera importante et rendra difficile l'évaluation du temps nécessaire pour le traitement des pièces. N'étant pas en mesure d'évaluer le temps nécessaire aux opérations devant avoir lieu à l'extérieur de sa cellule de production, l'ACA ne pourra pas planifier les mises en production qui permettraient d'optimiser sa cellule. Pour s'assurer de ne jamais avoir de machines et d'opérateurs non utilisés, il aura tendance à mettre plus de pièces en production pour être certain de toujours avoir suffisamment de pièces dans sa cellule de production. Ainsi, il souffre moins des délais excessifs des départements de service, mais il augmente l'encours ce qui conduit à augmenter les coûts et à rallonger le LT (Goldratt et Cox 1984). Il est donc important d'établir une structure fixe touchant les cellules de service.

4.3.2 Solution proposée

Dans le but de servir tous les clients internes de façon équitable, une adaptation du principe de « Premier Entré Premier Servi » (FIFO) est à propos. Il est proposé de construire une roue gérant le traitement des différentes demandes selon une approche totalement plancher (aucune planification effectué par le personnel de bureau). Voici les principes de construction d'une telle roue :

1. Identifier les clients.
2. Identifier la charge de travail liée à chacun des clients.
3. Déterminer le temps d'exécution minimal d'une roue c'est-à-dire le temps minimum pour servir l'ensemble des clients. Dans l'exemple ci-dessous, il est possible de servir l'ensemble des clients en 4 heures.

On établit ensuite une séquence de travail et on bâtit la roue (voir figure 4.6). L'opérateur n'a plus qu'à travailler sur les pièces de façon cyclique en traitant le nombre de pièces prescrites par la roue. Si aucune pièce n'est présente dans la file d'attente (selon FIFO) d'un client alors que l'opérateur en est à l'étape de le servir, il passe au client suivant. Conformément à l'exemple de la figure 4.6, ce client se fera servir à nouveau dans 4 heures (plus petit laps de temps permettant de servir l'ensemble des clients en une journée). Dans ce modèle, l'opérateur traitera 5 pièces du client #1, puis 5 pièces du client #2, 10 pièces du client #3 et ainsi de suite car les clients #1 et #2 représentent chacun 14% de la charge sur la cellule alors que le client #3 est responsable de 28% de la charge.

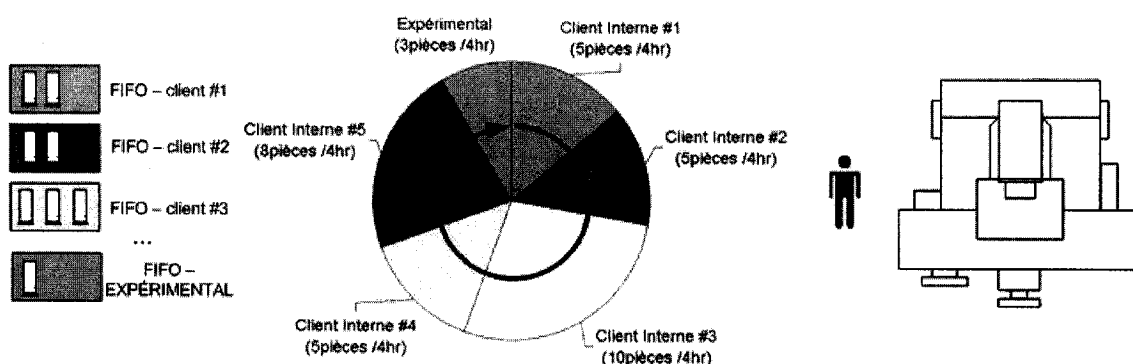


Figure 4.6 - Exemple de roue pour cellule de service

Dans le but de favoriser la production des pièces expérimentales, on propose de considérer l'expérimental comme un client à part entière (comme à la figure 4.6) plutôt que de traiter ses pièces selon la cellule de production dont elles proviennent. Il est aussi proposé de surévaluer la charge de travail de l'expérimental de façon à lui donner un niveau de service supérieur aux autres clients. Cette façon de procéder présente un avantage considérable, puisque le fait d'être traité comme un client à part entière permet de traiter en priorité ces pièces, ce qui permettra, grâce à une visibilité qui lui est propre, d'accélérer grandement leur fabrication. En contre partie, si la production des pièces expérimentales est accélérée, certaines pièces de production seront inévitablement

ralenties. Ce ralentissement sera néanmoins uniforme pour l'ensemble des clients et devrait permettre de réduire la gestion manuelle des priorités et donc de mieux anticiper le temps de passage des pièces.

Ce modèle est applicable dans presque tous les cas étant donné que pour une cellule de service donnée les opérations sont sensiblement uniformes en procédé (recours à une seule machine avec des temps de mise en course modérés) et en temps d'exécution. Néanmoins, cette approche ne peut être appliquée lorsque l'on doit regrouper en lot des pièces provenant de plusieurs clients. C'est le cas de la cellule de traitement thermique où l'on doit regrouper toutes les pièces ayant la même « recette » de façon à optimiser les fours. Hormis ce cas particulier, cette approche semble très satisfaisante puisque son principal inconvénient est le besoin d'un espace physique important pour loger les lignes de FIFO de chaque client, ce qui demeure très négligeable.

CHAPITRE 5 : EXEMPLE D'UTILISATION ET VALIDATION DU MODÈLE

De façon à illustrer le fonctionnement du modèle de planification de production décrit au chapitre précédent et pour valider son efficacité, ce chapitre présente une simulation de l'application détaillée du modèle dans une cellule de production.

La simulation vise à déterminer les valeurs d'encours maximum autorisées pour les pièces à fort volume ($W_{V_max}^{27}$) pour minimiser les inventaires sans générer de pénurie. Une fois les W_{V_max} déterminés, la simulation servira à comparer le fonctionnement du modèle proposé à la situation actuelle. Finalement, la simulation sera utilisée pour étudier la méthode de gestion des files d'attente idéale pour l'entreprise.

5.1 Description des paramètres simulés

Ce travail de recherche vise la planification de production. La simulation présentera donc uniquement l'exécution du modèle de la section 4.2. Le modèle visant les cellules de service présenté à la section 4.3.2 ne sera pas considéré et cela pour deux raisons :

1. Le fonctionnement des cellules de production étant tributaire des cellules de service, la simulation des deux modèles dans la même simulation ne permettrait pas une analyse valable des résultats.
2. La simulation du modèle visant les cellules de service implique la simulation de toutes les cellules de services et de tous leurs clients. C'est donc dire que l'ensemble de l'usine devrait être simulé. Compte tenu de la taille de l'usine, cela représente une tâche colossale non justifiée par les objectifs.

²⁷ Quantité maximale d'encours tolérée par pièce

La cellule de production retenue pour la simulation l'a été parce qu'elle est représentative de l'usine. Elle est responsable de la fabrication de 11 pièces détaillées au tableau 5.2 et représentant des assemblages de haut niveau essentiels à l'assemblage final de la quasi-totalité des moteurs fabriqués par l'entreprise. Elle supporte aussi la fabrication de pièces expérimentales et a recours aux cellules de service dans une proportion similaire aux autres cellules de production. Finalement, la cellule fonctionne sur 3 quarts de travail, 5 jours par semaine, comme c'est le cas de la majorité des cellules de l'usine.

Le tableau 5.1 suivant présente les valeurs des constantes du modèle relatif à la cellule simulée.

Tableau 5.1 - Valeurs des paramètres simulés

Paramètre	Justification
$D_v_moy_limite = 1$	En fixant le seuil de fort volume à plus d'une pièce par semaine, la cellule étudiée produit 6 pièces à fort volume et 5 pièces à faible volume en plus de pièces expérimentales. Les pièces à fort volume (55% des pièces) sont responsables de plus de 71% de la charge sur la cellule.
$Q_{vVx_max} = 20$	Valeur historique de production ²⁸
$B_max = \frac{1}{4} \times Q_{vVx_max} = 5$	Établi en concertation avec des intervenants de production.
$(Q_E + Q_C + Q_F + Q_m) < V_i = \frac{3}{5} Q_{vVx_max} = 12$	Les 4 pièces identifiées (E,C,F,m) ne représentent que 36% des pièces, mais génèrent plus de 60% de la charge sur les machines critiques. En concertation avec des intervenants de production, nous fixons la somme de ces pièces comme devant être inférieure à 12.
$W_v_max _{V=A,C,D,E,F} = ?$	Déterminé par simulation/optimisation

²⁸ Le dimensionnement de cette variable étant à la base de l'étude de capacité intrinsèque au modèle, seule une application réelle peut permettre de valider cette valeur.

Tableau 5.2 - Détails des pièces simulées

		Nombre d'opérations	Demande par semaine	% de la demande sur 20 semaines
Pièces à faible volume ²⁹ (< 1 pièce par semaine)	Pièce h	34	0,6	4%
	Pièce i	29	0,8	5%
	Pièce j	35	0,1	1%
	Pièce l	14	0,4	3%
	Pièce m	59	0,4	3%
Pièces à fort volume ³⁰ (≥ 1 pièce par semaine)	Pièce A	30	1,2	8%
	Pièce C	58	2,9	20%
	Pièce D	33	2,3	16%
	Pièce E	51	1,1	7%
	Pièce F	73	1,4	10%
	Pièce G	12	1,5	10%

Comme on peut le constater à la figure 5.1, la simulation a été effectuée en utilisant la demande pour 20 semaines. Néanmoins comme il est nécessaire de dépasser le régime transitoire, la demande a été considérée comme constante et 4 blocs représentant cette demande ont été mis bout à bout ce qui donne 80 semaines de demandes et donc 80 semaines simulées. De façon à éliminer le régime transitoire, seules les semaines 40 à 80 ont été utilisées lors de l'étude des paramètres décisionnels.

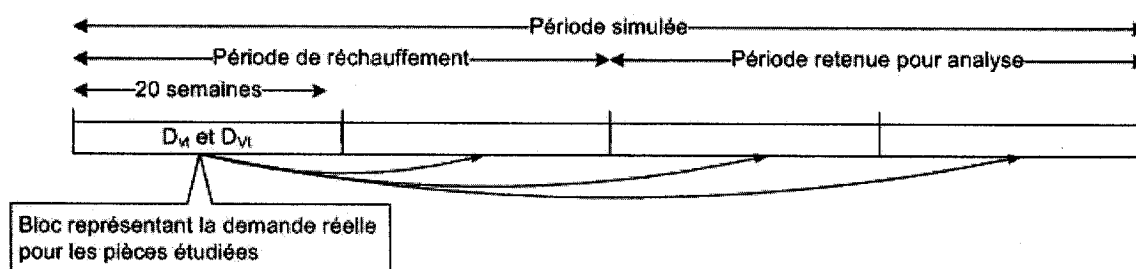


Figure 5.1 - Description de la période simulée

²⁹ Ces pièces sont représentées par une lettre minuscule

³⁰ Ces pièces sont représentées par une lettre majuscule

5.2 Description du simulateur

Le simulateur utilisé est le logiciel *ARENA 9.0* de la compagnie *Rockwell Automation*. Ce logiciel est basé sur le langage *SIMAN* et a été choisi pour plusieurs raisons. D'un point de vue technique, il est particulièrement efficace pour simuler des processus manufacturiers, il offre une puissance de calcul impressionnante et il permet l'utilisation d'un tableur pour suivre les variables/résultats voulus. Sous un angle pratique, l'*École Polytechnique de Montréal* détient une licence de ce logiciel ainsi que d'un ensemble d'autres logiciels l'accompagnant.

De façon à représenter la situation désirée, nous avons regroupé un ensemble d'éléments en 3 blocs principaux (Mise en production, Exécution de production et Consommation des pièces par la demande) et 3 blocs secondaires (Temporel, Décision des quantités à produire et Avertissement de pénurie). Nous les décrirons ici de façon succincte dans l'ordre de leur première utilisation.

Bloc temporel

Ce bloc crée une variable temporelle qui s'incrémente toutes les 120 heures (1 semaine) et envoie un signal à divers modules de façon quotidienne.

