

Université libre de Bruxelles
Faculté des Sciences appliquées
Systèmes flexibles de production



GESTION DES STOCKS ET DE LA PRODUCTION

Cours
GEST 075

P. GASPART

Table des matières.

1. Introduction
 - 1.1. Buts poursuivis
 - 1.2. Contexte actuel
 - 1.3. Stratégie de produit
 - 1.4. Stratégie de procédé
 - 1.5. Structure des produits
 - 1.6. Typologie et profil des entreprises
 - 1.7. Horizons de planification

2. La gestion des stocks
 - 2.1. Introduction
 - 2.2. Notion de quantité économique
 - 2.3. Notion de stock de sécurité
 - 2.4. Classification ABC
 - 2.5. Politiques de gestion
 - 2.5.1. La méthode de réapprovisionnement
 - 2.5.2. La méthode de recomplètement
 - 2.5.3. La méthode du point de commande
 - 2.5.4. La méthode à quantités et dates variables

3. MRP II (Manufacturing Resources Planning)
 - 3.1. Contexte et motivation
 - 3.2. Architecture générale
 - 3.3. La stratégie industrielle
 - 3.4. La planification des produits et des ventes.
 - 3.5. Le plan industriel et commercial (PIC)
 - 3.6. Le business plan (plan financier)
 - 3.7. Le programme directeur (PD) et le programme directeur de production (PDP)
 - 3.8. Le calcul des besoins (MRP I)
 - 3.8.1. Notion de nomenclature
 - 3.8.2. Méthode de calcul
 - 3.8.3. Calcul et suivi des charges détaillées
 - 3.8.4. Extension au cas du Make-To-Order

4. Nouvelles approches
 - 4.1. Introduction
 - 4.1.1. Méthode classique
 - 4.1.2. Approche JIT
 - 4.1.3. Théorie des contraintes
 - 4.2. Théorie des contraintes
 - 4.2.1. Les étapes de la démarche
 - 4.2.2. La planification drum-buffer-rope

- 4.2.3. Les indicateurs de performance
- 4.3. JIT (Just In Time)
 - 4.3.1. Philosophie
 - 4.3.2. La méthode KANBAN
- 5. Ordonnancement et gestion des flux physiques
 - 5.1. Introduction
 - 5.2. Gestion de flow shops (batch)
 - 5.3. Gestion de job shops
 - 5.3.1. But poursuivi
 - 5.3.2. Formalisme de Gantt
 - 5.3.3. Règles de priorité
 - 5.3.4. Taille des files d'attente
 - 5.3.5. Gestion des entrées-sorties
 - 5.4. Gestion de projets (la méthode PERT /CPM)
 - 5.4.1. Introduction
 - 5.4.2. Durée des activités
 - 5.4.3. Notion de chemin critique
 - 5.4.4. Ordonnancement à durée minimum
 - 5.4.5. Ordonnancement à coût minimum
- 6. Maintenance et qualité totales
 - 6.1. Introduction
 - 6.2. Contrôle de qualité
 - 6.2.1. Considérations statistiques
 - 6.2.2. Acceptation par échantillonnage
 - 6.2.3. Statistical Process Control (SPC)
 - 6.2.4. Mistake Proofing
 - 6.3. Maintenance
- 7. Bibliographie

1 Introduction

1.1 Buts poursuivis

La gestion des stocks et de la production (Production and Inventory Management) a pour objectif la conception, la conduite ainsi que la supervision des systèmes de production et de distribution. Le cours se focalise essentiellement sur la conduite et l'exploitation de tels systèmes; les thèmes abordés concernent donc la planification, l'exécution et le suivi de la production .

1.2 Contexte actuel

Dans le contexte industriel actuel, l'offre est largement excédentaire par rapport à la demande et, par conséquent, la clientèle est de plus en plus exigeante. Ceci implique pour l'entreprise:

- la maîtrise des coûts grâce à un suivi précis de la production;
- la réduction des coûts par la réorganisation ou l'élimination des procédures coûteuses n'apportant que peu de valeur ajoutée, par la minimisation des en-cours et des stocks;
- des délais de livraisons courts et fiables;
- une qualité constante et irréprochable;
- de petites séries de produits personnalisés et fréquemment renouvelés;¹
- une grande adaptativité face aux évolutions de plus en plus rapides de la demande et à l'émergence de nouvelles technologies.

Certaines de ces exigences sont contradictoires; la gestion des stocks et de la production a pour but d'assurer une cohérence globale en effectuant les arbitrages nécessaires.

1.3 Stratégie de produit

Les facteurs déterminant la stratégie produit sont les suivants :

- le lead time de la production, c'est-à-dire le temps nécessaire à l'exécution d'une commande;
- le délai acceptable par le marché;
- le degré de personnalisation souhaitée pour les produits.

Les stratégies produit fondamentales sont :

- MTS (Make To Stock) qui correspond à la production de produits standards pour lesquels le marché impose une disponibilité immédiate (ex: les boîtes de petits pois);
- ATO (Assemble To Order) qui concerne des produits comportant de nombreuses variantes (qu'on ne peut, par conséquent, pas maintenir en stock) assemblées à partir de sous-ensembles standards en nombre limité; les sous-ensembles sont en général produits en MTS tandis que les produits finaux sont assemblés sur commande (ex: automobiles);
- MTO ou ETO (Make To Order ou Engineer To Order) où les produits fortement personnalisés sont construits sur commande (ex: maisons).

¹La durée de vie des produits devient, de plus en plus fréquemment, inférieure à la durée de vie des équipements de production. Il est, donc, indispensable de concevoir ces équipements en sorte de pouvoir les réutiliser pour d'autres productions; leur flexibilité et leur programmabilité prend, dans ce cadre, toute son importance stratégique.

La stratégie MTO est la plus favorable pour le producteur dans la mesure où elle n'impose, le cas échéant, que le stockage de matières premières beaucoup moins coûteuses que les produits finis. Le recours à une telle stratégie n'est possible que si l'entreprise réussit à réduire son lead time à une valeur inférieure au délai accepté par le marché.

1.4 Stratégie de procédé

Trois stratégies au niveau du procédé de fabrication sont à prendre en considération :

- flow shop qui organise les équipements de production en fonction des produits (product layout); chaque équipement ne fabrique qu'un produit (ou une famille de produits) et est intégré à une ligne de production dédiée à ce produit (ou cette famille de produits) (ex: assemblage automobile); la conception d'un flow shop implique le regroupement d'opérations au sein de stations de travail installées en ligne et l'équilibrage² de la ligne;
- job shop où les équipements de production sont groupés fonctionnellement (functional layout) en départements (fraisage, soudage, assemblage, ..); le job shop est capable de fabriquer un gamme étendue de produits qui, en lots, suivent un chemin spécifique dans l'atelier (ex: chaudières industrielles);
- fixed site qui correspond au cas où le volumineux produit fabriqué est fixe tandis que les équipements de production viennent à lui (ex: construction navale).

1.5 Structure des produits

On distingue les structures suivantes :

- structure convergente où les produits finis en variété limitée sont assemblés au départ d'un nombre important de composants eux-même usinés ou formés à partir de matières premières très variées (ex: moniteurs de télévision);
- structure à points de regroupement qui concerne le cas où les produits finis et les matières premières sont en nombre important tandis qu'il n'existe qu'un nombre limité de sous-ensembles intermédiaires (ex: automobiles);
- structure divergente qui correspond à un nombre restreint de matières premières et à une abondance de produits finis (ex: pièces estampées).

La figure 1.1 résume ces trois structures fondamentales.

² L'équilibrage d'une ligne consiste à égaliser, par un groupement adéquat des opérations de production respectant les contraintes de précedence éventuelles, le temps opératoire de chaque station. Ce temps opératoire commun, appelé temps de cycle, est le temps nécessaire à la production d'un produit.

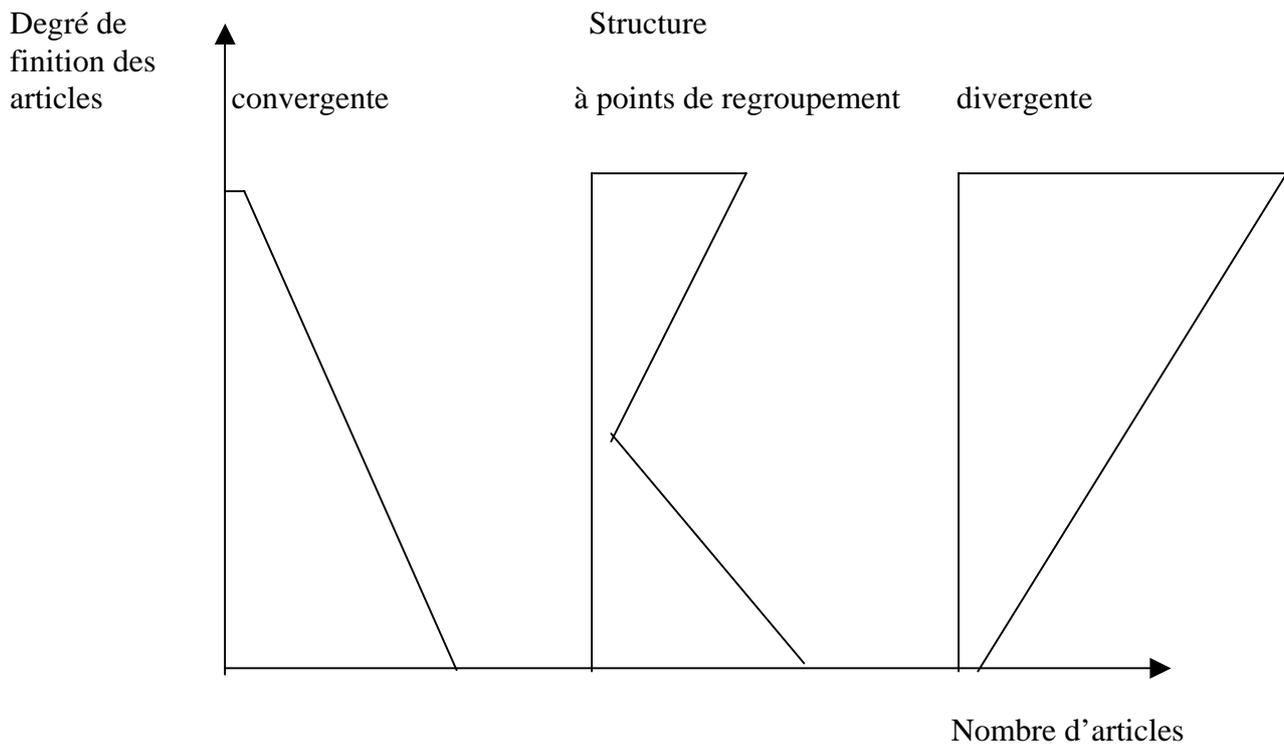


Figure 1.1

1.6 Typologie et profil des entreprises

Par profil d'entreprise, on entend généralement le 5-uple suivant :

- volume de production : unitaire ou petite série ou moyenne série ou grande série;
- procédé de production : continuous/repetitive flow shop ou job shop ou fixed site (par projet);
- stratégie de produit : make-to-stock ou assemble-to-order ou make-to-order³
- structure des produits : convergente ou divergente ou à points de regroupement ou parallèle
- autonomie : concepteur-fabricant ou sous-traitant ou façonnier

Il faut, encore, faire deux remarques:

- chaque stratégie de produit nécessite un stockage spécifique (cf figure 1.2).

³Le choix de la stratégie dépend du temps nécessaire à la fabrication, du délai de livraison acceptable par le marché et du degré de personnalisation exigé.

Make-To-Stock	Assemble-To-Order	Make-To-Order
Produits finis		
Sous-ensembles	Sous-ensembles	
Matières premières	Matières premières	Matières premières

Figure 1.2

Une entreprise a toujours intérêt à diminuer la valeur de ses stocks. Pour ce faire, elle doit tenter de migrer d'une stratégie Make-To-Stock vers Assemble-To-Order ou même Make-To-Order en comprimant au maximum son délai de fabrication.

- la quantité et la variété produites mettent en relation les stratégies produit et les procédés de production (cf figure 1.3)

	Make-To-Stock	Assemble-To-Order	Make-To-Order
Flow shop	High volume Standard to low variety	High volume Low to medium variety	
Job shop			Low volume High variety
Fixed site			Unitary Very high variety

Figure 1.3

1.7 Horizons de planification

La terminologie utilisée pour ce qui concerne la planification de la production est la suivante :

- long terme : supérieur au délai d'acquisition de nouveaux équipements et sites de production (ex: plan industriel et commercial);
- moyen terme : supérieur au plus long lead time (ex: programme directeur de production, calcul des besoins);
- court terme : minute, heure, pause (8 heures), au plus semaine.

2 La gestion des stocks

2.1 Introduction

Le succès d'une organisation est déterminé, entre autres, par sa capacité de proposer le bon produit (ou service) au bon moment et au bon endroit. Un stockage intelligent contribue de manière décisive à cet objectif stratégique.

On distingue, en général, différents types de stockage :

- stocks de produits finis;
- stocks d'entrants de fabrication (matières premières, pièces sous-traitées);
- stocks de pièces de rechange et de produits pour la maintenance des équipements de production;
- stocks d'outillages et d'accessoires;
- en-cours.

Rôles positifs :

- lissage de la production dans les cas nombreux où la demande subit des variations saisonnières;
- robustesse par rapport à des indisponibilités de ressources de production;
- réduction des délais de mise à disposition (dans le cas des stocks de produits finis).

Inconvénients :

- rigidification de la production
- immobilisation de moyens financiers importants (ils peuvent représenter 25 à 30 % du capital immobilisé)
- utilisation d'espace
- occultation d'insuffisances graves en matière de prévision et de gestion.

Vu l'investissement considérable et improductif que constituent les stocks, il est impératif, pour toute entreprise, de tenter de les minimiser. Cette minimisation très souhaitable implique :

- la diminution drastique (voire la disparition) des pannes de ressources; ceci explique l'intérêt de plus en plus grand accordé aux problèmes de maintenance;
- l'élimination des rebuts; ceci justifie l'importance stratégique de la philosophie qualité dans l'entreprise;
- la réduction de la taille des lots de fabrication; ceci requiert des temps et coûts de changement de série (set up) aussi faibles que possible.

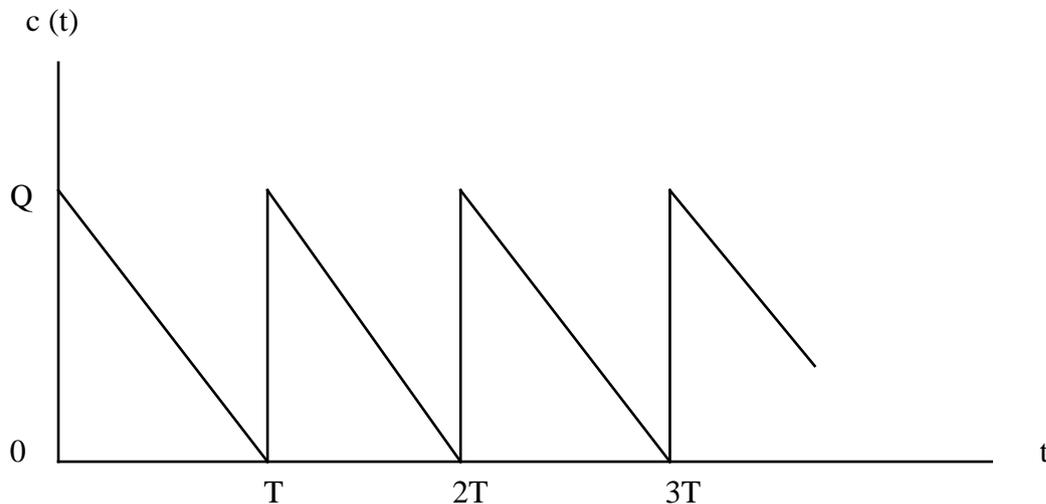
2.2 Notion de quantité économique

Le but de la gestion de stocks est de les minimiser en respectant un niveau de service donné. Le niveau de service est quantifié par la probabilité de rupture.

Si $e(t)$ et $s(t)$ représentent les débits d'entrée et de sortie d'un stock donné, le contenu instantané dudit stock correspond à :

$$c(t) = \int_0^t (e(t) - s(t)) dt + c(0)$$

Dans le cas un peu idéalisé d'une fonction $s(t)$ constante et d'une réception instantanée, on obtient l'évolution de la figure 2.1 :



avec (réception instantanée) $e(t) = Q$ pour $t = nT$
 $e(t) = 0$ pour $t \neq nT$

Figure 2.1

Le stock moyen est, donc, égal à $Q/2$.

Simplement minimiser ce stock moyen, et donc Q , n'est pas une bonne idée dans la mesure où le lancement d'un ordre d'achat ou d'un ordre de fabrication entraîne des coûts fixes (non proportionnels).

Le calcul de la quantité optimale (dite économique) se fait en minimisant la somme du coût de stockage et du coût de lancement sur une base annuelle, par exemple.

Ce coût global est donné par:

$$C = C_{\text{stockage}} + C_{\text{lancement}}^4$$

avec

$C_{\text{stockage}} = p a Q/2$ où $p =$ taux de possession annuel tenant compte de l'intérêt du capital immobilisé, de la détérioration éventuelle, des obsolescences et des frais divers (loyer, assurances, manutentions, taxes, ...); p peut valoir jusqu'à 30%.
 $a =$ prix de l'article⁵

⁴ En toute généralité, ce coût global devrait comporter un terme relatif aux ruptures de stock. Ce terme (correspondant à des mécontentements voire des pertes de clients) est toutefois difficilement quantifiable.

⁵ Article est un vocable général qui désigne tant un produit fini qu'un composant ou une matière première.

et

$C_{\text{lancement}} = L N/Q$ où $L =$ coût de lancement d'un ordre d'achat (écriture d'un bon de commande, préparation de spécifications, suivi et relance, traitement de factures, paiement) ou de fabrication (setup, rebut de début de série).
 $N =$ nombre d'articles commandés ou fabriqués par an.

L'équation $\partial C / \partial Q = 0$ nous donne la formule dite de Wilson :

$$Q_e = \sqrt{2NL / pa}$$

Cette formule suppose, entre autres, que les coûts de lancement sont purement fixes et que le prix de l'article est indépendant des quantités achetées ou fabriquées.

L'hypothèse de réception instantanée est tout-à-fait justifiée dans le cas d'un ordre d'achat. Si l'article est produit intra muros (cas d'un ordre de fabrication), la réception ne sera probablement pas instantanée.

L'évolution du stock se présente alors comme indiqué à la figure 2.2.

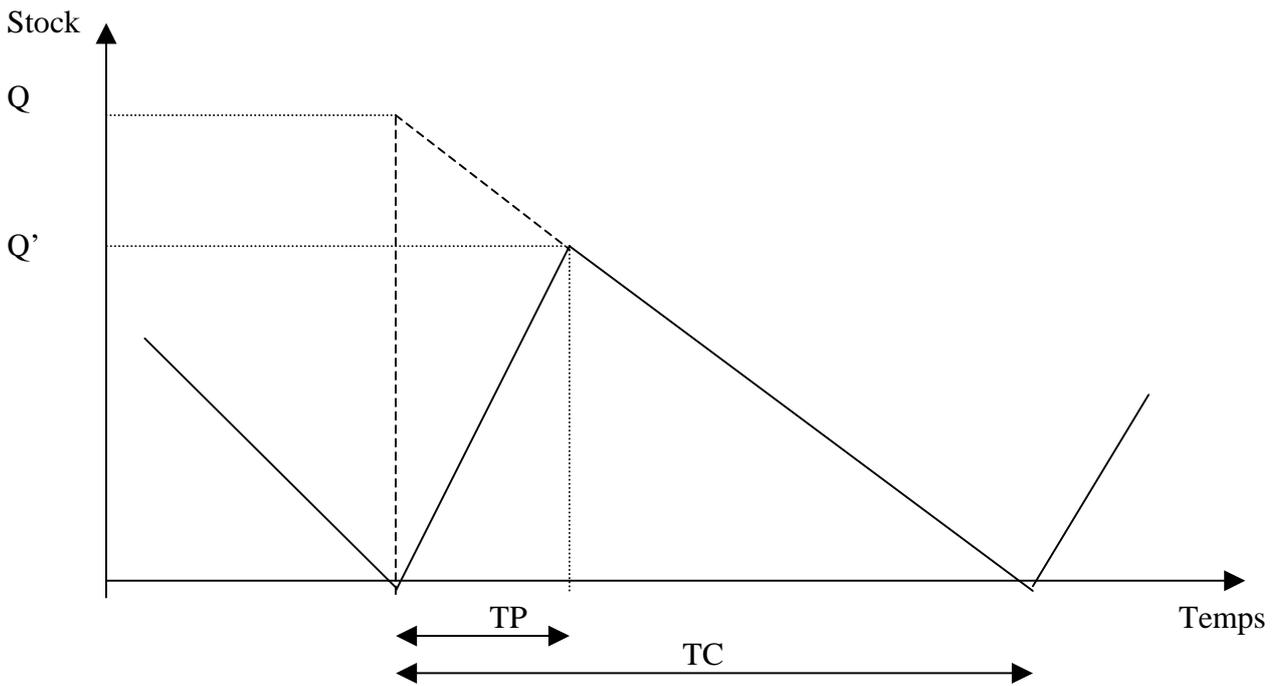


Figure 2.2

TC : période de consommation;
 TP : période de production;
 PR : rythme de production = Q/TP ;
 CO : débit de consommation = Q/TC .

$$C = LN/Q + paQ'/2$$

avec $Q'/Q = (TC - TP)/TC = (1 - TP/TC)$.

On déduit que :
 $Q' = Q (1 - CO/PR)$.

Il vient :
 $C = LN/Q + paQ (1-CO/PR)/2$.

L'équation $\partial C / \partial Q = 0$ nous donne :

$$Q = \sqrt{2LN / (pa(1 - CO / PR))}$$

2.3 Notion de stock de sécurité

Le stock de sécurité permet d'absorber l'imprévisible et, par conséquent, d'éviter la rupture de stock. On peut, donc, considérer que le paragraphe précédent s'applique au stock disponible (stock physique - stock de sécurité) et non au stock physique.