Bloc de décision des quantités à produire

- Fonction

Ce bloc a pour but de décider des quantités de pièces à fort volume à mettre en production. Pour ce faire, il remplit la section Q_{vt} de la matrice présentée au tableau 5.3. Les quantités à produire durant une semaine seront déterminées 3 heures avant que la première pièce d'une semaine t soit mise en production.

Tableau 5.3 - Quantité à mettre en production (Q_t)

		Semaine																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	...	80
Pièces à fort volume (Q_{vi})	A																					
	C																					
	D	Déterminée par le bloc de décision des quantités à produire																				
	E	En fonction des ratios d'encours																				
	F																					
	G																					
	h																					
Pièces à faible volume (Q_{vf})	i	Déterminée de façon à ne pas générer d'inventaire.																				
	j	Date de livraison -- Temps de mise à disposition = Date de mise en prod.																				
	l																					
	m																					
Expérimental (Q_{xe})		Déterminée par une fonction aléatoire : minimum = 0, maximum = 4																				

NOTE : Les quantités à produire de pièces à faible volume et expérimentales sont déterminées séparément à l'aide d'un tableur avant l'exécution du simulateur.

- Description détaillée du fonctionnement du bloc

Le bloc commence par calculer le nombre maximal de pièces à fort volume qu'il est autorisé à mettre en production (Q_{vt_max}). Ceci est fait en calculant l'équation

$$\left[Q_{vit_max} = \left(Q_{vixi_max} - \sum_{v=h}^m Q_{vit} - 2.5 \times \sum_{x=1}^{\infty} Q_{xit} \right) \right]_{\substack{i=fixé \\ t=?}}, \text{ les valeurs de } Q_{vt} \text{ et } Q_{xt} \text{ étant}$$

connues à l'avance. Ceci fait, le bloc incrémente les quantités à produire de façon à maximiser le minimum des ratios d'encours $[(W_v + Q_{vt}) \div W_{v_max}]$ pour chacune des pièces à fort volume. Il boucle jusqu'à ce qu'une limite globale soit atteinte. Ces limites globales sont :

- ✓ Le nombre de pièces maximales pouvant être produites est atteint.

$$\left(\sum_{V=A}^G Q_{vt} = Q_{vt_max} \right)$$

- ✓ Il n'est plus possible d'ajouter des pièces en production sans que le minimum des

$$\text{ratios d'encours soit supérieur à 1. } \{ [\text{minimum} \left(\frac{W_v + Q_{vt}}{W_{v_max}} \right)_{V=A,C,D,E,F,G}] = 1 \}$$

Il incrémentera donc de 1 le nombre de pièces à produire pour la pièce présentant le plus petit ratio d'encours pondéré. Cette pondération est le résultat de l'application des limites locales. L'atteinte d'une de ces limites locales pour une pièce entraînera la pondération de son ratio d'encours par 999 ce qui a pour effet d'empêcher que celui-ci représente le minimum des ratios d'encours. Ces limites locales sont :

- ✓ Il n'est plus possible de produire davantage de cette pièce sans que son ratio

$$\text{d'encours soit supérieur à 1. } \left[\left(\frac{W_{Vi} + Q_{Vi} + 1}{W_{V_max}} \right) \Big|_{V=?} > 1 \right]$$

- ✓ La quantité à produire de cette pièce a atteint la valeur maximale autorisée.

$$(Q_{Vi} \Big|_{V=?} = B_max)$$

- ✓ La somme des pièces à fort impact sur les machines critiques est atteinte. Dans ce cas, le ratio d'encours de chacune des pièces concernées sera pondéré.

$$(Q_{Ei} + Q_{Ci} + Q_{Fi} + Q_{mi} = V_i)$$

Bloc de mise en production

Ce bloc traite les pièces de façon à respecter la séquence dictée par la roue de la figure 5.2. Après la création du nombre d'entités dicté par la matrice Q_t (tableau 5.3), il assigne à chacune la gamme de fabrication qui lui convient. Il crée ensuite des lots par type de pièce en fonction des quantités à produire dictées par la matrice Q_t . Il ne produit donc qu'un seul lot de chaque type de pièce par semaine. Une fois le lot constitué, celui-ci est mis en production.

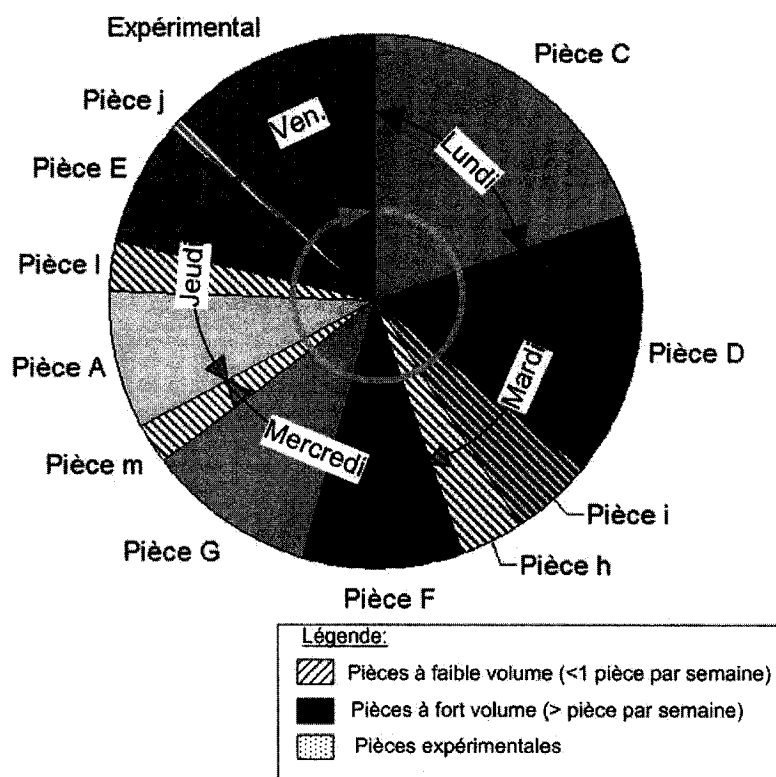


Figure 5.2 - Séquence de mise en production - Roue simulée

Note : Ce bloc traite les pièces expérimentales de la même façon que les autres pièces sauf qu'il les traite en lots uniques et qu'une gamme de fabrication leur est assignée de façon aléatoire. Une pièce expérimentale a environ 9% de chance de se voir attribuer la gamme de fabrication de la pièce A, C, D, E, F, G, h, i, j, l ou m.

Bloc d'exécution de production

Ce bloc simule le processus de fabrication en ayant recours à certaines variations décrites au tableau 5.4. C'est aussi ce bloc qui est utilisé pour modifier la méthode de gestion des files d'attentes. Dans le cadre de ce projet, les méthodes « premier entré premier servi »³¹ (First In First Out, FIFO) et « date de mise à disposition au plus tôt »³²

³¹ Les opérateurs/machines travaillent sur les pièces selon leur ordre d'arrivée dans la file d'attente.

(Earliest Due Date, EDD) seront utilisées. Les simulations n'ont recours qu'à une méthode de gestion des files d'attentes à la fois. Par exemple, si la méthode FIFO est utilisée, toutes les files d'attentes seront gérées de la sorte.

Tableau 5.4 - Détails des variables stochastiques modélisées

Processus	Loi	Paramètre	Paramètre
Temps d'une opération	LOI NORMALE	μ = temps théorique (figurant sur les gammes de fabrication)	$\sigma = 0,1 * \mu$
Temps de mise en course (par lot)	LOI NORMALE	μ = temps théorique (figurant sur les gammes de fabrication)	$\sigma = 0,1 * \mu$
Temps pour opération de service	LOI TRIANGULAIRE	(4,8,16) ou (4,16,24) selon le type d'opération	
Efficacité (facteur incluant les pertes de temps entre les quarts de travail, la maintenance, ...)		Fixé à 85% pour toutes les opérations de la cellule étudiée (excluant les opérations de service)	Fixé à 42,5% pour toutes les pièces expérimentales
Probabilité d'un problème de qualité lors de la production	LOI DISCRETE	0.05% besoin de refaire la dernière opération effectuée (rework)	0.01% pièce à mettre au rebut.

Bloc de consommation des pièces par la demande

Ce bloc est particulièrement important pour les pièces à fort volume, puisque c'est sur lui que repose l'exactitude des niveaux d'encours (W_{vt}). Pour ce faire, il conserve les pièces complétées, mais non consommées par la demande dans une file d'attente propre à un type de pièce. À chaque 24 heures, les pièces sont libérées et le simulateur réévalue

³² Les opérateurs/machines travaillent sur les pièces selon leur date de livraison sans tenir compte des ordres d'arrivée dans la file d'attente. Les pièces sont donc traitées de façon à prioriser celles qui doivent être livrées le plus tôt.

si une demande pour la pièce existe. Si c'est le cas, la pièce sort du système et l'entité est éliminée. Si ce n'est pas le cas, la pièce est renvoyée dans la file d'attente pour 24 heures et ainsi de suite.

Bloc d'avertissement de pénurie

Ce bloc est exécuté à la toute fin de la simulation. Avec les données recueillies pour les semaines 40 à 80, il identifie si toutes les demandes ont été satisfaites au moment voulu. Si c'est le cas la variable reste inchangée à 0 et si ce n'est pas le cas, donc s'il y a pénurie, elle est fixée à 1. En effectuant plusieurs répliques de la même simulation, cet indicateur permet d'obtenir la probabilité de pénurie.

5.3 Identification des W_v_max par simulation/optimisation

Pour identifier des valeurs d'encours limites par pièce à fort volume (W_v_max), nous avons eu recours à un module externe d'optimisation³³ utilisant l'algorithme *Tabu Search* de Fred Glover (1997). Cette tâche est particulièrement importante puisque les W_v_max constituent la seule variable décisionnelle du modèle. Des valeurs élevées entraîneront des inventaires colossaux alors que des valeurs trop petites feront que l'entreprise ne pourra répondre à temps à l'ensemble des demandes. De plus, le recours à des W_v_max trop petits ne permettra pas de tirer pleinement profit des caractéristiques de lissage de la charge intrinsèque au modèle.

Pour tenter d'identifier ces valeurs limites, nous avons utilisé 2 objectifs (critères) que nous avons appliqués aux simulations en utilisant la méthode FIFO ou EDD pour gérer les files d'attentes. Il aurait été possible de combiner ces deux critères et de poser la méthode de gestion des files d'attentes comme une variable décisionnelle. Néanmoins cela n'aurait pas permis d'obtenir une aussi bonne visibilité sur le fonctionnement du système.

³³ *OptQuest for Arena*

Les deux objectifs sont :

1. Critère 1

Trouver la combinaison de W_v_max de façon à minimiser leur somme sans entrainer de pénurie. (Appliqué sur simulation en FIFO et en EDD)

2. Critère 2

Trouver la combinaison de W_v_max de façon à minimiser la moyenne des inventaires de pièces finies mais non consommées par la demande entre les semaines 40 et 80 sans entrainer de pénurie. (Appliqué sur simulation en FIFO et en EDD)

Tableau 5.5 - Description des 4 optimisations effectuées

	Critère 1	Critère 2
FIFO	Optimisation #1	Optimisation #2
EDD	Optimisation #3	Optimisation #4

Quatre ordinateurs PentiumIV 3.2Ghz ont été utilisés pour une durée de 20 heures chacun pour mener à bien les 4 simulations/optimisations du tableau 5.5. Les optimisations suivaient le processus illustré à la figure 5.3.

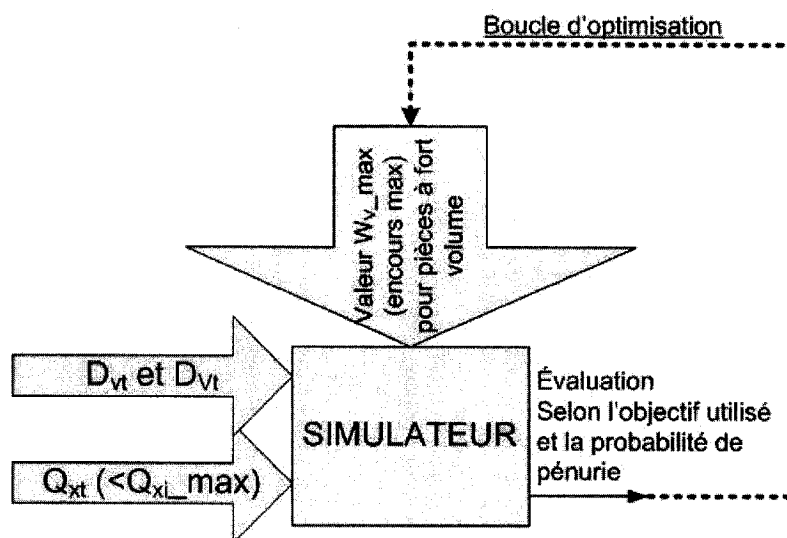


Figure 5.3 - Description schématique de la simulation

Les 4 simulations/optimisations ont rapidement convergé (dans les 5 premières heures de simulation) pour ensuite ne s'améliorer que très légèrement. À titre d'exemple, la figure 5.4 représente l'optimisation #1 qui est représentative des 3 autres.

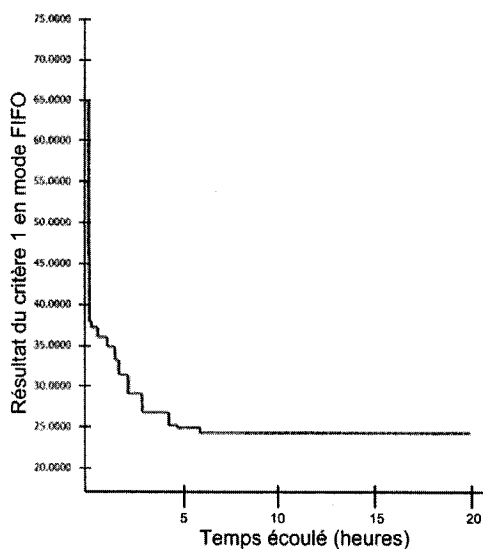


Figure 5.4 - Progression de l'optimisation #1

Nous avons ensuite retenu les 4 meilleurs scénarios de chacune des 4 optimisations. Le tableau 5.6 présente ces scénarios ainsi que les valeurs de la variable décisionnelle W_V max. Il permet aussi d'observer que les deux critères sont solidaires pour un mode de gestion des files d'attente donné puisque les simulations #1, #7, #8 ont été générées de façon indépendante par les critères 1 et 2, mais présentent les mêmes valeurs de W_V max.

Tableau 5.6 - Détails des simulations retenues

	W_V max						
	A	C	D	E	F	G	
Simulation #1	7	20	9	16	15	5	3 ^e meilleure simulation pour Critère1 en mode EDD + 3 ^e meilleure simulation pour Critère2 en mode EDD
Simulation #2	7	21	8	16	15	5	4 ^e meilleure simulation pour Critère1 en mode EDD
Simulation #3	7	21	9	16	15	5	2 ^e meilleure simulation pour Critère2 en mode EDD
Simulation #4	8	21	10	15	15	5	Meilleure simulation pour Critère2 en mode FIFO
Simulation #5	8	22	10	14	15	5	2 ^e meilleure simulation pour Critère2 en mode FIFO
Simulation #6	8	22	9	15	15	5	4 ^e meilleure simulation pour Critère2 en mode FIFO
Simulation #7	8	23	9	14	15	5	4 ^e meilleure simulation pour Critère1 en mode FIFO + 3 ^e meilleure simulation pour Critère2 en mode FIFO
Simulation #8	7	20	9	16	16	5	Meilleure simulation pour Critère1 en mode EDD + Meilleure simulation pour Critère2 en mode EDD
Simulation #9	7	21	9	14	16	5	Meilleure simulation pour Critère1 en mode FIFO
Simulation #10	7	21	8	16	16	5	2 ^e meilleure simulation pour Critère1 en mode FIFO + 2 ^e meilleure simulation pour Critère1 en mode EDD
Simulation #11	7	21	10	14	16	6	3 ^e meilleure simulation pour critère 1 en mode FIFO
Simulation #12	9	21	9	14	16	5	4 ^e meilleure simulation pour Critère2 en mode EDD

Ces 12 simulations ainsi que celles présentés au tableau 5.7 et ajoutées à des fins d'analyse ont été simulées avec 20 réplifications à l'extérieur du module d'optimisation pour pouvoir générer les résultats présentés au tableau 5.8.

Tableau 5.7 - Autres simulation analysées

	W_V max						
	A	C	D	F	E	G	
Simulation #13	9	22	11	16	16	6	Valeurs issues de la meilleure solution (simulation #4) incrémenté de 1
Simulation #14	15	23	10	19	26	7	Demande maximale sur 20 semaines * temps de mise à disposition (par pièce)

5.4 Résultats et Analyse – Sommaire des simulations

Tableau 5.8 - Sommaire des simulations

	ΣW_{it} Critère1		Inventaire* minimum (sem40 à 80)											Probabilité de pénurie	Inventaire Moyen						Somme des moy Critère2
			A	C	D	E	F	G	h	i	j	l	m		F	A	C	G	D	E	
Simulation #1	72	Premier Entré Premier Servis (FIFO)	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	80%	3,8	2,78	3,56	2,55	2,52	7,62	22,84
Simulation #2	72		1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	70%	3,77	3,69	4,25	2,55	2,17	7,58	24,01
Simulation #3	73		0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	70%	3,78	3,64	4,3	2,55	2,55	7,73	24,55
Simulation #4	74		0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	3,65	3,77	4,45	2,94	3,5	6,61	24,93
Simulation #5	74		0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	50%	3,58	3,77	5,45	2,55	3,51	5,88	24,74
Simulation #6	74		0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30%	3,79	3,79	5,36	2,94	2,48	6,61	24,96
Simulation #7	74		0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20%	3,76	3,78	6,31	2,55	2,51	5,9	24,81
Simulation #8	73		0	-1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	80%	4,65	2,78	3,56	2,55	2,51	7,74	23,79
Simulation #9	72		1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	70%	4,58	3,64	4,51	2,54	2,49	5,81	23,58
Simulation #10	73		0	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	60%	4,73	3,71	4,18	2,55	2,36	7,62	25,14
Simulation #11	74		1	-1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	70%	4,71	3,63	4,49	3,55	3,54	5,82	25,74
Simulation #12	74		1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	50%	4,69	4,74	4,46	2,55	2,55	5,81	24,8
Simulation #13	80		1	1	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0%	4,72	4,72	5,48	3,55	4,38	7,74	30,59
Simulation #14	100		7	2	1	11	4	2	0	0	0	0	0	0%	7,7	10,66	6,65	4,55	3,6	17,57	50,71
Simulation #1	72	Date de mise à disposition au plus tôt (EDD)	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	90%	3,89	2,79	3,56	2,55	2,56	7,46	22,8
Simulation #2	72		1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	80%	4,02	3,68	4,24	2,55	2,19	7,31	24
Simulation #3	73		1	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	70%	3,91	3,64	4,25	2,55	2,57	7,36	24,29
Simulation #4	74		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	50%	3,89	3,79	4,39	2,97	3,56	6,47	25,06
Simulation #5	74		0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	50%	3,75	3,77	5,46	2,55	3,51	5,71	24,75
Simulation #6	74		0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30%	3,82	3,78	5,37	2,94	2,51	6,41	24,84
Simulation #7	74		0	2	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	70%	3,97	3,78	6,24	2,55	2,51	5,73	24,78
Simulation #8	73		0	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	70%	4,98	2,78	3,5	2,55	2,51	7,47	23,79
Simulation #9	72		1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	60%	4,77	3,64	4,43	2,55	2,58	5,67	23,64
Simulation #10	73		0	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	50%	5,1	3,71	4,34	2,55	2,33	7,5	25,53
Simulation #11	74		1	-1	1	-1	1	1	0	0	0	0	0	80%	4,84	3,65	4,42	3,55	3,56	5,64	25,67
Simulation #12	74		1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	70%	4,83	4,77	4,47	2,55	2,51	5,66	24,79
Simulation #13	80		1	1	2	1	1	1	0	0	0	0	0	10%	4,97	4,75	5,43	3,55	4,42	7,6	30,72
Simulation #14	100		7	3	1	11	4	2	0	0	0	0	0	0%	7,98	10,67	6,66	4,55	3,58	17,41	50,84

* Inventaire = pièce d'encours complétée mais non consommée par la demande. (Une valeur négative indique une pénurie)

Le graphique de la figure 5.5 permet d'analyser les deux critères pour la simulation en mode FIFO. On peut y observer que la simulation #1 semble la meilleure puisqu'elle minimise les 2 critères. Néanmoins, dans le présent contexte, un risque de rupture de stock de l'ordre de 80% est simplement inacceptable. À cet effet on remarque que la probabilité de rupture est maximale lorsque les critères sont minimums. Nous concentrerons donc notre analyse sur le critère 2 et sur la probabilité de pénurie. En effet, le critère 1 n'a aucune valeur concrète et avait pour seul objectif d'augmenter le nombre de scénarios potentiels. En contre partie, le

critère 2 est un indicateur du niveau d'inventaire généré. Les inventaires entraînant un coût non négligeable, il est logique de chercher à les minimiser. À la lumière de ces critères, la simulation #4 est optimale. Les valeurs de WV_max qui y sont liées seront à la base de l'étude détaillée de la prochaine section.

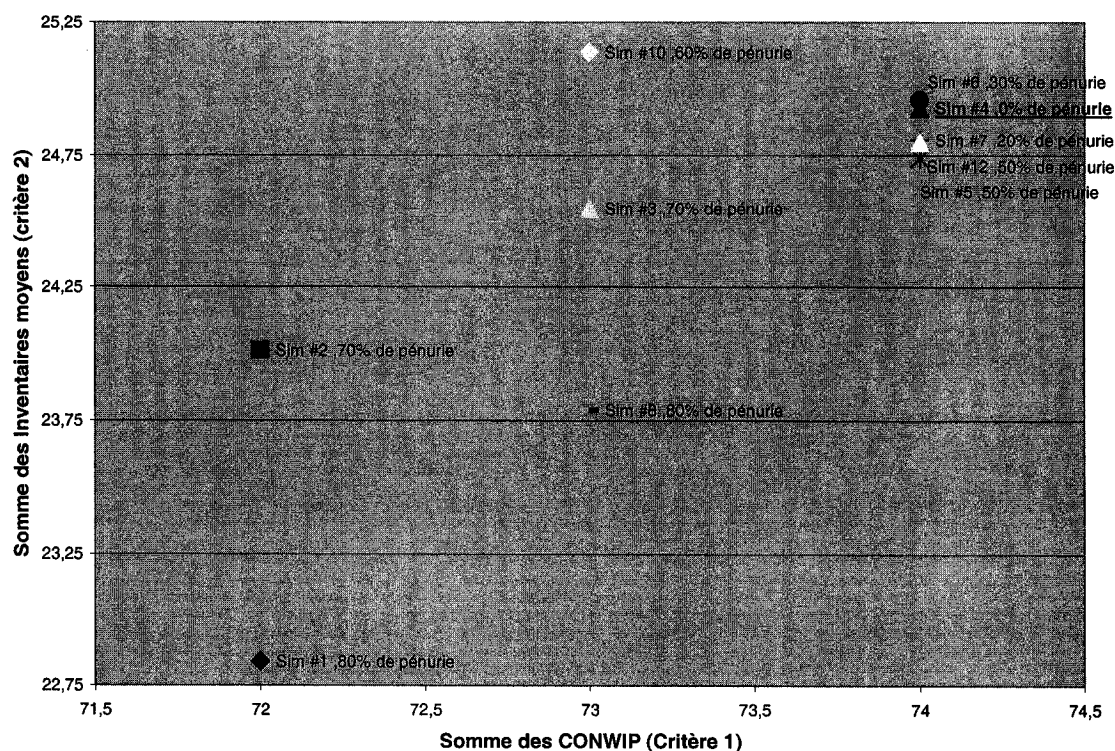


Figure 5.5 - Graphique Critère 1 vs Critère 2 pour simulation en FIFO

La figure 5.6 offre une vision globale des résultats. On peut y remarquer que la somme des inventaires moyens (critère 2) est relativement semblable selon qu'une simulation est effectuée en mode FIFO ou EDD. Ceci s'explique par la durée de la simulation. En effet puisque le critère 2 se base sur une somme de moyennes de 40 semaines, les variations sont largement amorties.