2.4 Classification ABC

Cette analyse très classique permet de focaliser l'attention des gestionnaires sur les articles vitaux et de moduler la politique de gestion en fonction du caractère plus ou moins stratégique des divers articles en stock.

Sont classés A, les 20% d'articles du stock qui correspondent aux valeurs annuelles (aN) les plus grandes.

Sont classés B , les 40% d'articles qui suivent.

Les 40% subsistants sont classés C.

Il arrive fréquemment que les articles A correspondent à 80% de la valeur annuelle totale. Il va de soi que la plus grande attention doit être dévolue à cette catégorie d'articles.

2.5 Politiques de gestion

On peut imaginer diverses politiques de gestion. De la plus triviale à la plus sophistiquée, on trouve les méthodes suivantes.

2.5.1 La méthode de réapprovisionnement (dates fixes, quantités fixes)

Ce type de contrat prévoit de commander à date fixe (par exemple le 20 de chaque mois pour un article donné) une quantité fixe dudit article (voisine de la quantité économique). Il est évident qu'on étale dans le temps les ordres d'achat ou de fabrication correspondant à l'ensemble des articles.

2.5.2 La méthode de recomplètement (dates fixes, quantités variables)

A date fixe (par exemple le 20 de chaque mois), le responsable du stock lance un ordre visant à ramener le stock d'un article à son niveau maximum. A nouveau, les ordres correspondant à

l'ensemble des articles sont étalés dans le temps. Un des inconvénients est que l'on est amené, à certains moments, à lancer des ordres pour des quantités très différentes de la quantité économique.

2.5.3 La méthode du point de commande (dates variables, quantités fixes)

C'est l'atteinte d'un certain niveau de stock (le point de commande) qui déclenche l'ordre d'achat ou de fabrication. Le point de commande est le niveau de stock nécessaire à la couverture des besoins (sans entamer le stock de sécurité) entre le lancement de l'ordre et la réception correspondante (cf figure 2.3). La quantité commandée est la quantité économique.

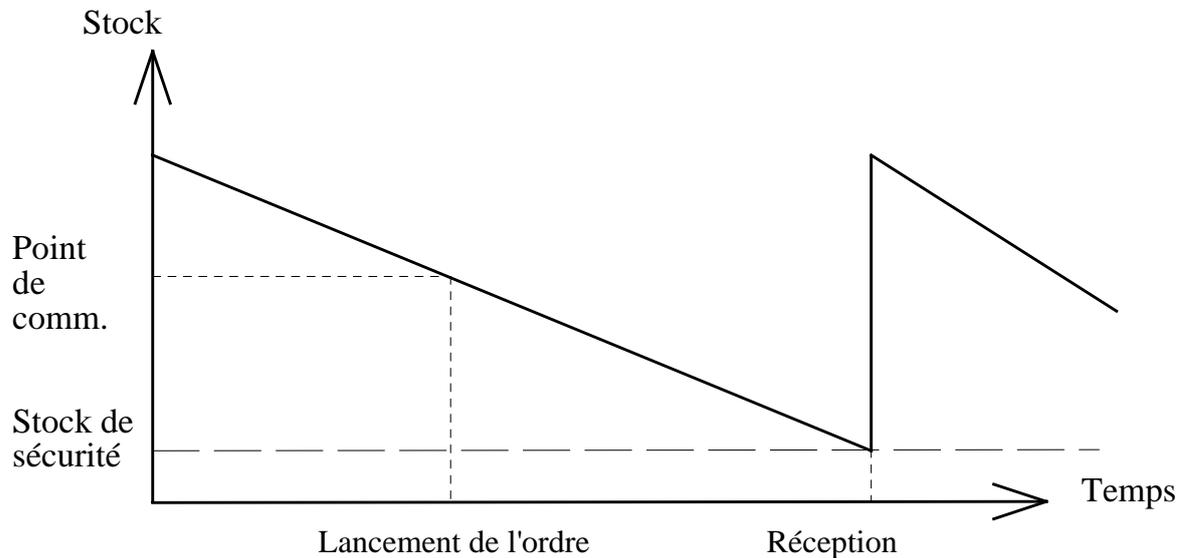


Figure 2.3

Le point de commande PC est donc donné par :

$$PC = SS + C_{moy} * LT_{moy}$$

où

SS : stock de sécurité;

C_{moy} : consommation moyenne;

LT_{moy} : lead time moyen pour la réception de l'article acheté ou fabriqué.

Il existe classiquement deux approches pour la détermination du stock de sécurité.

2.5.3.1 Approche statistique

C (consommation de l'article) peut être considérée comme une variable normale de moyenne C_{moy} et d'écart-type C_{sd} .

On a :

$$QC = C * LT_{moy} \text{ où } QC \text{ est la quantité consommée pendant } LT_{moy}.$$

Considérons la variable normale réduite $Créd = (C - C_{moy}) / C_{sd}$.

Dans le cas d'un niveau de service exigé de 0.95 (probabilité de ne pas avoir de rupture de stock pour l'article considéré), il vient :

$$P(QC < PC) = 0.95$$

Si $P(\text{Créd} < 1.65) = 0.95$, on en déduit :
 $P(C < C_{\text{moy}} + 1.65 * C_{\text{sd}}) = 0.95$, $P(QC < (C_{\text{moy}} + 1.65 * C_{\text{sd}}) * LT_{\text{moy}}) = 0.95$ et
 $PC = (C_{\text{moy}} + 1.65 * C_{\text{sd}}) * LT_{\text{moy}}$;
cela correspond au stock de sécurité :
 $SS = 1.65 * C_{\text{sd}} * LT_{\text{moy}}$.

2.5.3.2 Approche géométrique

On se place volontairement dans le cas le plus défavorable.

$$QC = C_{\text{max}} * LT_{\text{max}};$$

QC = PC correspond au stock de sécurité :

$$SS = C_{\text{max}} * LT_{\text{max}} - C_{\text{moy}} * LT_{\text{moy}}.$$

La figure 2.4 montre l'évolution d'un stock gouverné par une méthode de point de commande.

- Unité de temps : la semaine
- Taille des lots : 1000
- Délai : 2
- Stock de sécurité : 200
- Consommation moyenne : 325
- Point de commande : 850

Les données du calcul sont en grisé.

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Sorties		700	450	100	450	100	700	450	100	100	100
Stock	1400	700	250	1150	700	600	900	450	350	1250	1150
Réception				1000			1000			1000	
Lancement		1000			1000			1000			

Figure 2.4

2.5.4 La méthode à quantités et dates variables

Cette méthode, qui requiert une attention permanente, ne s'utilise que pour des articles coûteux.

3 MRP (Manufacturing Resources Planning)

3.1 Contexte et motivation

Il est parfaitement concevable de gérer un environnement productif par les stocks correspondants. La figure 3.1 présente un cas de ce genre, où les lancements sont faits conformément à la méthode du point de commande.

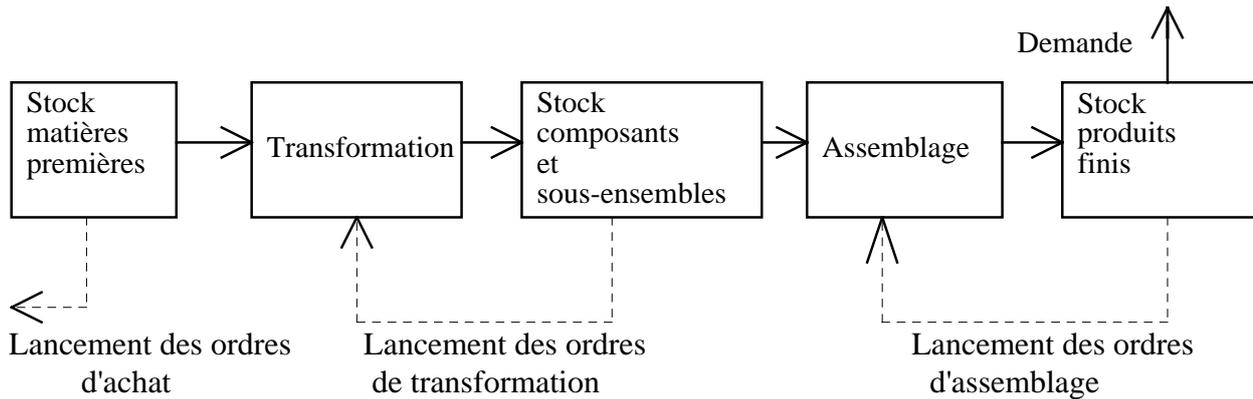


Figure 3.1

L'avantage majeur de cette approche est sa simplicité; elle présente, néanmoins l'inconvénient de n'être acceptable que pour les stocks de produits finis et d'être très sous-optimale pour tous les autres stocks. Un stockage important et inutile de sous-ensembles, composants et matières premières est la conséquence la plus négative que l'on puisse mettre en évidence.

La figure 3.2 présente l'évolution des stocks d'un produit fini et d'un de ses composants.

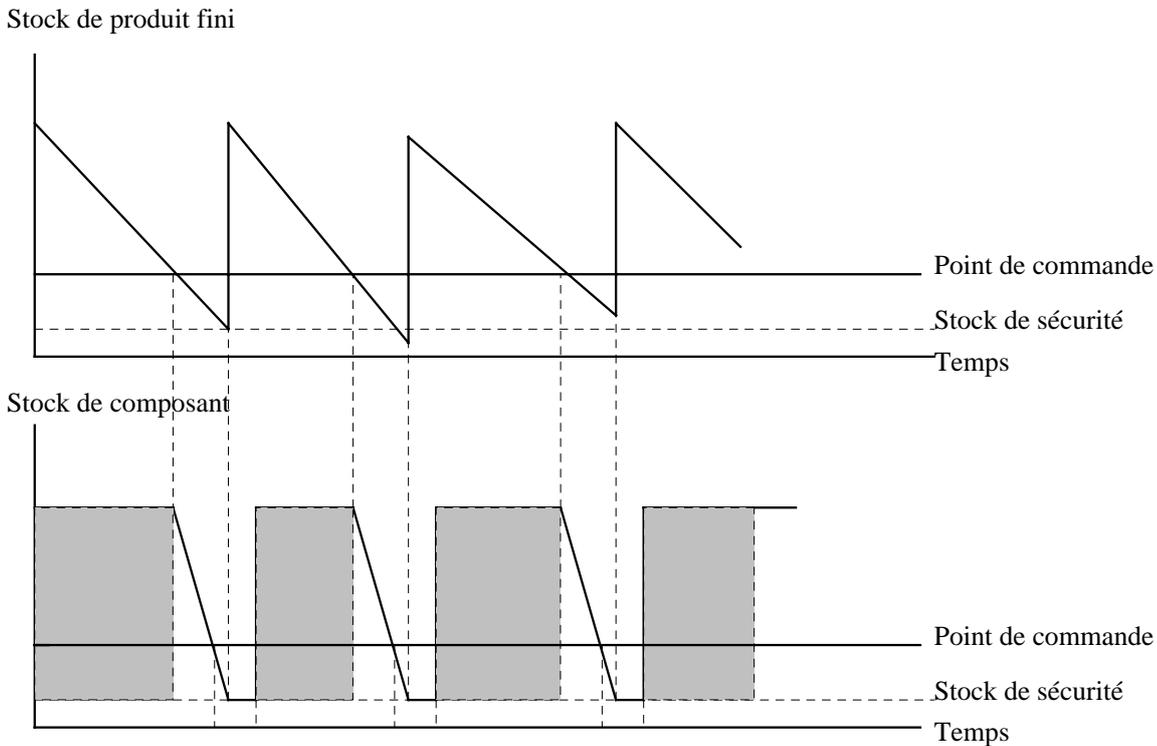


Figure 3.2

On remarque que le stock de composant est dormant à son niveau maximum, entre deuxancements du parent. On a représenté en grisé le stockage inutile. Ce phénomène s'accroît pour les composants plus élémentaires.

De plus, la gestion de stock ne tient pas compte du délai de fabrication des composants intervenant dans l'assemblage d'un produit, par exemple; les ordres correspondant au composant lent et au composant rapide seront lancés en même temps. Ceci aggrave, encore, la situation de stock du composant rapide.

Afin d'éviter ces phénomènes, on peut imaginer, connaissant le temps moyen passé par les articles sur chaque ressource de production ainsi que de la structure des produits, de prévoir lesancements des divers ordres de sorte que tout soit disponible, sans avance et sans retard, au moment voulu.

Pour ce faire, il faut prendre en considération :

- les besoins indépendants (commandes clients de produits finis et de sous-ensembles ou de pièces de rechange); ces besoins peuvent être prévus et **doivent** être estimés.
- les besoins dépendants (engendrés par les besoins indépendants) qui peuvent et **doivent** être calculés; ce calcul peut se faire grâce à la connaissance de la structure des articles (produits finis, sous-ensembles, composants et matières) et du temps nécessaire à leur production.

Les besoins indépendants sont, en général, gérés par une stratégie de point de commande tandis que les besoins dépendants sont pris en compte par un calcul des besoins.

Signalons, enfin, que l'on utilise le même acronyme MRP pour représenter deux choses:

- Manufacturing Resources Planning (il s'agit en fait de MRP II); c'est la version extensive que nous détaillerons ci-après
- Material Requirement Planning (il s'agit de MRP I); c'est une version réduite limitée strictement au calcul des besoins.

3.2 Architecture générale

Dans son principe, MRP a une structure hiérarchisée dans laquelle chaque niveau correspond à un horizon temporel donné qui diminue avec ledit niveau.

La figure 3.3 montre cette structure intégrée à la gestion de production dans son ensemble.

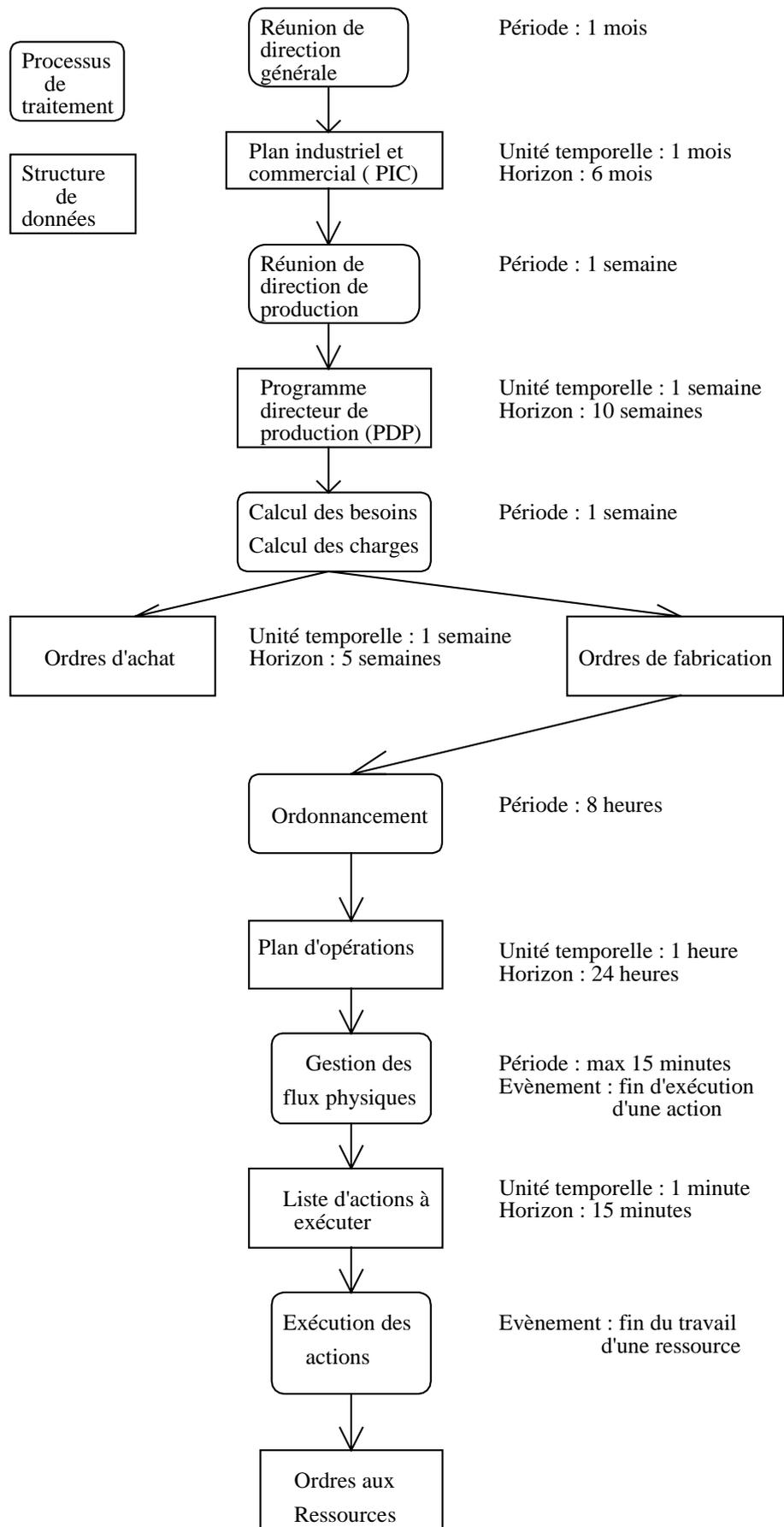


Figure 3.3

3.3 La stratégie industrielle

Cette démarche consiste à étudier les facteurs politiques, économiques et démographiques qui influencent le marché, c'est-à-dire la demande de produits/services.
Cette étude est clairement en dehors de cet enseignement.

3.4 La planification des produits et des ventes

Il s'agit de répondre aux questions suivantes :

- quels produits?
- quelles quantités?
- quels marchés?
- quelle qualité?

Cette planification ne fait pas partie du cours.

3.5 Le plan industriel et commercial (PIC)⁶

Ce plan définit l'activité globale de l'entreprise par familles de produits. Il est établi lors d'une réunion mensuelle entre le PDG et les directeurs opérationnels (production, commercial, achats et logistique). Son objet est de prévoir l'évolution liée des ventes, de la production et du stock (ou du portefeuille de commandes).

Un objectif fréquemment poursuivi dans ce plan est soit la stabilisation du stock (ou du portefeuille) à un niveau constant raisonnable, soit le maintien d'une production constante (en nombre de produits/jour) malgré des ventes saisonnières.

La relation entre les diverses grandeurs est :

$$\text{Production (t)} = \text{Ventes (t)} + \text{Stock désiré (t)} - \text{Stock (t - 1)}$$

ou

$$\text{Production (t)} = \text{Ventes (t)} + \text{Portefeuille (t - 1)} - \text{Portefeuille désiré (t)}$$

La figure 3.4 donne un exemple de PIC pour une famille de produits (en make-to-stock) avec un objectif de stock constant; les données du problème sont représentées en grisé.

⁶Appelé Production Plan dans la littérature anglo-saxonne.

		M-3	M-2	M-1	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Ventes										
Prévisionnelles		1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Réelles		1690	1805	1980						
Ecart		110	-5	-180						
Ecart cumulé		110	105	-75						
Production										
Prévisionnelle		1620	1420	1820	2166	1700	1700	1800	1800	1800
Réelle		1790	1305	1534						
Ecart		-170	115	286						
Ecart cumulé		-170	-55	231						
Stock										
Prévisionnel		2000	1900	1800	1700	1600	1500	1500	1500	1500
Réel	2180	2280	1780	1334						
Ecart		-280	120	466						

Figure 3.4

La figure 3.5 montre pour une famille de produits saisonniers un PIC avec un objectif de production constante.

	M-1	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Ventes prévisionnelles		100	50	50	100	100	50
Production prévisionnelle		75	75	75	75	75	75
Stock prévisionnel		25	50	75	50	25	50
Stock réel	50						

Figure 3.5

L'établissement du PIC est souvent un compromis à vocation optimale entre un fonctionnement à faible stock constant (qui minimise les coûts d'exploitation des stocks) et un fonctionnement à production constante (qui minimise les coûts de changement de débit de production). Pour fixer les idées, considérons l'exemple d'une famille de produits destinés à un marché relativement fluctuant.

Les données du problème sont :

- stock de sécurité : 1.100;
- coût unitaire de l'article en heures normales : 5000 FB;
- coût unitaire de l'article en heures supplémentaires : 5350 FB;
- taux de possession annuel : 30%;
- coût d'embauche : 60.000 FB par ouvrier;
- coût de licenciement : 20.000 FB par ouvrier;
- coût horaire ouvrier : 1.000 FB;
- capacité par ouvrier par mois : 160 heures, 200 articles;
- effectif maximum : 60 ouvriers.
- Nombre maximum d'heures supplémentaires : 40 par ouvrier par mois.

La capacité maximum de l'atelier est donc de 60×250 (soit 15.000) articles par mois.

La figure 3.6 montre un PIC à production constante sur un horizon de 12 mois (toutes les données, à l'exception de celles du mois M-1, sont prévisionnelles). Les quantités d'articles sont indiquées en milliers.

Mois	Stock initial	Production	Nombre d'ouvriers	Demande	Stock final	Cout des heures suppl. (en kFB)	Cout d'emb. (en kFB)	Cout de lic. (en kFB)	Cout de stockage (en kFB)
M-1		10			1.1				
M1	1.1	10	50	9	2.1	0	0	0	262.5
M2	2.1	10	50	6.2	5.9	0	0	0	737.5
M3	5.9	10	50	8	7.9	0	0	0	987.5
M4	7.9	10	50	11	6.9	0	0	0	862.5
M5	6.9	10	50	13.2	3.7	0	0	0	462.5
M6	3.7	10	50	10	3.7	0	0	0	462.5
M7	3.7	10	50	8	5.7	0	0	0	712.5
M8	5.7	10	50	6	9.7	0	0	0	1212.5
M9	9.7	10	50	9.5	10.2	0	0	0	1275
M10	10.2	10	50	13	7.2	0	0	0	900
M11	7.2	10	50	14	3.2	0	0	0	400
M12	3.2	10	50	12.1	1.1	0	0	0	137.5
Total annuel		120		120		0	0	0	8412.5

Grand total ⁷: 8.412.500 FB

Figure 3.6

La figure 3.7 reprend les mêmes données de départ dans le cadre d'un PIC à stock minimum constant.