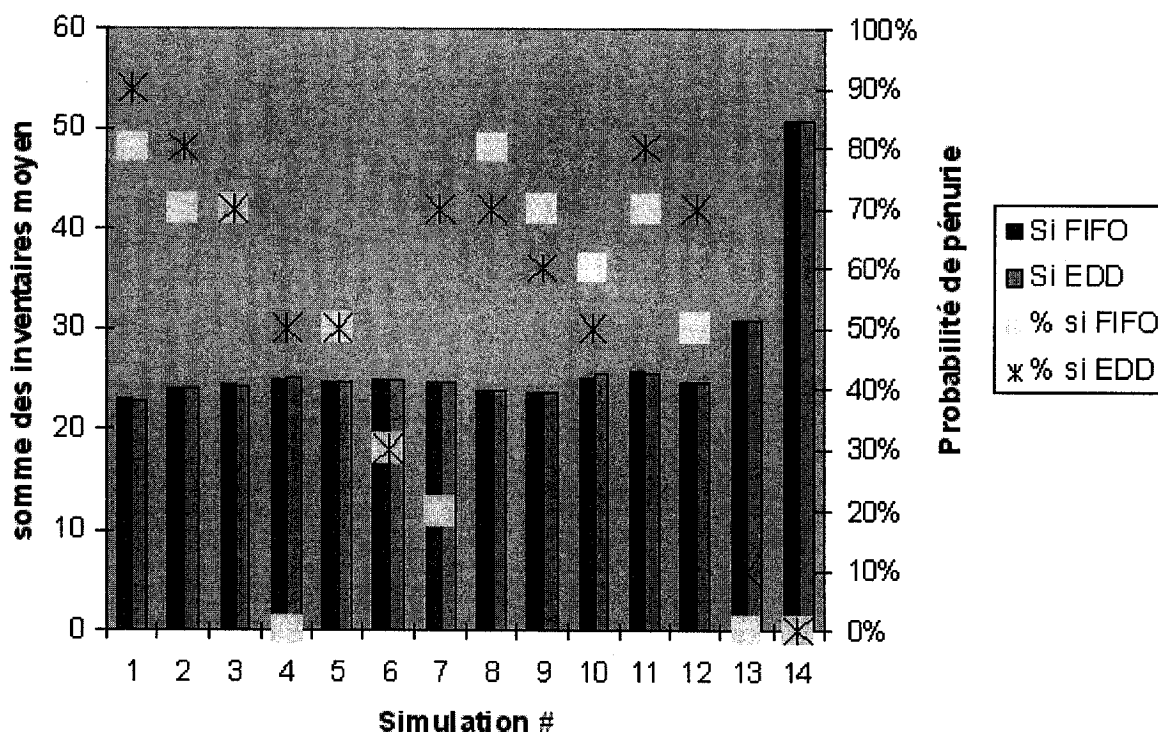


Figure 5.6 - Valeur des inventaires moyens et des probabilités de pénurie par simulation

Selon la méthode de gestion des files d'attente utilisée lors de l'optimisation, une méthode présente un risque de pénurie plus important que l'autre. On peut néanmoins remarquer que seul le mode FIFO offre un risque de pénurie nul pour une somme d'inventaires moyens inférieurs à 25.

A priori, cela peut paraître anormal que le minimum de pénurie soit atteint par une optimisation en FIFO puisque le EDD devrait diminuer les pénuries en favorisant l'exécution des pièces les plus urgentes. Dans les faits ce n'est pas le cas. Les pièces ayant des LT très différents, l'utilisation du EDD a pour effet de favoriser la fabrication des pièces ayant un très court LT repoussant la fabrication des pièces à long LT au tout dernier moment. Ne pouvant être complétées dans les temps, car dépassées par des pièces à plus court LT, ces pièces sont en retard et génèrent des pénuries. Cette

conclusion est tout aussi applicable à la gestion manuelle des priorités. Plus il y a une gestion manuelle des priorités, plus les pièces à long LT seront défavorisées.

Les valeurs de Wv_max minimums ne générant pas de pénurie sont indirectement liées à la demande. Si cette demande est ferme et connue avec exactitude lors du dimensionnement des Wv_max , il est possible d'avoir recours à des valeurs de Wv_max maximisant l'utilisation des ressources tout en minimisant les inventaires. Néanmoins si cette demande n'est pas certaine ou si l'on anticipe une croissance des demandes pour une pièce, il est intéressant d'augmenter la valeur de Wv_max de cette pièce pondérant ainsi le risque. En effet les valeurs issues de la simulation #4 représentent les minimums. Si l'on décide de les augmenter, on ne fera qu'augmenter l'inventaire et augmenter l'utilisation de la capacité disponible. À ce titre, la simulation #13 qui utilise les valeurs de Wv_max de la simulation #4 incrémentées de 1 présente toujours un risque de pénurie nul, mais engendre un inventaire moyen beaucoup plus important (30.59 au lieu de 24.93 pour la simulation #4).

5.5 Résultats et Analyse – Meilleur scénario (w_{v_max} optimum)

La simulation #4 génère la meilleure solution puisque c'est elle qui génère l'inventaire moyen le plus petit tout en présentant un risque de pénurie³⁴ nul en mode FIFO. Le tableau 5.9 présente le détail des quantités mises en production par le simulateur pour les semaines 40 à 60³⁵ ainsi que l'utilisation de la capacité disponible pour la production de pièces à fort volume. On remarque que l'effet de lissage de capacité est efficace puisque l'utilisation de la capacité disponible varie entre 42% et 100% avec une moyenne de 82%. On peut aussi observer que l'utilisation de la capacité est maximale durant les semaines 46 à 50 ce qui correspond à la période présentant la plus forte demande. Si la demande est forte, le système CONWIP-pièce réagit en utilisant la capacité disponible au maximum pour rebâtir les inventaires d'encours de pièces à fort volume.

³⁴ Risque qu'une pièce ne soit pas complétée à temps

³⁵ On utilise ici les semaines 40 à 60 plutôt que 40 à 80 pour des raisons de présentation.

Tableau 5.9 - Mise en production des pièces (Q_{Vt})

		Semaines																				
		40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
P I È C E S	A	2	0	0	1	0	3	0	1	3	2	2	0	1	1	1	4	0	4	0	1	0
	C	4	2	3	3	4	2	3	0	3	5	4	4	1	2	5	3	2	4	2	3	2
	D	2	3	1	3	3	2	1	0	1	3	2	3	3	3	2	4	3	3	2	1	4
	E	1	0	0	1	0	1	1	0	0	2	1	1	1	2	3	2	2	2	1	0	3
	F	1	0	2	1	2	0	2	0	2	1	0	3	0	3	3	0	2	2	2	1	1
	G	1	2	0	3	2	0	0	4	2	1	2	1	2	3	2	0	2	0	1	2	1
	h	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	1	1	0	0	0	2	0	2	0	2
	i	0	2	1	1	1	1	2	0	0	1	2	1	0	2	0	2	0	0	0	0	0
	j	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	l	2	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0
	m	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	EXP	0	4	2	1	0	2	4	4	3	2	3	0	0	1	1	2	3	2	2	1	2
Qt_max		18	8	12	15	18	14	7	5	11	14	11	16	19	14	18	13	11	15	12	15	12
$\sum_{V=A}^G Q_H$		11	7	6	12	11	8	7	5	11	14	11	12	8	14	16	13	11	15	8	8	11
Utilisation de la capacité		61%	88%	50%	80%	61%	57%	100%	100%	100%	100%	100%	75%	42%	100%	89%	100%	100%	100%	67%	53%	92%

Le tableau 5.10 présente les inventaires d'encours, c'est-à-dire le nombre de pièces terminées mais non consommées par la demande et donc toujours considérées dans les ratios d'encours³⁶. Bien que les inventaires ne soient pas souhaités pour les pièces à faible volume, ils sont préférables à une pénurie. C'est pourquoi on remarque que certains inventaires sont présents pour ces pièces. En effet, bien que le système tente de mettre ces pièces en production de façon à minimiser l'apparition d'inventaire, ceci peut arriver, car le système considère des temps de mise à disposition maximums. Ainsi, si le mix de production fait que les pièces à faible volume sont produites plus rapidement, un inventaire survient. Ce tableau présente aussi les ratios d'encours $[(Q_{VT} + W_V) + W_{V_max}]$ utilisés. On remarque que ces ratios sont élevés ce qui est le but visé. Le système est donc efficace pour allouer la capacité de production aux pièces qui en ont besoin puisque ce système ne génère aucune pénurie et conserve des inventaires les plus petits possible. On constate néanmoins que la pièce E génère un inventaire notable. Ceci peut s'expliquer par le long délai de mise à disposition de la pièce. En effet, la pièce E a un délai de mise à disposition (LT) moyen de 43 jours, ce qui est de loin le plus long LT des pièces simulées. Un fort inventaire est donc présent pour palier à tout problème de machine ou d'augmentation drastique de la demande pour cette pièce.

³⁶ Uniquement vrai pour les pièces à fort volume de production.

Tableau 5.10 - Inventaire généré et valeur des ratios d'encours

		Semaines																				
		40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
P I È C E S	A	5	7	6	5	4	3	5	2	1	2	4	6	4	4	1	2	3	3	6	5	5
	C	6	9	5	5	5	5	10	6	3	4	1	3	4	5	6	7	2	6	6	6	6
	D	3	4	4	6	3	8	8	7	4	3	3	2	2	3	2	1	2	7	5	3	2
	E	7	8	11	12	11	9	10	8	8	9	8	6	5	4	3	2	2	4	4	6	7
	F	5	3	5	7	6	4	5	7	6	5	6	5	4	3	2	4	1	2	4	2	3
	G	2	4	1	2	4	4	0	2	4	3	3	2	2	3	5	3	5	3	2	4	3
	h	2	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	1	1	0	0	0	2	0	2	0
	i	0	0	2	3	4	5	4	5	4	3	3	3	4	4	5	3	4	4	2	2	0
	j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	l	2	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0
	m	1	2	2	1	0	2	2	2	0	0	2	2	0	0	1	1	0	0	0	0	1
R A T I O S	A $\frac{Q_{A1} + W_{A1}}{8}$	88%	100%	88%	88%	88%	88%	88%	75%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	100%	88%	88%
	C $\frac{Q_{C1} + W_{C1}}{21}$	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	81%	76%	76%	86%	95%	95%	86%	95%	95%	90%	90%	95%	95%	95%
	D $\frac{Q_{D1} + W_{D1}}{10}$	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	100%	80%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
	E $\frac{Q_{E1} + W_{E1}}{15}$	93%	100%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	80%	80%	87%	93%	93%	87%	93%	93%	93%	93%	93%	100%	93%
	F $\frac{Q_{F1} + W_{F1}}{15}$	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	87%	80%	87%	87%	93%	93%	87%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%
	G $\frac{Q_{G1} + W_{G1}}{5}$	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	100%	100%	80%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	80%	80%	100%

Le tableau 5.11 présente les valeurs minimales, moyennes et maximales des inventaires pour la période des semaines 40 à 60 ainsi que 40 à 80. On peut y constater (figure 5.7 à l'appui) que les inventaires sont proportionnels au temps de mise à disposition. Comme discuté plus haut, ceci est en accord avec la raison d'être des inventaires. De plus, comme les inventaires minimums varient entre 0 et 1, on peut considérer les inventaires comme étant minimums et les W_{V_max} comme étant optimums.

Tableau 5.11 - Sommaire des inventaires

Pièces à fort vol.	LT (jours)	Inventaire minimum		Inventaire Moyen		Inventaire Maximum	
		semaines		semaines		semaines	
		40~60	40~80	40~60	40~80	40~60	40~80
A	19	1	0	3,95	3,95	7	7
C	23	1	0	5,14	4,88	10	10
D	12	1	1	3,76	3,80	8	9
E	43	2	1	6,90	6,80	12	12
F	31	1	0	4,10	3,83	7	7
G	9	0	0	2,90	2,90	5	5

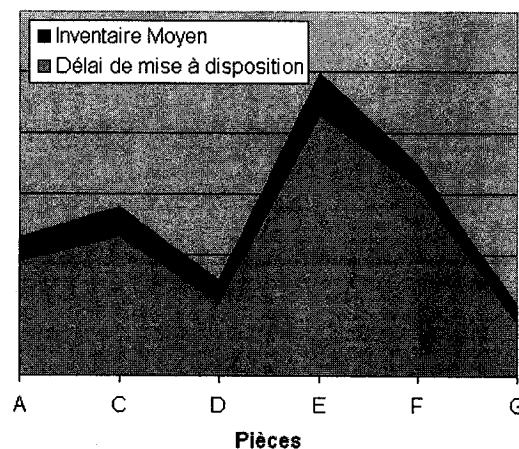


Figure 5.7 - Tendance Inventaire Moyen vs LT

De façon à comparer la performance du modèle développé dans ce travail, nous avons aussi simulé la gestion de production en suivant la méthode actuellement utilisée par l'entreprise. Si l'on compare les résultats de la simulation #4 avec la situation actuelle décrite à la section 1.1.3, on remarque que le nombre de pièces mises en production n'est que très légèrement inférieur dans la situation actuelle. On remarque aussi que la charge sur la cellule est beaucoup plus constante dans la simulation #4. Cela se traduit par un temps d'attente devant les machines critiques de 24% inférieur et un nombre de pièces en attente inférieur de 27% ce qui est directement lié à la limitation de l'encours.

5.6 Recherche d'une loi régissant W_v_max

Compte tenu des avantages liés à l'utilisation de cette nouvelle méthode de planification de la production, il serait intéressant de dériver une équation globale permettant de déterminer les valeurs que doivent prendre W_v_max . Si l'on observe la figure 5.8, on remarque qu'il n'est pas possible d'établir de corrélation directe entre la proportion d'encours autorisé par pièces (simulation #4) et la proportion de la demande qu'elle est censée représenter. Plusieurs autres facteurs ont été considérés pour tenter d'établir une telle relation, mais sans succès. La valeur la plus proche des valeurs optimales est représentée par la simulation #14 et est tirée de l'équation $W_v_max = D_v_max * S_{vt}$ où D_v_max est la valeur maximale de la demande sur un horizon de 20 semaines et S_{vt} le temps de mise à disposition de la pièce en semaine. Néanmoins, avec un encours moyen de 50.71 (en opposition à 24.93 pour la simulation #4), cette technique de dimensionnement des CONWIP-pièce est beaucoup moins performante. De plus amples recherches devront donc être effectuées pour arriver à dériver une telle loi.

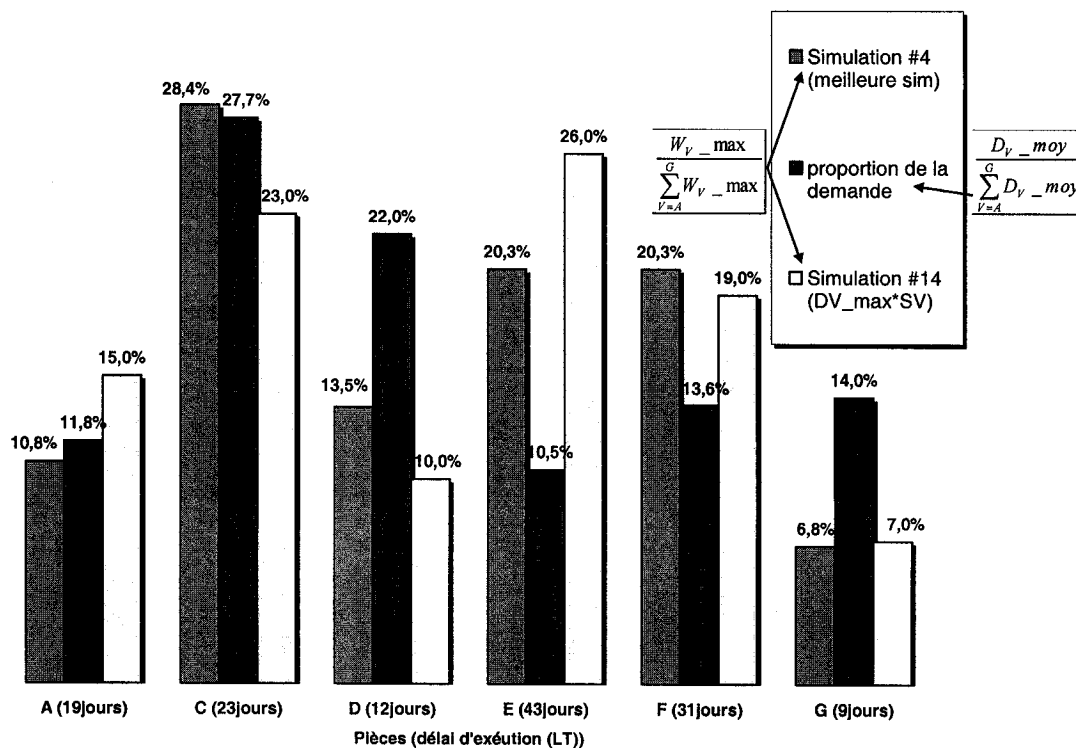


Figure 5.8 - Étude de la solution retenue

5.7 Résultat final de la simulation

Les résultats de la simulation permettent de valider le modèle proposé au chapitre 4. En effet, ils démontrent qu'il est utile d'avoir recours à la méthode de planification de production proposée. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation permet même d'obtenir des valeurs de dimensionnement d'encours maximum (W_v_max) extrêmement proches de l'optimum (inventaire minimum = 0 pour 4 des 6 pièces, voir tableau 5.11).

CHAPITRE 6 : DISCUSSION

Le système de planification de la production développé au chapitre 4 et validé par simulation au chapitre 5 nous semble très prometteur. Il est à notre connaissance le premier système à tenir compte de la capacité et des machines critiques à l'échelle d'une cellule manufacturière, en considérant différemment les pièces selon leur type et leur volume de production et en représentant graphiquement la mise en production. Ce modèle offre plusieurs avantages que nous détaillerons ici.

6.1 *Avancement des connaissances*

Modèle hybride gérant la planification de la production d'une cellule manufacturière

Le modèle repose sur une approche hybride jamais explorée dans la littérature. En effet le système permet de tirer profit du contexte manufacturier plutôt que d'en souffrir. Selon nous, le système ne pouvait pas reposer sur une approche exclusivement en *flux tirés* (FT), car, comme le soulignent Huang et al. (1983), une telle technique n'est pas économiquement viable dans un contexte de fortes variations de la demande. Bien qu'un système à *flux poussés* (FP) soit mieux adapté à ces fluctuations (Rees et al. 1989 et Sarker et al. 1989), le modèle ne pouvait pas non plus s'en inspirer entièrement car il est apparu impossible d'établir une validation de capacité adéquate. En effet, en accord avec Plossl (1994), Turner (1991) et Pandey et Ahsan (1997), nous pensons que, bien que l'Étude Sommaire de Capacité (ÉSC) soit adaptée à des variations de demande, elle est incapable de fonctionner dans un environnement manufacturier complexe où une grande mixité de production engendre des temps de mise à disposition très variables.

Le modèle hybride est donc particulièrement intéressant car, à notre connaissance, il est le premier à intégrer des concepts de capacité finie dans une approche ayant recours aux flux tirés et poussés. Suites aux études de Turner (1991) et Schutz (2002), il nous est

apparu clair que seule une approche globale par contraintes pouvait permettre une validation implicite de la capacité. C'est pourquoi une contrainte globale représentant la capacité agrégée de la cellule est présente dans le modèle. Cette contrainte représentant la quantité maximale de pièces pouvant être mises en production est complétée par une contrainte visant à limiter les pièces à forte charge sur les machines critiques et par diverses contraintes de capacité visant à empêcher des variations extrêmes dans le mix de production. Ces contraintes permettent au modèle de s'approcher d'une planification à capacité finie sans pour autant avoir à gérer et à tenir à jour un grand nombre de contraintes complexes comme c'est le cas dans les systèmes à capacité finie existants.

Modèle en « push » gérant la production des pièces expérimentales et des pièces à faible volume

Compte tenu du coût des pièces fabriquées, nous avons limité la création d'inventaire aux pièces à fort volume. La limite entre faible et fort volume est basée sur la demande, mais pourrait tout aussi bien tenir compte d'autres facteurs propres à chaque entreprise.

Comme discuté plus loin, le modèle reconnaît le caractère particulier des pièces expérimentales. Puisque, par définition, on ne dispose pas d'un historique de production pour ces pièces, le modèle n'a pas recours aux dates de livraison lors de la planification. Il repose plutôt sur les ingénieurs de développement. En effet, c'est à eux qu'incombe la responsabilité de réserver un créneau de mise en production pour leurs pièces. Le modèle en assurera la production en assurant une capacité suffisante.

Le traitement des pièces à faible volume a recours aux dates de livraisons et aux temps de mise à disposition (LT). Bien que ce recours ne soit pas souhaitable puisque ces LT varient en fonction de la charge sur la cellule, cette méthode est le seul moyen de réduire au minimum la création d'inventaire pour ces pièces sans jamais générer de pénurie. De plus, grâce au mécanisme de lissage de la charge et de capacité finie du modèle, une stabilité en production devrait permettre de diminuer les variations des LT.

Finalement, puisque les pièces expérimentales et les pièces à faible volume ne représentent qu'une partie mineure de la charge sur les cellules, le modèle simplifie grandement leur production en ne refusant aucune demande. Le modèle variera plutôt les quantités de pièces à fort volume à produire. Puisque l'on tolère un inventaire pour ces dernières, elles sont capables d'absorber les variations.

Modèle basé sur CONWIP gérant la production des pièces à fort volume de production

De façon à tirer profit de la capacité non utilisée durant les périodes creuses et à absorber les variations dans les quantités de pièces expérimentales et à faible volume, le modèle crée des inventaires de produits non finis, ce qui est en accord avec les travaux de Kelkar (1999) et Ashaveri et Selen (2005) sur l'optimisation de la capacité de production.

Pour ce faire, le recours à une gestion en FP a été écartée car les « *safety stock* » présents dans la plupart des systèmes MRP ont tendance à automatiser la génération de demandes inadéquates (Loren et al. 1989 Duccan 1998). En contre partie, nous pensons comme Krajewski (1987) que les systèmes à FT sont le meilleur moyen de gérer des inventaires de produits non finis. La technique par CONWIP, qui selon plusieurs auteurs est la meilleure technique de flux tirés, a donc été retenue pour gérer les inventaires. En accord avec cette technique, les inventaires de pièces à fort volume sont considérés comme de l'encours et non comme des inventaires purs et simples.

De façon plus précise, le système basé sur la maximisation des ratios d'encours, développé pour décider des quantités de pièces à fort volume à mettre en production, présente des similitudes avec le modèle de Framinan et al. (2005) pour son aspect dynamique. Néanmoins il utilise une approche par pièce plutôt que par ligne de production comme le fait le système de Fariman et ceux de Spearman et al. (1989) et de Hopp et al. (1996). L'approche par ligne est généralement utilisée pour gérer la capacité

d'un ensemble de machines, mais ce n'est pas nécessaire dans le cas présent car cette tâche est déjà effectuée par le système hybride et ses contraintes de capacités. Grâce à ces ratios, il est possible d'utiliser la capacité de production à son maximum tant que la demande le justifie. Ainsi, comme représenté à la figure 6.1 un nivellement par anticipation s'effectue de façon intrinsèque.