Mois	Stock initial	Production	Nombre d'ouvriers	Demande	Stock final	Cout des heures suppl. (en kFB)	Cout d'emb. (en kFB)	Cout de lic. (en kFB)	Cout de stockage (en kFB)
M-1		10	50		1.1				
M1	1.1	9	45	9	1.1	0	0	100	137.5
M2	1.1	6.2	31	6.2	1.1	0	0	280	137.5
M3	1.1	8	40	8	1.1	0	540	0	137.5
M4	1.1	11	55	11	1.1	0	900	0	137.5
M5	1.1	13.2	60	13.2	1.1	420	300	0	137.5
M6	1.1	10	50	10	1.1	0	0	200	137.5
M7	1.1	8	40	8	1.1	0	0	200	137.5
M8	1.1	6	30	6	1.1	0	0	200	137.5
M9	1.1	9.5	48	9.5	1.1	0	1080	0	137.5
M10	1.1	13	60	13	1.1	350	720	0	137.5
M11	1.1	14	60	14	1.1	700	0	0	137.5
M12	1.1	12.1	60	12.1	1.1	35	0	0	137.5
Total annuel		120		120		1505	3540	980	1650

Grand total : 7.675.000 FB

Figure 3.7

Dans notre marche vers l'optimum, il paraît logique de repartir du PIC à stock constant et d'éliminer les sources de coût. Un examen attentif de la figure 3.8 montre que la période M4-M9 est fertile en changement de rythme de production et, par conséquent, induit des coûts élevés d'embauche et de licenciement. Une manière de minimiser ces coûts consiste à ne prévoir qu'un nombre limité (3) de débits de production : par exemple, 9.000, 10.000 et 11.000 articles par mois. Le PIC correspondant est donné à la figure 3.8.

⁷ En sus des coûts de production.

Mois	Stock initial	Production	Nombre d'ouvriers	Demande	Stock final	Coût des heures suppl. (en kFB)	Coût d'emb. (en kFB)	Coût de lic. (en kFB)	Coût de stockage (en kFB)
M-1		10	50		1.1				
M1	1.1	9	45	9	1.1	0	0	100	137.5
M2	1.1	9	45	6.2	3.9	0	0	0	487.5
M3	3.9	10	50	8	5.9	0	300	0	737.5
M4	5.9	10	50	11	4.9	0	0	0	612.5
M5	4.9	10	50	13.2	1.7	0	0	0	212.5
M6	1.7	10	50	10	1.7	0	0	0	212.5
M7	1.7	10	50	8	3.7	0	0	0	462.5
M8	3.7	10	50	6	7.7	0	0	0	962.5
M9	7.7	10	50	9.5	8.2	0	0	0	1025
M10	8.2	10	50	13	5.2	0	0	0	650
M11	5.2	11	55	14	2.2	0	300	0	275
M12	2.2	11	55	12.1	1.1	0	0	0	137.5
Total annuel		120		120		0	600	100	5912.5

Grand total : 6.612.500 FB

Figure 3.8

Les trois colonnes Production, Demande et Stock constituent le PIC (envisagé ici sur un horizon de 12 mois) le plus adéquat pour l'atelier considéré.

Le PIC est un premier outil permettant à l'entreprise de planifier ses capacités de production⁸. La production prévisionnelle est convertie en heures de travail dans le but de vérifier l'adéquation entre la charge et la capacité globales par atelier et pour toutes les familles de produits.

Supposons que l'entreprise ait défini quatre familles de produits à fabriquer, séquentiellement, dans un atelier d'usinage puis dans un atelier d'assemblage.

Les PICs des quatre familles sont donnés à la figure 3.9.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Famille A	2166	1700	1700	1800	1800	1800
Famille B	520	500	490	500	500	550
Famille C	990	850	1100	1000	1000	1020
Famille D	150	120	130	100	150	100

Figure 3.9

A la figure 3.10, est représentée la charge correspondant aux différentes familles.

⁸On parle, dans la littérature anglo-saxonne, de Resource Requirement Planning, à ce propos.

	Famille A	Famille B	Famille C	Famille D
Usinage (en h / pc)	1	0.5	1	2
Assemblage (en h / pc)	0.5	0.5	0.5	1

Figure 3.10

Un calcul élémentaire nous permet de dresser le tableau de la figure 3.11

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Charge en usinage (en heures)	3716	3040	3305	3250	3350	3295
Capacité en usinage (en heures) ⁹	4000	4000	3000	4000	4000	4000
Charge en assemblage (en heures)	1988	1645	1775	1750	1800	1785
Capacité en assemblage (en heures) ⁹	1800	1800	1800	1350	1800	1800

Figure 3.11

Notons qu'il est possible d'augmenter la précision du calcul, dans le cas de longs délais (supérieurs à notre résolution temporelle d'un mois) de fabrication, en avançant les opérations d'usinage d'un mois (ou plus) par rapport aux opérations d'assemblage.

En cas de surcharge, on peut utiliser les moyens suivants :

- recours aux heures supplémentaires
- mutation de personnel depuis les ateliers en sous-charge
- recours à la sous-traitance
- recours au personnel intérimaire
- embauche
- investissement en ressources de production supplémentaires

En cas de sous-charge, on a le choix entre :

- suppression des heures supplémentaires
- chômage technique
- rapatriement de la sous-traitance
- suppression du travail intérimaire
- licenciements.

Il est également possible, à ce stade, de procéder à une planification financière. En effet, il est aisé de comparer, dans l'horizon du PIC, l'évolution des coûts de vente (comprenant main d'oeuvre, matières et composants achetés à l'extérieur, dépréciation de l'équipement de production, frais de vente et d'administration), de la valeur des stocks et du revenu des ventes.

⁹Il s'agit d'une capacité réelle démontrée précédemment.

3.6 Le business plan (plan financier)

Cette planification financière consiste, par mois et sur un horizon de 6 mois également, à prévoir par famille de produits l'évolution du coût des ventes, du revenu des ventes et de la valeur du stock. La figure 3.12 montre le business plan du mois M1 pour les familles de produits A et B. Les données du calcul sont en grisé.

Famille	M-1	M1		kFB		
A			Prix de revient	40		
			Prix de vente	45		
Production		720	Coût de production	28.800		
Vente		700	Revenu des ventes	31.500	Coût des ventes	28.000
Stock final	180	200	Valeur du stock	8.000	Profit	3.500
B			Prix de revient	35		
			Prix de vente	40		
Production		160	Coût de production	5.600		
Vente		110	Revenu des ventes	4.400	Coût des ventes	3.850
Stock final	50	100	Valeur du stock	3.500	Profit	550

Figure 3.12

Signalons, pour terminer que le business plan, le PIC et le capacity plan sont, en général, intégrés dans le même tableau.

3.7 Le programme directeur (PD)¹⁰ et le programme directeur de production (PDP)¹¹

Le programme directeur est un échéancier des produits finis à fabriquer compte tenu des prévisions de vente, des commandes clients et du stock disponible; il s'agit en fait de détailler le PIC pour **tous** les produits finis avec une résolution temporelle plus grande (de l'ordre de la semaine) sur un horizon plus court (de l'ordre d'une dizaine de semaines). Le programme directeur de production est le sous-ensemble du PD qui ne reprend que les ordres de fabrication.

Selon la structure des produits, la mise en oeuvre du PD se fait de la manière suivante :

- structure convergente (MTS): PD des produits finaux basé sur des prévisions de vente;
- structure à points de regroupement (ATO): PD des produits finaux basé sur des commandes fermes; PD des sous-ensembles basé sur des prévisions d'utilisation;
- structure divergente (MTO) : PD des produits finaux basé sur des commandes fermes; PD des matières premières et composants basé sur des prévisions d'utilisation.

La figure 3.13 montre un exemple de PD pour un produit fabriqué sur stock, par lots de 200 pièces en 1 semaine; le stock de sécurité est fixé à 100 pièces; les données du problème sont représentées en grisé.

PD		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Prévisions de ventes			30	35	40	50	60	60	70	70	50
Commandes clients		50	20	15	10						
Stock prévisionnel	200	150	300	250	200	150	290	230	160	290	240
PDP											
Fin			200				200			200	
Début		200				200			200		

Figure 3.13

Il faut noter que le PD (à la différence du calcul des besoins) n'est pas établi automatiquement. C'est le responsable du planning qui positionne ces ordres considérés, par conséquent, comme étant fermes

Le PD est réactualisé à chaque période en utilisant toutes les informations disponibles. Supposons, par exemple, qu' en semaine 2 les prévisions de ventes ne se réalisent pas et soient reportées, en partie, en semaine 3. Le PD correspondant est donné à la figure 3.14.

PD		S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Prévisions de ventes			20	20	40	60	60	70	70	50	50
Commandes clients		20	40	30	10						
Stock prévisionnel	150	330	270	220	170	310	250	180	310	260	210
PDP											
Fin		200				200			200		
Début					200			200			

Figure 3.14

¹⁰appelé, dans la littérature anglo-saxonne, master schedule.

¹¹appelé, dans la littérature anglo-saxonne, master production schedule.

On remarque que les ordres fermes de 200 en semaines 6 et 9 pourraient être reportés, respectivement, en semaines 7 et 10, sans passer sous le stock de sécurité. Si le responsable du planning en prend la décision, le nouveau PDP sera celui de la figure 3.15.

PD		S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Prévisions de ventes			20	20	40	60	60	70	70	50	50
Commandes clients		20	40	30	10						
Stock prévisionnel	150	330	270	220	170	110	250	180	110	260	210
PDP											
Fin		200					200			200	
Début						200			200		

Figure 3.15

Le PD est, en général, complété par le calcul du disponible à la vente. Ce disponible permet de donner aux futures commandes des délais de livraison précis et fiables. Le disponible instantané se calcule de la manière suivante :

- pour les périodes où aucune production n'est planifiée, le disponible est nul;
- pour les périodes où une production est planifiée, le disponible vaut la quantité produite moins les commandes clients prévues jusqu'à (non compris) la période où une production est, à nouveau, planifiée.

On peut, donc, à partir de la figure 3.13 établir le tableau de la figure 3.16.

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Commandes clients		50	20	15	10						
PDP fin			200				200			200	
Disponible instantané	0	0	155	0	0	0	200	0	0	200	0
Disponible cumulé	100	100	255	255	255	255	455	455	455	655	655

Figure 3.16

Le PDP doit faire l'objet d'un contrôle de capacité plus fin que celui qui concerne le PIC.

En effet, si le PDP dépasse les capacités de production, on assiste à une désastreuse augmentation des stocks de matières premières et des en-cours¹² avec la conséquence immédiate d'un accroissement du lead-time¹³. Il s'agit d'une validation vitale (appelée Rough Cut Capacity Planning par opposition au Capacity Requirement Planning qui sera effectué à un niveau encore plus détaillé).

¹²Ces en-cours portent, en général, le délicieux nom de WIPs (Works In Process).

¹³Le manufacturing lead-time est le temps qui s'écoule entre le lancement d'un ordre de fabrication et la mise à disposition du produit.

Par produit, on dispose de la charge induite dans les différents postes de travail. Prenons l'exemple d'une fabrication de deux produits P1 et P2 nécessitant l'estampage, l'usinage et l'assemblage de composants.