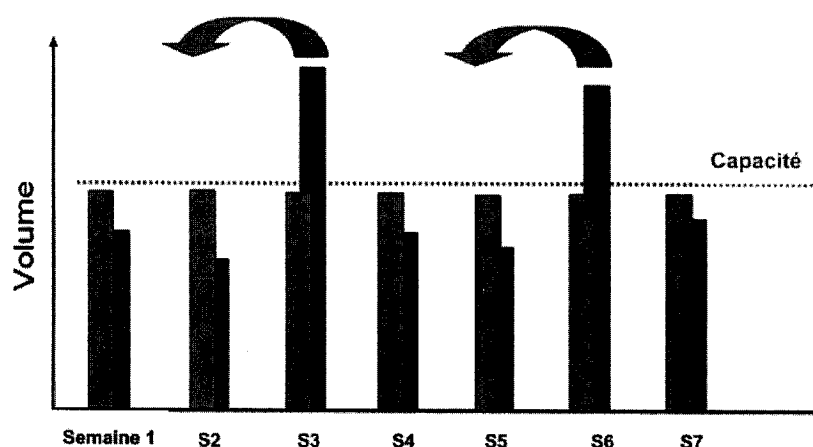


Figure 6.1 - Nivellement par anticipation pour les pièces à fort volume

6.2 *Avantage pour la R&D*

En reconnaissant à l'expérimental un caractère particulier, ce qui est fait par l'utilisation du facteur de 2,5, on limite grandement le recours à la gestion manuelle des priorités. Ce facteur reconnaît donc le fait que les pièces expérimentales passeront plus de temps en inspections et auront besoin d'outils et de fixtures différents de ceux servant aux pièces standards. Si, en plus, le modèle présenté à la section 4.3.2 relatif à la gestion des cellules de services est implanté, le traitement des pièces expérimentales ne sera que meilleur.

Le traitement réservé aux pièces expérimentales par le modèle permet d'avoir un contrôle sur ces dernières tout en facilitant le travail des ingénieurs de R&D. En effet, comme leur position dans la roue est fixe, elle seront mises en production le même jour

durant chaque campagne de production. Seules les quantités à produire varieront. Les ingénieurs de développement pourront mieux préparer la fabrication de leurs pièces. Ils n'ont plus besoin de négocier la production de leurs pièces, ils n'ont plus qu'à réserver la capacité (en nombre de pièces) dont ils auront besoin. Si pour une raison donnée un nombre plus ou moins important de pièces expérimentales devait être mis en production, des ajustements dans les quantités de pièces à fort volume peuvent être effectués. Comme les pièces à fort volume dispose d'inventaire, cela ne compromettra pas le risque de pénurie. La flexibilité exceptionnelle offerte par cette possibilité constitue un des principaux atouts du modèle.

6.3 Autres avantages

Le modèle proposé ne demande aucun changement de configuration d'usine pour être appliqué. Il a aussi l'avantage de ne pas toucher aux leviers de flexibilité disponibles. Il sera toujours possible d'avoir recours à des heures supplémentaires, à la sous-traitance ou aux gammes alternatives si le contexte l'exige. Néanmoins, comme la charge est lissée par le système à FT régissant les pièces à fort volume, ces recours devraient être réduits au minimum.

Le modèle est intéressant à la fois pour les gestionnaires, car il permet de mieux utiliser la capacité de production disponible, et pour le personnel de production car il est simple et offre une logique facile à comprendre en opposition au système *Programme Directeur de Production/Planification des Besoins Matières* généralement utilisé. En effet, il est facile de constater les niveaux d'encours sur le plancher et ainsi de comprendre les quantités de pièces à fort volume mises en production. Le recours à une représentation par roue permet également de comprendre la séquence de mise en production des pièces. Finalement, l'expertise du personnel de production est mise à contribution pour l'établissement et la révision des constantes du modèle (taille de lot maximum, nombre de pièces totales pouvant être mises en production, quantité maximale de pièces

expérimentales, machines à considérer comme critiques, ...). Nous pensons, comme Edson et Corel (1998), que cette contribution est essentielle pour obtenir des limites de capacité réalistes. Cela permet aussi un raffinement du modèle avec le temps, puisque les principaux acteurs (le personnel de production) sont directement chargés de la mise à jour des divers paramètres.

En intégrant l'ensemble des demandes de production (fermes et prévisionnelles³⁷) dans un modèle hybride à *flux tirés* pour les pièces à fort volume et à *flux poussés* pour les pièces à faible volume et expérimentales, on obtient une planification de la production intégrée. Ainsi, comme on peut le constater à la figure 6.2 en opposition à la figure 1.1 présentée à la section 1.1.2 (page 9), l'ordre de mise en production des pièces est planifié de façon logique et plus proche de l'optimum. Cela permet aussi d'optimiser les temps de mise en course en maximisant les tailles de lots. Bien que limité par une valeur maximale, les tailles de lots sont variables, ce qui est nettement plus avantageux que les tailles de lots fixes présentes dans les systèmes MRP et décrites par Blackstone (1989). Ainsi il est possible de gérer la production en optimisant la capacité disponible sans pour autant fabriquer des pièces de façon incontrôlée. Les pièces produites à l'aide du modèle sont des pièces dont l'entreprise a besoin. Le modèle est beaucoup plus raffiné qu'une simple fabrication sur stock. En considérant les pièces complétées comme de l'encours jusqu'à ce qu'elles soient consommées par la demande, le système limite la fabrication des pièces inutiles, mais reste extrêmement réactif et tire profit des avantages de la gestion par *flux tirés*, en optimisant l'utilisation de la capacité disponible.

³⁷ Demandes de réservation de capacité à des fins expérimentales

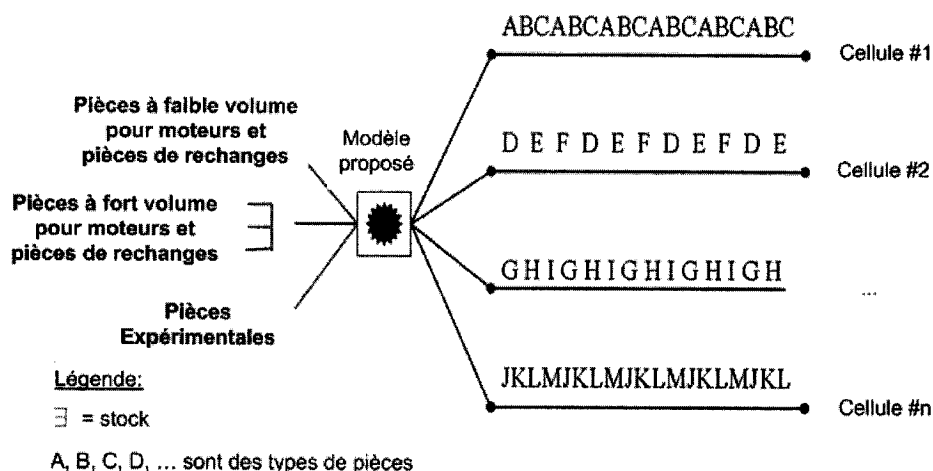


Figure 6.2 - Intégration des demandes

Finalement, dans le cas spécifique de l'industrie aéronautique, nous pensons que le système proposé générera une production beaucoup plus constante que tout autre système. En effet, la reconnaissance du caractère particulier des pièces expérimentales couplée à diverses contraintes de capacité et au système à flux tirés précédemment discuté devrait réduire la gestion manuelle des priorités. De surcroît, si la méthode de gestion des cellules de service présenté à la section 4.3.2 est appliquée, nous pensons qu'un gain notable dans la productivité sera enregistré. Comme nous l'avons constaté au chapitre 5 une gestion manuelle des priorités s'apparentant à la gestion des files d'attentes par EDD³⁸ ne fait qu'engendrer des perturbations puisque les pièces à long LT se font constamment « dépasser » par les autres pièces et ce jusqu'à ce qu'elles deviennent elles-mêmes critiques. L'application du modèle visant les cellules de service pourrait réduire l'encours et les variations de LT, ce qui permettrait une meilleure planification des pièces à faible volume.

³⁸ *Earliest Due Date*

6.4 Limites

Les principales limites du modèle résident dans sa validation. En effet, la validation effectuée utilise un modèle informatique. Or cela constitue d'avantage une vérification de son comportement et une étude de sa robustesse face à diverses variations aléatoires qu'une validation proprement dite de son efficacité. D'un autre coté, l'implantation du modèle dans une usine représente des risques non négligeables. Un ensemble de problèmes d'intégration et de gestion du changement peuvent venir perturber une telle implantation. La non existence de procédure d'implantation et de validation sur le terrain, même de façon limitée, rend donc extrêmement difficile la validation du modèle. Néanmoins, seule une telle aventure pourrait permettre de déterminer si les caractéristiques de réservation de capacité à des fins expérimentales satisfont réellement et efficacement aux exigences des ingénieurs de développement.

6.5 Travail restant à accomplir

Avant de pouvoir implanter le modèle, plusieurs étapes restent à accomplir. Il est important d'étudier plus à fond les diverses possibilités d'intégration du modèle dans les systèmes informatiques en place. Comme tout changement dans ces systèmes peut engendrer des problèmes majeurs de fonctionnement d'une entreprise, il est important d'en étudier soigneusement les risques. De façon à minimiser ces derniers, une nouvelle technique de validation devra peut-être être développée. Cette dernière devra aussi permettre de générer suffisamment de données pour pouvoir tenter d'établir une équation empirique du dimensionnement des valeurs d'encours maximum.

CONCLUSION

Suite à l'invitation d'une entreprise aéronautique qui souhaitait améliorer son processus de planification de la production et dans le cadre d'un projet de maîtrise, nous avons été amenés à proposer un nouveau modèle de planification de la production. Pour cela, nous avons fait une étude en profondeur du système de gestion de production en place dans l'entreprise. Nous avons étudié une de ses usines pour comprendre les différents mécanismes impliqués, tout en considérant les particularités de l'industrie.

Sur la base de la revue de littérature réalisée, il est apparu essentiel d'intégrer des concepts de gestion de la production en *flux tirés* (FT) dans un nouveau système de planification de production car les systèmes à FT permettent d'avoir un meilleur contrôle sur les inventaires et les encours. Néanmoins, si le nouveau modèle de planification doit incorporer certains concepts de *flux tirés*, ceci est impossible pour l'ensemble des demandes car elles sont trop différentes. Pour palier à ces incompatibilités tout en profitant des avantages des systèmes en *flux tirés*, nous avons développé une nouvelle technique de *flux tirés* qui vient s'intégrer à un système hybride *flux poussés/flux tirés* gérant l'ensemble des demandes. Le nouveau système en *flux tirés* proposés se base sur le système à encours constant (CONWIP), mais n'utilise pas d'inventaire intermédiaire entre les centres de travail et se limite aux pièces à fort volume de production.

Ce modèle hybride constitue un des premiers systèmes pour cellules de production permettant de tirer pleinement profit des avantages de la production en *flux tirés* sans négliger le contexte particulier de l'industrie aéronautique. Ainsi, il offre une flexibilité inégalée mais contrôlée relativement à la production de pièces expérimentales en plus de s'assurer de ne pas mettre plus de pièces en production que ce que la cellule est réellement capable de produire. Finalement, en n'étant qu'indirectement contrôlé par la demande, le traitement des pièces à fort volume permet de lisser la charge de production

des cellules de façon à tirer profit des périodes où la capacité de la cellule ne serait pas complètement utilisée. Ainsi, le modèle développé dans ce mémoire permet de réserver de la capacité à des fins expérimentales tout en nivelant la production en tolérant un petit inventaire d'encours pour les pièces standards à fort volume complétées mais non consommées par la demande.

Ce modèle apparaît fort prometteur puisqu'il propose une approche novatrice permettant la planification de la production à faible volume et devant supporter une très grande mixité des temps de mise à disposition et de demande. Néanmoins certaines résistances du personnel de production pourraient survenir puisqu'il constitue un réaménagement en profondeur du processus de gestion de la production.