P1 (par unité)	S-2	S-1	S
Estampage	0.15 h	-	-
Usinage	-	0.4 h	-
Assemblage	-	-	0.5 h

Figure 3.17

P2 (par unité)	S-2	S-1	S
Estampage	0.2 h	-	-
Usinage	-	0.5 h	-
Assemblage	-	-	0.7 h

Figure 3.18

Supposons, en outre, que nous ayons le PDP (fin) suivant :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
P1	200		200	200		200		200		200
P2		150		150	150		150		150	

Figure 3.19

Nous obtenons, aisément, le tableau de charge-capacité suivant :

(h)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Charge estampage	30	60	30	30	30	30	30	30
Capacité estampage	35	35	35	35	35	35	35	35
Charge usinage	75	80	155	75	80	75	80	75
Capacité usinage	100	100	100	100	100	100	100	100
Charge assemblage	100	105	100	205	105	100	105	100
Capacité assemblage	110	110	110	110	110	110	110	110

Figure 3.20

En cas de surcharge, les remèdes classiques sont :

- révision du PDP;
- le recours aux heures supplémentaires;
- l'appel à la sous-traitance;
- le routage des pièces vers d'autres centres de charge;
- l'embauche.

Dans le cas de la figure 3.20, on peut noter que les surcharges (estampage en S2, usinage en S3 et assemblage en S4) sont dues aux réceptions simultanées de P1 et P2 en S4. Un lissage des charges par révision du PDP semble peu prometteur vu la faible marge de capacité résiduelle. Il faudra donc faire recours aux autres remèdes.

Remarquons, pour terminer, qu'une sous-charge systématique et répétitive des départements de production est, également, une pathologie à investiguer soigneusement.

3.8 Le calcul des besoins (MRP I)

Le calcul des besoins repose sur :

- les prévisions de vente
- les stocks et les en-cours
- les nomenclatures des produits
- les gammes opératoires.

La précision du calcul dépend, par conséquent, directement de celle de ces informations.

Peuvent, donc, être considérés comme préalables à l'implantation d'un système MRP1 :

- l'utilisation, par le service commercial, de méthodes fiables et éprouvées de prévision de ventes
- le suivi détaillé de la production (en particulier pour ce qui concerne les stocks et en-cours)
- la description fine de la structure des produits fabriqués
- l'explicitation et la formalisation des modes opératoires utilisés en production.

3.8.1 Notion de nomenclature (bill of material)

La nomenclature décrit la structure d'un produit en détaillant les ensembles, sous-ensembles, composants et matières qui le composent. Elle fournit, en outre les délais d'obtention des différents articles.

La figure 3.21 montre un exemple de nomenclature à quatre niveaux.

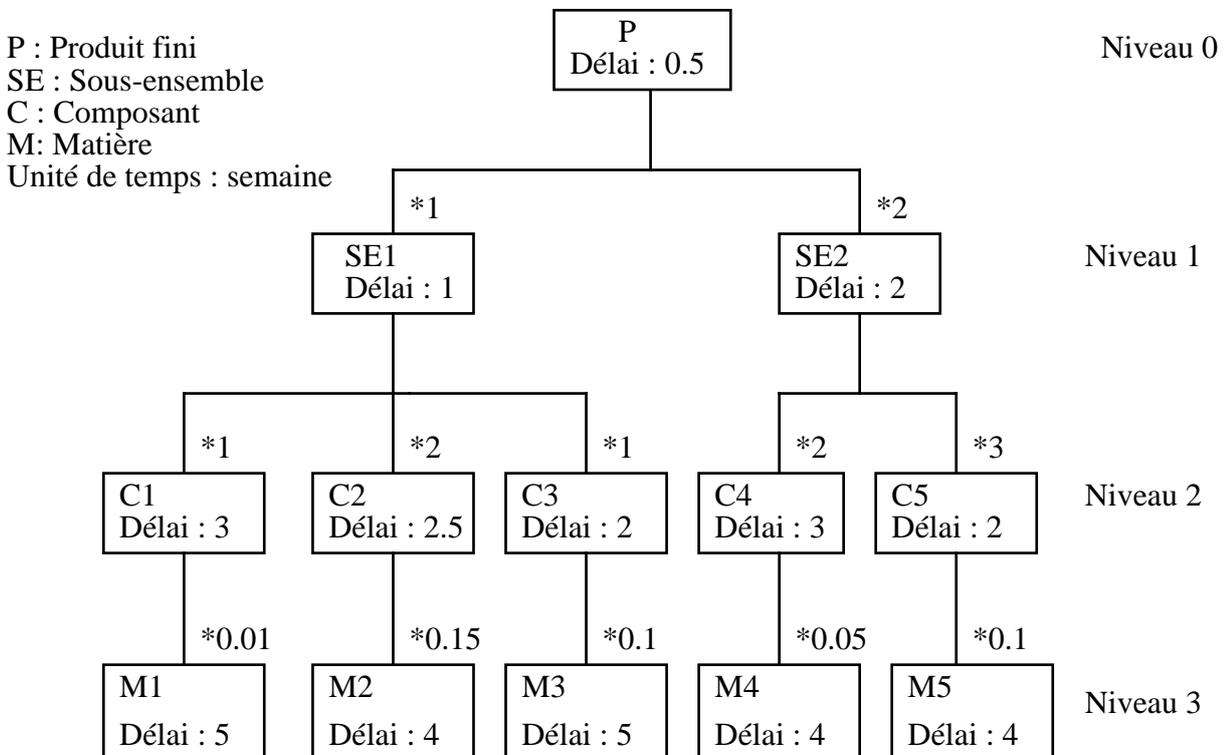


Figure 3.21

Un certain nombre de remarques s'imposent :

- les relations entre les objets s'appellent des liens de nomenclature;
- les unités utilisées pour les coefficients multiplicateurs sont tantôt un nombre d'articles, tantôt une masse (en kg) de matière;
- un article n'apparaît jamais qu'une fois par nomenclature et est au même niveau, le cas échéant, dans diverses nomenclatures; c'est le niveau le plus profond qui est systématiquement choisi : ceci permet d'allouer le stock disponible au besoin qui apparaît le premier dans le temps;
- un article virtuel est un sous-ensemble qui n'existe que transitoirement dans la mesure où il est immédiatement inclus dans un ensemble; il n'est, donc, jamais stocké en tant que tel.

3.8.2 Méthode de calcul

Le calcul pour un article donné se fait de la manière suivante :

- besoin brut = besoin indépendant (commandes clients) + besoin dépendant (générés par des ensembles plus complexes auxquels l'article appartient)
- stock disponible = stock physique - stock de sécurité + réceptions attendues
- besoin net = besoin brut - stock disponible (non défini si la différence est négative)
- ordre proposé = besoin net * (1 + rebut).

L'ordre proposé sera transformé en ordre ferme d'achat ou de fabrication qui sera avancé dans le temps, par rapport au moment où le besoin net doit être satisfait; cette avancée dans le temps représente le délai entre le lancement de l'ordre et sa réception et tient compte de :

- les temps d'attente avant exécution et transport
- les temps d'exécution
- le temps de transport
- le temps de contrôle
- le temps de changement de série éventuel

L'ordre génère, à son tour, des besoins en composants plus simples.

Prenons l'exemple de la nomenclature de la figure 3.22.

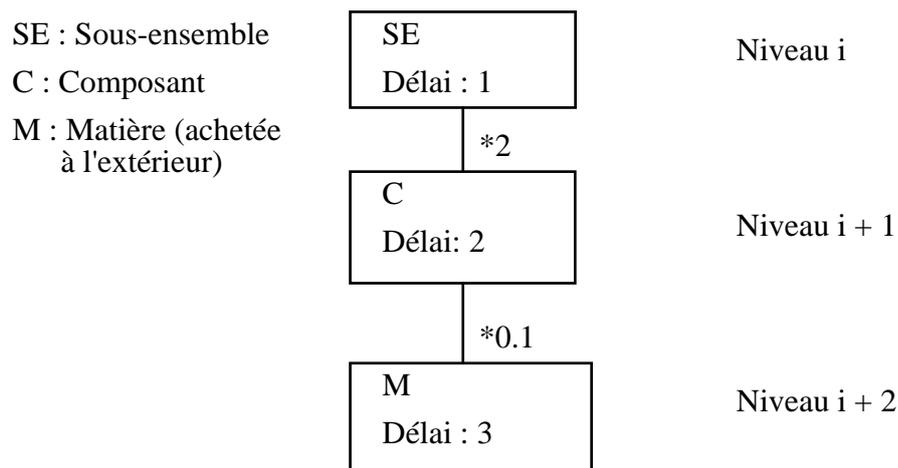


Figure 3.22

Les quantités économiques sont de 250 pour SE, de 500 pour C et de 200 pour M.
 Avec un taux de rebut nul, on obtient le tableau représenté à la figure 3.23
 Les données du calcul sont en grisé.

		S1	S2	S3	S4	S5
Niveau i						
Besoin brut		120	150	220	200	150
Réceptions attendues		0	0	0	0	0
Stock disponible	350	230	80	110	160	10
Ordre proposé Fin				250	250	
Ordre proposé Début			250	250		
Niveau i + 1						
Besoin brut			500	500		
Réceptions attendues		0	500	0	0	0
Stock disponible	100	100	100	100	100	100
Ordre proposé Fin				500		
Ordre proposé Début		500				
Niveau i + 2						
Besoin brut		50				
Réceptions attendues		0	0	200	0	0
Stock disponible	200	150	150	350	350	350
Ordre proposé Fin						
Ordre proposé Début						

Figure 3.23

La figure 3.24 propose une nomenclature à plusieurs composants.

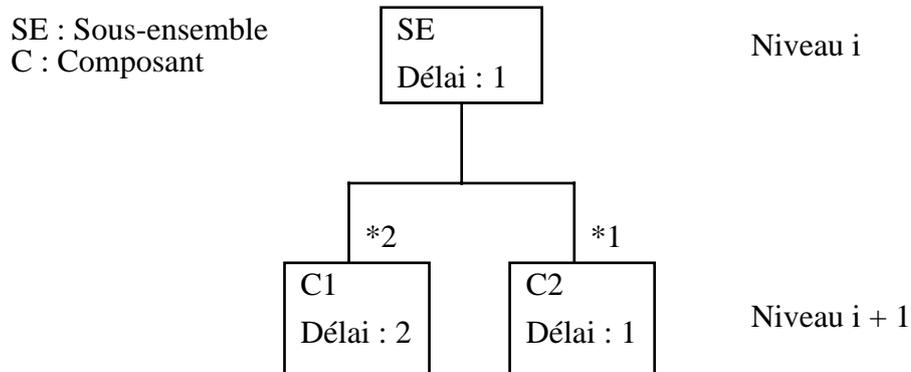


Figure 3.24

Ayant des quantités économiques de 200 pour SE, de 350 pour C1 et de 250 pour C2, on obtient le tableau de la figure 3.25.

		S1	S2	S3	S4	S5
SE						
Besoin brut		100	150	200	180	150
Réceptions attendues		0	0	0	0	0
Stock disponible	300	200	50	50	70	120
Ordre proposé Fin				200	200	200
Ordre proposé Début			200	200	200	
C1						
Besoin brut			400	400	400	
Réceptions attendues		0	350	0	0	0
Stock disponible	160	160	110	60	10	10
Ordre proposé Fin				350	350	
Ordre proposé Début		350	350			
C2						
Besoin brut			200	200	200	
Réceptions attendues		0	0	0	0	0
Stock disponible	100	100	150	200	0	0
Ordre proposé Fin			250	250		
Ordre proposé Début		250	250			

Figure 3.25

Un dernier exemple générique est donné à la figure 3.26.

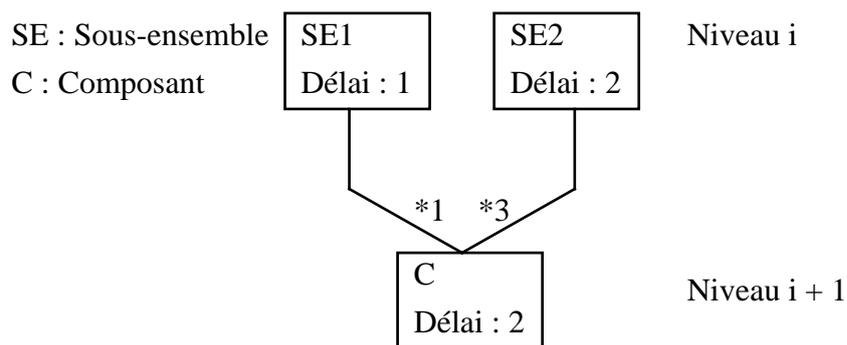


Figure 3.26

Avec des quantités économiques de 250 pour SE1, 200 pour SE2 et 500 pour C, on obtient la figure 3.27.

		S1	S2	S3	S4	S5
SE1						
Besoin brut		100	150	150	180	150
Réceptions attendues		0	0	0	0	0
Stock disponible	220	120	220	70	140	240
Ordre proposé Fin			250		250	250
Ordre proposé Début		250		250	250	
SE2						
Besoin brut		0	90	100	30	0
Réceptions attendues		0	0	0	0	0
Stock disponible	140	140	50	150	120	120
Ordre proposé Fin				200		
Ordre proposé Début		200				
C						
Besoin brut		850		250	250	
Réceptions attendues		500	0	0	0	0
Stock disponible	350	0	0	250	0	0
Ordre proposé Fin				500		
Ordre proposé Début		500				

Figure 3.27

Dans les exemples précédents, les besoins nets étaient regroupés, comme c'est souvent le cas en pratique, par quantités économiques. On peut imaginer de regrouper les besoins nets par périodes; on décide, par exemple, de lancer les ordres couvrant les besoins nets au début de chaque période de trois semaines (cf figure 3.28 avec un taux de rebut de 2%).

		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Besoin brut		100	150	150	180	150	120
Réceptions attendues		0	0	0	0	0	0
Stock disponible (av. reg.)	220	120	0	0	0	0	0
Besoins nets (av. reg.)		-	30	150	180	150	120
Stock disponible (ap. reg.)	220	300	150	0	270	120	0
Ordre proposé Fin		184			459		
Ordre proposé Début	184			459			

Figure 3.28

Il convient, enfin, de remarquer que le calcul des besoins ne fait que **proposer** des ordres d'achat ou de fabrication; c'est le responsable MRP qui transformera ces ordres proposés en ordres fermes.

3.8.3 Calcul et suivi des charges détaillées

Le but de ce calcul est de vérifier que les besoins qui viennent d'être calculés peuvent être satisfaits par les capacités de production disponibles. Quelques définitions s'imposent.

- Centre (ou poste) de charge : il s'agit d'un groupe de ressources de production auquel est destiné un ordre de fabrication issu du calcul précédent; cet ensemble permet, donc, de progresser d'un niveau dans la nomenclature correspondante.
- Charge : c'est, pour chaque ordre, le temps éventuel de changement de série (set-up time) augmenté du temps nécessaire à la fabrication du nombre d'articles prévus dans ledit ordre. La charge se mesure, donc, en heures.
- Profil de charge : il s'agit, pour chaque centre de charge, de l'évolution de la charge au cours du temps; en comparant ce profil à la capacité disponible (également exprimée en heures), on met facilement en évidence les périodes de sous-charge et de surcharge. On peut, également, détecter les goulets d'étranglement (en surcharge prolongée) transitoires ou permanents.

Pour concrétiser les choses, imaginons un centre de charge ayant une capacité constante de 400 heures par semaine. Les entrées prévisionnelles, pour chaque semaine, correspondent à la charge induite par tous les ordres lancés cette semaine là. Le profil de charge correspondant est donné à la figure 3.29 (les données sont en grisé).

		S1	S2	S3	S4	S5
Entrées prévisionnelles		360	495	480	350	410
Sorties prévisionnelles		400	400	400	400	400
Charge prévisionnelle	1100	1060	1155	1235	1185	1195

Figure 3.29

Une augmentation de la charge à capacité constante entraîne, inévitablement, un accroissement du délai de fabrication. En S3, par exemple, le délai est de $1235 / 400 = 3.1$ semaines alors qu'il n'était que de $1060 / 400 = 2.6$ semaines en S1. Il est, donc, important d'identifier les périodes de surcharge (cf figure 3.30).

	S1	S2	S3	S4	S5
Besoin en capacité	360	495	480	350	410
Capacité	400	400	400	400	400
Besoin / Capacité (%)	90	124	120	88	103

Figure 3.30

La surcharge peut être résorbée par un accroissement temporaire de la capacité (heures supplémentaires, personnel intérimaire,...) ou un lissage de la charge (par avance ou retard de certains ordres).

Il est intéressant de suivre les profils de charge correspondant aux différents centres de manière à vérifier que le délai utilisé dans la nomenclature est conforme au délai moyen observé en atelier. La figure 3.31 donne le profil de charge pour un centre donné.

	S-3	S-2	S-1	S1	S2	S3
Entrées						
Prévisionnelles	435	350	410	390	380	380
Réelles	390	340	420			
Sorties						
Prévisionnelles	400	400	400	400	400	400
Réelles	390	380	420			
Charge						
Prévisionnelle	1235	1150	1170	1150	1130	1110
Réelle	1200	1160	1160			

Figure 3.31

La moyenne sur 3 semaines de la capacité réelle est de 397 heures/semaine, celle des charges réelles est de 1.173 heures. Le délai moyen d'obtention de l'article est, par conséquent de $1.173 / 397 = 3$ semaines. Il convient, le cas échéant, de réactualiser ce délai dans la nomenclature ou de prendre des actions pour le modifier.

3.8.4 Extension au cas du Make-To-Order

La présentation classique du calcul des besoins correspond à une stratégie MTS où les quantités des divers produits finaux à fabriquer sont prédéterminées dans un cadre prévisionnel supposé fiable. L'environnement MTO travaille, à cet égard, d'une manière moins déterministe et peut rencontrer certaines difficultés d'approvisionnement si les délais relatifs aux matières premières utilisées sont importants.

Une première approche consiste à gérer le stock de matières avec une stratégie de point de commande basée sur une estimation de la consommation moyenne.

Une approche plus sophistiquée (correspondant à des stocks plus légers) consiste à adapter quelque peu la version classique du calcul des besoins.

Illustrons cela par l'exemple d'un fabricant de boîtes aux lettres privées et publiques (découpe-plier-soudage de tôles) fournissant sur commande 3 familles de modèles en 2 matériaux.

Les produits sont notés PB1 (Petite Boîte, matériau 1), MB1 (Moyenne Boîte, matériau 1), GB1 (Grande Boîte, matériau 1), MB2, et GB2.

Les petites boîtes existent en un seul matériau; leur masse est d'un kilogramme.

Les moyennes boîtes existent en deux matériaux; leur masse est de deux kilogrammes; en moyenne, 60% d'entre elles sont en matériau 1 et 40% en matériau 2.

Les grandes boîtes existent en deux matériaux; leur masse est de cinq kilogrammes; en moyenne, 20% d'entre elles sont en matériau 1 et 80% en matériau 2.

Les nomenclatures génériques des diverses boîtes sont données à la figure 3.32.

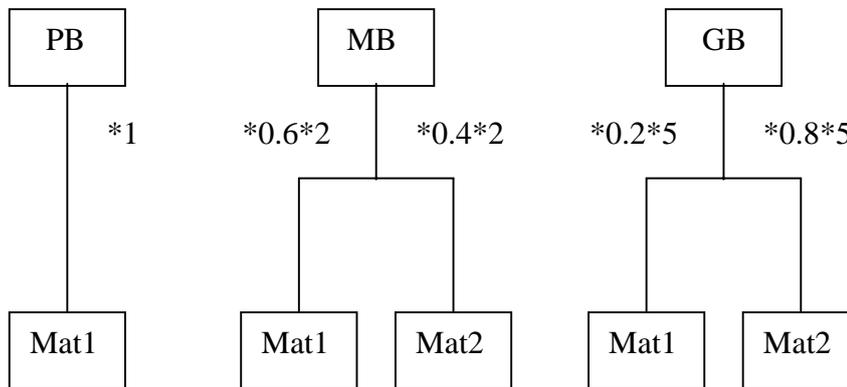


Figure 3.32

L'année précédente, 3.500 (70 par semaine) boîtes ont été fabriquées dans les proportions suivantes :

- 2.000 petites boîtes;
- 1.000 moyennes boîtes;
- 500 grandes boîtes.

On peut donc établir, à la figure 3.33, la nomenclature d'une boîte générique.

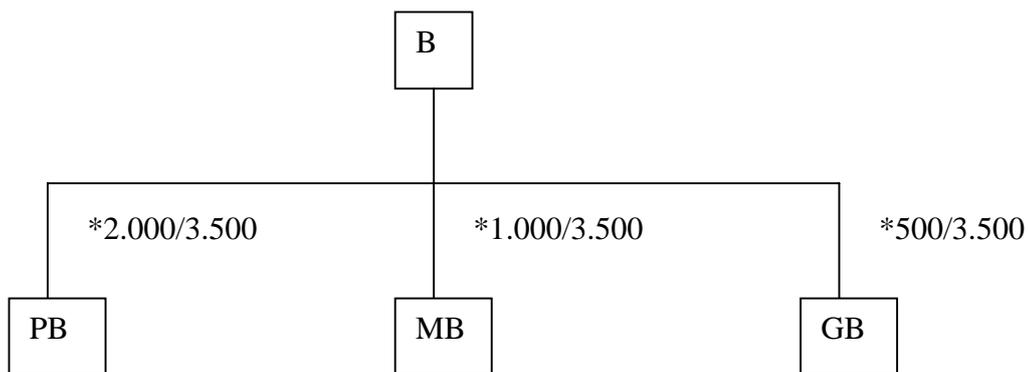


Figure 3.33

En combinant 3.32 et 3.33, on obtient la nomenclature générique de la figure 3.34

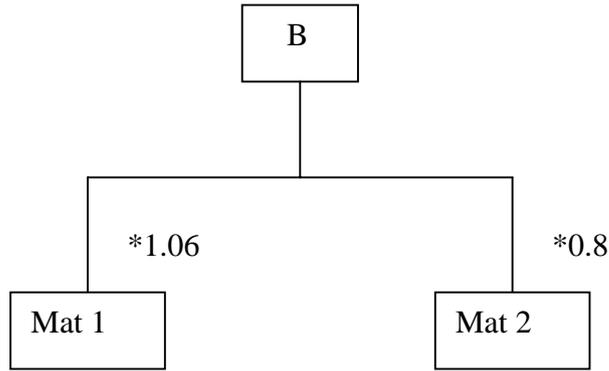


Figure 3.34

Le PDP prévoit la fabrication de 70 B par semaine.