Bien que validé par simulation, ce modèle n'a pas passé le test de la réalité. Nous sommes confiants que cette étape se réalisera avec succès et permettra de mieux analyser son fonctionnement et éventuellement de dégager une loi empirique pour déterminer les niveaux d'encours maximum autorisés par pièce. De plus, bien que ce modèle ait été développé pour être applicable dans une entreprise aéronautique, son fonctionnement reste simple et paraît applicable à toutes les industries manufacturières organisées en aménagement cellulaire et ayant une production à faible volume mais présentant une forte mixité et ayant des besoins de réservation de capacité à des fins expérimentales.

Dans un contexte de volatilité de la demande où les entreprises sont réticentes à investir leurs profits pour augmenter la capacité de production, nous pensons que ce modèle simple et efficace permettra de tirer le maximum des installations existantes tout en facilitant la vie du personnel responsable de la production des pièces expérimentales.

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

ACORD, T. (1998). The seven ways of waste. FDM. V. 70, N. 13. page 124-5

AGGARWAL, C. (1985). MRP, JIT, OPT, FMS – Making Sense of Production Operations Systems, Harvard Business review, September-October. P. 8-16

ASHAYERI, J. SELEN, W. (2005). An application of a unified capacity planning system. International Journal of Operations & Production Management Vol. 25 No. 9, pp. 917-937

BARD, J. GOLANI, B. (1991). Determining the number of kanbans in a multi-product, multistage production system. International Journal of Production Research. Vol 29. p. 881-895

BEDARD, D. (2005). Le pilote de Pratt & Whitney Revue Commerce. Vol. : 106 N° 4. page 14-20

BITRAN, G. CHANG, L. (1987). A mathematical programming approach to a deterministic kanban system. Management Science. Vol 33. No 4. p. 437-441

BLACKSTONE, John H. (1989). Capacity management. Cincinnati: South-Western Publishing Co. 273p.

BONVIK, A. GERSHWIN, S. (1996). Beyond kanban: Creating and analyzing lean shop floor control policies. *Manufacturing and Service Operations Management Conference*. Tuck School of Management, Dartmouth College.

BOTTA-GENOULAZ, V. MILLET, P. (2005). A classification for better use of ERP systems. Computers in Industry V56. Issue 6 p. 573-587

BUFFA, S. (1983). Modern Production/ Operations Management. 7th ed. John Wiley & Sons Inc. 681p.

BUZACOTT, J. A. (1989). Queuing models of kanban and MRP controlled production systems. *Engineering Cost and Production Economics* **17**: 3-20.

CHANG, D. LEE, S. M. (1995). Impact of JIT on organizational performance of US firms. *International Journal of Production Research*. Vol33. page 3053-3068

CONNOR, G. (2003). Benefiting from six sigma . *Manufacturing Engineering*. Vol.130, N° 2; pg. 53-60

CORRELL, J. (1998). Gaining control : capacity management and scheduling. 2nd ed. US: John Wiley & Sons, Inc. 269p.

DAVIS, M., AQUILANO, N., CHASE R., BALAKRISHNAN, J. (2005), *Fundamentals of Operations Management Canadian Edition* (First Edition, McGraw-Hill Ryerson)

DAVIS, W. STUBITZ, S. (1987). Configuring a Kanban System Using a Discrete optimisation of Multiple Stochastic Responses. *International Journal of Production Research*. Vol 25. No. 5. p. 731-740.

DEFEO, J. (2001). The tip of the Iceberg . *Quality Process*. Mai 2001. p. 29-37

DELEERSNYDER, J. HODGSON, T. MULLER, H. O'GRADY, P. (1989). Kanban Controlled Pull Systems: An Analytic Approach. *Management Science*. Vol 35. No. 9. p. 1079-1091

DELEESNYDER, J., HODGSON, T. KING, R. SAVVA, A. (1992). Integrating Kanban Type Pull Systems and MRP Type Push Systems: Insights from a markovian Model. *IIE transactions*. Vol 24. No 3. p. 43-56

DELLERY, Y. and LIBEROPOULOS G. (1995). A new kanban-type pull control mechanism for multi-stage manufacturing systems. Proceedings of the 3rd European Control Conference, Rome, Italy: 3543-3548.

DUGGAN, Kevin J. (2002). Creating mixed model value streams; Practical lean techniques for building to demand. Productivity press.

DUNCAN, W. (1998). Just-in-Time in American manufacturing. (Society of Manufacturing Engineers, MI, USA)

EUNGAB, K. MARK, P. OYEN, V. (1998). Finite-capacity multi-class production scheduling with set-up times. IIE Transactions. 2000; 32. P. 807-818

FAA. (2002). AVIATION SAFETY STATISTICAL HANDBOOK Washington : FAA

FARIA, J, MATOS, M. NUNES, E. (2006). Optimal design of work-in-process buffers. International Journal of Production Economics, vol. 99, issue 1-2, pages 144-155

FLIGHT INTERNATIONAL. (1998). Lean on the line. Flight International. 26/08/98 (Version web consulté le 15 décembre 2005)

FRAMINAN, J. GONZALEZ, P. RUIZ-USANO, R. (2005). Dynamic card controlling in a Conwip system. International Journal of Production Economics. Vol 99. p. 102-116.

GERAGHTY, J. HEAVEY, C. (2004). A comparison of Hybrid Push/Pull and CONWIP/Pull production inventory control policies. Int. Journal of Production Economics. Vol 91. p. 75-90

GLOVER, F. (1997). Tabu search. Boston : Kluwer Academic Publishers. 382p.

GOLDRATT, M., COX, J. (1984) *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. Croton-on-Hudson, New York : North River Press. 262p.

GROENEVELT, H. KARMARKAR, U. (1988). A dynamic kanban system case study. *Production and Inventory Management Journal*. 29. p. 46-51

GSTETTNER, S. KUHN, H. (1996). Analysis of Production Control Systems kanban and CONWIP. *International Journal of Production Research*. Vol 34. No. 11. p. 3253-3273.

GUPTA, S. (1999). Flexible kanban system. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 19 No. 10 pp1065-1093

HALL, R. (1981). *Driving the Productivity Machine: Production Planning and Control in Japan*. American Production and Inventory Control Society Inc.

HALL, R. (1983). *Zero Inventories*. Homewood. Illinois: Dow-Jones Irwin

HODGSON, T. WANG, D. (1991). Optimal Hybrid Push/Pull Control Strategies for a Parallel Multistage System: Part I *International Journal of Production research*. Vol 29. No. 6. P. 1279-1287

HOPP, W. SPEARMAN M. (1996). *Factory Physics: Foundation of manufacturing Management*, Irwin.

HUANG, P. REES, L. TAYLOR, B. (1983). A Simulation Analysis of the Japanese Just-in-Time technique (with Kanbans) for a Multiline, Multistage Production System, *Decision Sciences*. Vol. 14, p. 326-344

IATA. (2004). *IATA Safety report*. Switzerland: IATA

IATA. (2005). *IATA 2005 Annual Report*. Switzerland: IATA

IM, JH, SCHONBERGER, RJ. (1988). The pull of kanban. *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 29 No.4, pp.54-8

INVISTICS. (2004). Adapting LEAN manufacturing for a High Mix Environment Using Flow Path management – A White paper. <http://www.invistics.com/>

KELKAR, A. (1999). A JIT Implementation using Hybrid Kanban-Conwip Modeling Approach. 122p. Thèse de doctorat en genie industriel. Université de Regina.

KRAJEWSKI, L. KING, B. RITZMAN, L. WONG D. (1987). Kanban, MRP, and Shaping the Manufacturing Environment. Management Science. Vol 33. No 1. p. 39-57

LANDERS, T. BROWN, W. FANT, E. MALSTROM, E. SCHMITT, N. (1994). Electronics manufacturing processes. Prentice-Hall Inc. USA

LEARMOUNT, D. (2006). Fatalities, accidents up sharply in 2005. Flight International. 29/12/05 (Version web consulté)

LOVELL, M. (1992). Simulating a 100% Just-In-Time Economy. International Journal of Production Economics. Vol 26. p. 71-78

MONDEN, Y. (1993). Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time. Industrial Engineering and management Press. Institute of Industrial Engineers. Norcross, Georgia.

MONDEN, Y. (1984). A Simulation Analysis of the Japanese Just-In-Time technique (with Klanbans) for a Multiline, Multistage Production System: A Comment. Decision Sciences, Vol 15. p. 445-447

MORRISON, M. (2006). Forecasts 2006 Summary: The only way is up. Flight International. 03/01/06 (Version web consulté)

OHNO, T. MITO, S. (1988). Jus-In-Time for Today and Tomorrow. Cambridge: Productivity Press

OLEXA, R. (2003). Jetting to success. Manufacturing Engineering; 130; 5. P. 97-102

OLRLICKY, J. (1975). Material requirements planning; the new way of life in production and inventory management. McGraw-Hill Inc. 292p.

PANDEY, PC. AHSAN, M. HASIN, A. (1997). Integration of Rough-cut-capacity planning with manufacturing resource planning. International Journal of Computer Applications in Technology. V.10 N.5. 1997. P.271-279

Petty, PJ. STIRLING, M D. TRAVIS, LC. BENNETT, R. (2000). Conditions for the successful implementation of finite capacity/ MRPII hybrid control systems Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; 214, 9. P.847-851

PHILIPOOM et al. (1996). Simultaneously determining the number of Kanbans, container sizes and final assembly sequence of products in a JIT shop. International Journal of Production Research. Vol 34. p. 51-69

PLOSSL, G. WELCH, W. (1979). The role of top management in the control of inventory. Reston, Va. : Reston Pub. Co. 179p.

PLOSSL, G. (1994). Orlicky's material requirements planning. 2nd ed. McGraw-Hill Inc. 311p.

REES, L. PHILIPOOM, P. TAYLOR, B. HUANG, P. (1987). Dynamically Adjusting the Number of Kanbans in a JIT Production System Using Estimated Values of Lead time. IIE Transactions Vol 19. No 2. p. 199-207

REES, L. HUANG, P. TAYLOR B. (1989). A Comparative Analysis of an MRP Lot-for-Lot System and a Kanban System for a Multistage Production Operation. International Journal of Production Research. Vol 27, No 8, p. 1427-1443

RODERICK, L. PHILLIPS D. HOGG, G. (1992). A Comparison of Order Release Strategies in production Control Systems. International Journal of Production Research. Vol 30. no. 3. p. 611-626

RODERICK, L. TOLAND, J. RODRIGUEZ, F. (1994). A Simulation Study of CONWIP Versus MRP at WESTINGHOUSE. Computers in Industrial Engineering. Vol. 26 No.2 p. 237-242.

ROTHER, M. SHOOK, J. (1999). Learning to see – Value Stream Mapping to create value and eliminate Muda. Lean Enterprise Institute. 102p.

SARKER, B. R. (1989). Simulating a Just-In-Time Production System. Computers and Industrial Engineering. Vol 16. No 1. p. 127-137

SARKER, B. FITZSIMMONS, J. (1989). The Performance of Pus hand Pull Systems : A Simulation and Comparative Study . International Journal of Production Research. Vol 27. No 10. p. 1715-1731.

SCHOFIELD, A. (2006). Strong December Sees Boeing Beat Sales Record -- And Airbus. Aviation Daily. Vol. 363, N° 3; pg. 2

SCHONBERGER, R. (1982). Japanese Manufacturing Techniques: New Hidden Lessons in Simplicity, New-York; Free Press.

SCHONBERGER, R. (1986). World Class Manufacturing: The Lessons of Simplicity Applied. New-York: Free Press.

SCHULTZ, G. (2002). Battle at the bottlenecks. MSI; 20,5. P.47-52

SHINGO, S. (1989). A study of the Toyota Production System from an Industrial Engineering Viewpoint. Cambridge: Productivity Press.

SPEARMAN, M. HOPP, W. WOODRUFF, D. (1989). A Hierarchical Control Architecture for Constant Work-In-Process (CONWIP) Production Systems. *Journal of manufacturing and operations management*, Vol 2. p. 147-171

SPEARMAN, M. WOODRUFF, D. HOPP, W. (1990). CONWIP; A Pull Alternative to Kanban. *International Journal of Production Research*. Vol. 28 No. 5 p. 879-894

SPEARMAN, M. ZAZANIS, M. (1992). „Push and Pull Production Systems: Issues and Comparisons. *Operations Research*. Vol 40. No 3. p. 521-532

STACY, L. (2004). Corporate R&D Scorecard 2004 . *Technology review*; 107, 10. P.68-71.

STEVENSON, W. (2005). *Operations Management*. 8^{ème} edition. New-York: McGraw-Hill inc. 871p.

SUGIMORI, Y., K. KUSUNOKI, F. CHO, and S. UCHIKAWA. (1977). Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*. 15 (6): 553-564.

TAKAHASHI, K. (2003). Comparing reactive Kanban systems. *INT. J. PROD. RES.* 41(18): 4317-4337.

TAKAHASHI, K. DAISUKE HIROTANI, M. (2005). Comparing CONWIP, synchronized CONWIP, and Kanban in complex supply chains. *Int. J. Production Economics*. 93-94. p. 25-40

TAKAHASHI, K. HIRAKI, S.. SOSHIRODA, M. (1994). Pull-Push Integration in Production Ordering Systems *International Journal of Production Economics*. Vol 33. p. 166-161

TARDIF, V. and MAASEIDVAAG, L. (2001) An adaptive approach to controlling Kanban systems. *European Journal of Operational Research* **132**(2): 411-424.

TAYLOR, S. PLENERT, G. (1999). Finite capacity promising. *Production and Inventory management Journal*. Third Quarter 1999; 40, 3. P.50-56

THACKER et al. (2005). Capacity Management using simple or advanced scheduling tools. [en ligne, consulté le 24 septembre 2005] Adresse URL: www.smthacker.co.uk/capacity_management.htm

THE ECONOMIST. (2006). Nervous energy. *The Economist*. Édition du 7-13 janvier 2006, p. 61-63

TRANSPORT CANADA. (2005). Airworthiness Manual Chapter 533 - Aircraft Engines. [En ligne]. 2^e Edition. Canadian Aviation Regulations CAR533. <http://www.tc.gc.ca/> (consulté le 20 décembre 2005)

TRANSPORT CANADA. (2005). Quality Assurance Review Manual (QAR). [En ligne]. 3^e Edition. TP13724. <http://www.tc.gc.ca/> (consulté le 20 décembre 2005)

TURNER, J. (1991). Finite Scheduling: MRPII's Final Frontier. *Manufacturing Systems*. Feb 1991; 9, 2. P. 62-63

VOLLMAN, T. (2005). *Manufacturing planning and control systems for supply chain management*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill Irwin.

WOODWARD, J. (1965). *Industrial organization: theory and practice* London. Oxford university press.

ANNEXE I – EXEMPLE DE CELLULE DE PRODUCTION

La constitution des cellules de production n'est pas uniforme. Certaines sont organisées en U (voir figure I.1) avec des machines en double, soit une de chaque côté du U et des lignes de FIFO au centre alors que d'autres cellules sont plutôt un amalgame de différentes machines regroupées dans un même espace, mais ne présentant pas nécessairement une « forme » particulière.

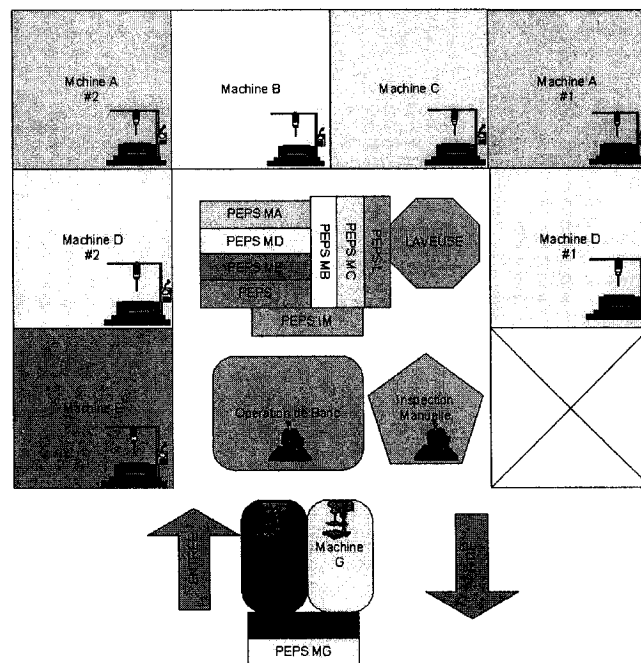


Figure I.1 - Exemple d'une cellule de production en U (PEPS = FIFO)

ANNEXE II – NOMENCLATURE TYPE

La nomenclature de fabrication d'un « turbofan » (moteur de jet) standard comporte 25 assemblages de 1^{er} niveau, environ 450 pièces³⁹ de 2^e niveau, 5000 de 3^e niveau, 1700 de 4^e niveau, ainsi que des pièces de 5^e, 6^e et 7^e niveau. On peut dire qu'une turbine à gaz standard comporte plus de 7 000 pièces, ce qui explique en partie la complexité de sa fabrication. Notons également que certaines de ces pièces requièrent de longues opérations de machinage de très haute précision. On peut visualiser la nomenclature de 1^{er} niveau et de 2^e niveau à la figure suivante.

³⁹ Le mot pièce représente autant une entité unique (ex. : produit moulé) qu'un assemblage de pièces de niveau inférieur.

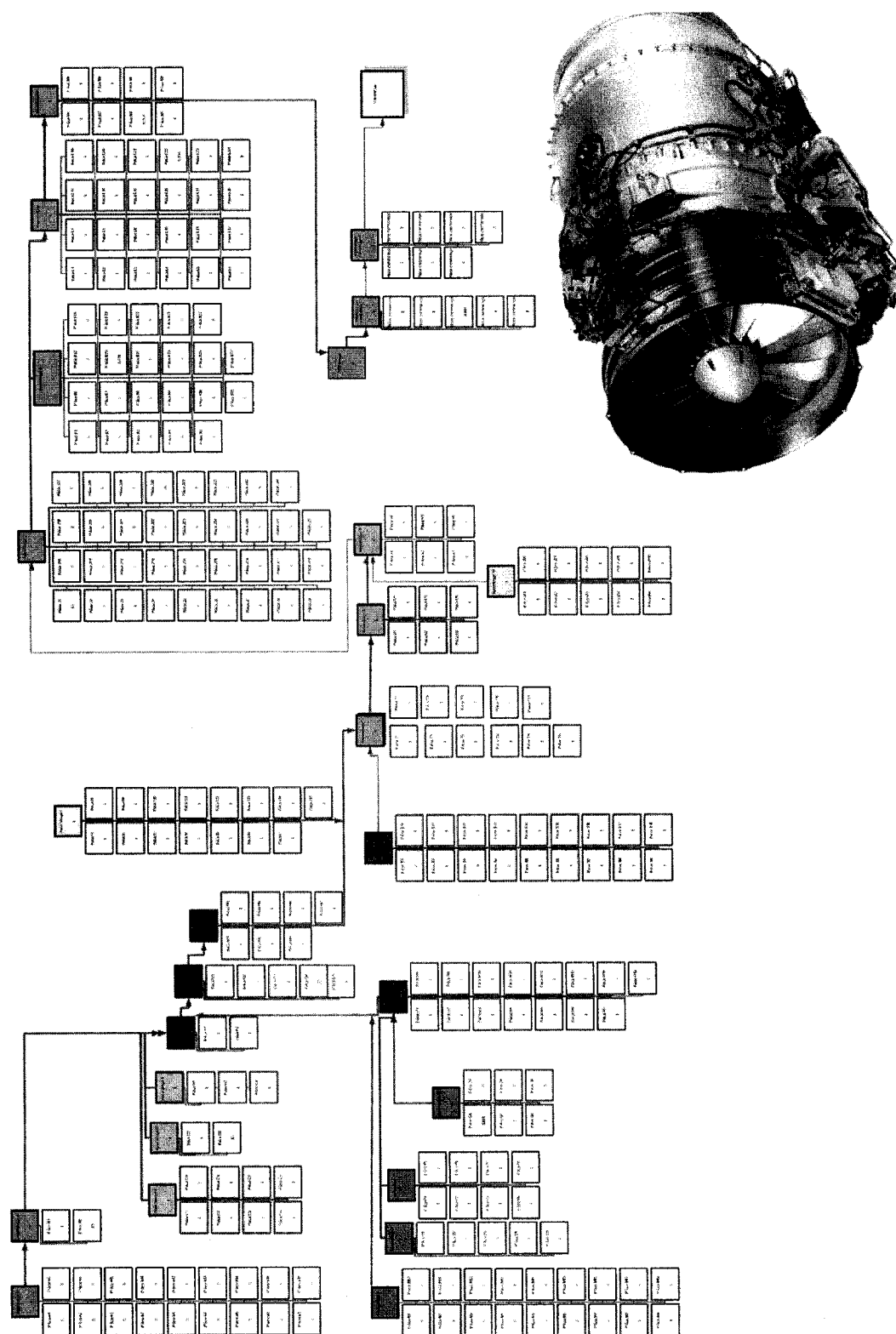


Figure II.1 - Nomenclature de fabrication d'un Turbofan

**ANNEXE III – DÉTAILS DE CONSTRUCTION D'UN
INTERVALLE EPEI**

Le calcul d'un intervalle Every Part Every Interval (EPEI) sur une ressource s'effectue de la façon suivante⁴⁰ :

1. Calculer la capacité totale de la ressource. Si par exemple, la machine fonctionne sur 3 quarts de travail de 8hr, la capacité disponible est de 1440 minutes ($24\text{hr} * 60\text{min/hr}$).
2. Multiplier cette capacité par le pourcentage de temps où la machine est réellement en opération (ce pourcentage de temps d'opération permet de tenir compte des pauses, des repas, des bris, ...). Si on suppose une efficacité de 85%, on obtient une capacité de 1224 minutes.
3. Multiplier la demande journalière de chacune des pièces par le temps que la pièce doit passer sur la machine. On additionne ensuite l'ensemble des résultats pour les pièces passant par la ressource. Si par exemple 12 pièces passent sur la machine, que la demande journalière est de 10 pour chacune des pièces et que le temps de cycle est de 9 minutes; le temps de cycle journalier nécessaire sur cette machine est de 1080 minutes ($12 \text{ pièces} \times 10 \text{ pièces par jours} \times 9 \text{ minutes par pièce}$).
4. Soustraire le temps nécessaire au temps disponible (étape 2 – étape 3). On obtient ainsi le temps disponible pour la mise en course (dans ce cas $1224 - 1080 = 144$ minutes).
5. Calculer le temps de mise en course de chaque type de pièce. Si l'on suppose un temps de mise en course de 20 minutes pour chaque pièce, on obtient un temps de mise en course par intervalle de 240 minutes ($12 \text{ pièces} \times 20 \text{ minutes par pièce}$).
6. Diviser le temps disponible pour la mise en course par le temps de mise en course requis. (dans notre cas $144/240=0,6$).
7. Puisque ce ratio est inférieur à 1, il faut allonger l'intervalle, ce qui entraîne une augmentation des tailles de lots et permet ainsi d'optimiser le temps de mise en

⁴⁰ Adaptation de Synchronousmanagement. 2003. adresse URL : <http://www.synchronousmanagement.com/cls.html> (consulté le 10 mars 2005)

course. Si l'on passe à une durée de 2 jours, on obtient des tailles de lot de 20 pièces (2 x 10). Ceci donnerait : $(2 \text{ jours} \times 1224 \text{ minutes/jours}) - (2 \text{ jours} \times 1080 \text{ minutes/jours}) = 288 \text{ minutes}$ disponibles pour le temps de setup. On recommence à l'étape 6 : $288 / 240 = 1.2$! ($1.2 > 1 \rightarrow \text{OK!}$) Si 2 jours n'avaient pas permis de répondre à la demande, il aurait fallu essayer avec 3 jours, puis 4, ...

NOTE : Le cas présenté ici est très simplifié. Dans la réalité, il est à prévoir que chacune des pièces ait un temps opératoire propre. De plus, les demandes ne sont pas uniformes ce qui fait que certaines pièces seront regroupées en lots alors que d'autres non.