Le besoin dépendant en Mat 1 et Mat 2 est, par conséquent, donné à la figure 3.35 .

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
B	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Mat 1	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2
Mat 2	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56

Figure 3.35

La table de la figure 3.35 est modifiée chaque fois qu'une commande ferme pour un type de boîte est enregistrée. On incrémente la quantité du type de boîte correspondant et on décrémente la quantité de B générique de la même semaine.

La figure 3.36 montre une telle utilisation.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
B	0	0	0	20	20	20	70	50	70	70
PB1	40	40	40	20	20	20	0	0	0	0
MB1	30	0	0	0	30	0	0	0	0	0
GB1	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0
MB2	0	0	30	30	0	0	0	20	0	0
GB2	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0
Mat 1	100	190	40	41.2	101.2	41.2	74.2	53	74.2	74.2
Mat 2	0	0	60	76	16	166	56	80	56	56

Figure 3.36

4 Nouvelles approches

4.1 Introduction

Depuis quelques années, des approches alternatives ont été décrites dans la littérature et mises en oeuvre, avec un succès étonnant parfois, dans des environnements productifs réels.

Pour mettre concrètement en évidence les avantages et inconvénients des diverses propositions, nous allons prendre l'exemple simple d'une cellule de production constituée de trois stations en série (cf figure 4.1)

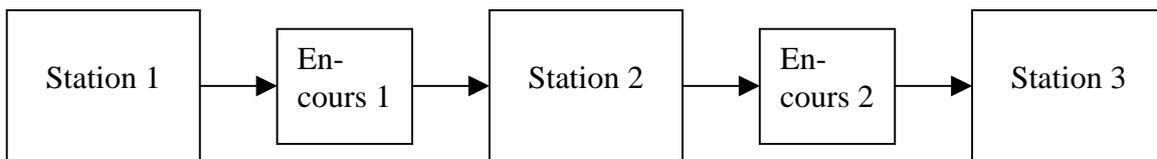


Figure 4.1

Nous supposons que les trois stations sont capables de produire 2, 3 ou 4 pièces par jour, chaque quantité étant équiprobable. Vu que 2 est le déséquilibre maximum entre les productions journalières des stations, il paraît raisonnable de prévoir des en-cours pouvant contenir un maximum de deux pièces. La figure 4.2 donne l'évolution de la production pendant 10 jours, ainsi que les moyennes correspondant à une production de 1000 jours (les en-cours initiaux sont de 2 pièces).

Jour	Stat1	Cap1	Prod1	En-cours1	Stat 2	Cap2	Prod2	En-cours2	Stat 3	Cap3	Prod3
1	0,267444	2	2	2	0,566964	3	3	2	0,363055	3	3
2	0,778245	4	4	1	0,77331	4	4	2	0,889334	4	4
3	0,352073	3	3	1	0,357191	3	2	2	0,17995	2	2
4	0,924658	4	2	2	0,496383	3	2	2	0,188188	2	2
5	0,276082	2	2	2	0,403897	3	3	2	0,88631	4	4
6	0,607847	3	3	1	0,665408	3	3	1	0,18478	2	2
7	0,880589	4	3	1	0,933489	4	2	2	0,002246	2	2
8	0,474636	3	2	2	0,27021	2	2	2	0,947837	4	4
9	0,61275	3	3	2	0,91472	4	4	0	0,676141	4	4
10	0,032028	2	2	1	0,59574	3	3	0	0,978328	4	3
	0,491263	2,978	2,7	1,2	0,495651	2,988	2,702	0,826	0,499059	2,996	2,702

Figure 4.2

Les colonnes Stati représentent des nombres aléatoires compris entre 0 et 1 (distribution uniforme). La capacité de la station i est déterminée par :

- si $Stati < 0.33$ alors $Capi = 2$

- si $0.33 \leq \text{Stati} < 0.66$ alors $\text{Capi} = 3$
- si $\text{Stati} \geq 0.66$ alors $\text{Capi} = 4$.

Les productions des trois stations sont données par les équations suivantes :

- $\text{Prod3} = \text{MIN}(\text{CapAmont3} + \text{En-cours2} ; \text{Cap3})$
- $\text{Prod2} = \text{MIN}(\text{CapAmont2} + \text{En-cours1} ; 2 - \text{En-cours2} + \text{Prod3} ; \text{Cap2})$
- $\text{Prod1} = \text{MIN}(2 - \text{En-cours1} + \text{Prod2} ; \text{Cap1})$

où $\text{CapAmont3} = \text{MIN}(\text{Cap2} ; \text{En-cours1} + \text{CapAmont2})$ et $\text{CapAmont2} = \text{Cap1}$

L'en-cours se calcule par :

- $\text{En-cours1}(t) = \text{En-cours1}(t-1) + \text{Prod1}(t-1) - \text{Prod2}(t-1)$
- $\text{En-cours2}(t) = \text{En-cours2}(t-1) + \text{Prod2}(t-1) - \text{Prod3}(t-1)$

On constate que la production moyenne de la cellule (2.702) est inférieure de 10 % à la capacité moyenne des stations (3). Le temps moyen de fabrication est, quant à lui, égal à $1/2.70 + 1.2/2.70 + 1/2.70 + 0.83/2.70 + 1/2.70 = 1.9$ jour avec une dispersion assez faible. Face à cette situation, on peut envisager trois approches alternatives : la méthode classique, la théorie des contraintes et la méthode JIT (Just In Time). Nous allons examiner l'impact de ces approches sur l'exemple concret de la figure 4.1.

4.1.1 Méthode classique

L'approche classique identifie la limite des en-cours (2) comme étant responsable de la faible productivité de la cellule; on décide donc de déplaçonner les en-cours. La figure 4.3 donne l'évolution de la production pendant 10 jours, ainsi que les moyennes correspondant à une production de 1000 jours (les en-cours initiaux sont de 2 pièces).

Jour	Stat1	Cap1	Prod1	En-cours1	Stat 2	Cap2	Prod2	En-cours2	Stat 3	Cap3	Prod3
1	0,526702	3	3	2	0,80908	4	4	2	0,367286	3	3
2	0,952741	4	4	1	0,190161	2	2	3	0,325624	2	2
3	0,077412	2	2	3	0,786485	4	4	3	0,162849	2	2
4	0,47099	3	3	1	0,279032	2	2	5	0,553507	3	3
5	0,807209	4	4	2	0,579999	3	3	4	0,200718	2	2
6	0,327595	2	2	3	0,381036	3	3	5	0,467143	3	3
7	0,020565	2	2	2	0,184604	2	2	5	0,210751	2	2
8	0,993453	4	4	2	0,909992	4	4	5	0,242468	2	2
9	0,486476	3	3	2	0,890436	4	4	7	0,181482	2	2
10	0,546	3	3	1	0,475226	3	3	9	0,402787	3	3

	0,506412	3,034	3,034	30.90	0,493612	2,977	2,967	9,27	0,498672	2,996	2,958
--	-----------------	--------------	--------------	--------------	-----------------	--------------	--------------	-------------	-----------------	--------------	--------------

Figure 4.3

Cette fois, les productions et les en-cours sont donnés par :

- $Prod3 = \text{MIN} (\text{CapAmont3} + \text{En-cours2} ; \text{Cap3})$
- $Prod2 = \text{MIN} (\text{CapAmont2} + \text{En-cours1} ; \text{Cap2})$
- $Prod1 = \text{Cap1}$
où $\text{CapAmont3} = \text{MIN}(\text{Cap2} ; \text{En-cours1} + \text{CapAmont2})$ et $\text{CapAmont2} = \text{Cap1}$
- $\text{En-cours1} (t) = \text{En-cours1} (t-1) + \text{Prod1} (t-1) - \text{Prod2} (t-1)$
- $\text{En-cours2} (t) = \text{En-cours2} (t-1) + \text{Prod2} (t-1) - \text{Prod3} (t-1)$

On constate une augmentation sensible de la production moyenne de la cellule; celle-ci est inférieure à 3 parce que l' en-cours atteint la valeur 0 à certains moments (cela signifie que l'en-cours initial de 2 n'est pas suffisant pour assurer un découplage intégral entre les stations).

Deux inconvénients majeurs liés à un en-cours important (valeurs maxima de 61 et 23, valeur minimum de 0, valeurs moyennes de 30.9 et 9.27) doivent être mentionnés :

- l' immobilisation financière liée à l'en-cours a été multipliée par 20
- le temps de fabrication (lead time) est devenu beaucoup plus long et plus aléatoire; il varie en effet de 1.0 ($1/3.03 + 0/2.97 + 1/2.97 + 0/2.96 + 1/2.96$) à 29.3 ($1/3.03 + 61/2.97 + 1/2.97 + 23/2.96 + 1/2.96$) jours, avec une moyenne de 14.5 ($1/3.03 + 30.9/2.97 + 1/2.97 + 9.27/2.96 + 1/2.96$) jours.

4.1.2 Approche JIT¹⁴

La philosophie JIT consiste à s'attaquer à la racine du mal plutôt que de se protéger contre lui. Dans notre cas particulier, cela signifiera réduire la variabilité des 3 stations tout en maintenant strictement l'en-cours en dessous de 2 pièces.

La production potentielle de la station i est, dès lors, déterminée par :

- si $\text{Stati} < 0.1$ alors $\text{Capi} = 2$
- si $0.1 \leq \text{Stati} < 0.9$ alors $\text{Capi} = 3$
- si $\text{Stati} \geq 0.9$ alors $\text{Capi} = 4$.

La figure 4.4 donne l'évolution de la production pendant 10 jours, ainsi que les moyennes correspondant à une production de 1000 jours (les en-cours initiaux sont de 2 pièces).

¹⁴Just In Time

Jour	Stat1	Cap1	Prod1	En-cours1	Stat 2	Cap2	Prod2	En-cours2	Stat 3	Cap3	Prod3
1	0,830009	3	3	2	0,732019	3	3	2	0,367501	3	3
2	0,903026	4	3	2	0,434846	3	3	2	0,832411	3	3
3	0,320413	3	3	2	0,986664	4	3	2	0,239267	3	3
4	0,05026	2	2	2	0,81764	3	3	2	0,249856	3	3
5	0,049687	2	2	1	0,190255	3	3	2	0,706509	3	3
6	0,833643	3	3	0	0,41762	3	3	2	0,653935	3	3
7	0,509432	3	3	0	0,341931	3	3	2	0,317914	3	3
8	0,445048	3	3	0	0,022951	2	2	2	0,615376	3	3
9	0,81584	3	3	1	0,579563	3	3	1	0,101502	3	3
10	0,062143	2	2	1	0,513365	3	3	1	0,97294	4	4

	0,495185	2,999	2,893	1,167	0,494768	2,993	2,895	0,674	0,494037	3,007	2,897
--	-----------------	--------------	--------------	--------------	-----------------	--------------	--------------	--------------	-----------------	--------------	--------------

Figure 4.4

On constate une augmentation de la production moyenne à 2.9; ce résultat est inférieur à celui obtenu par la méthode classique mais, ici, le lead time moyen est de 1.7 ($1/2.89 + 1.16/2.90 + 1/2.90 + 0.67/2.90 + 1/2.90$) avec une faible dispersion.

Réduire la variabilité des stations peut être une opération relativement coûteuse surtout si elle est induite par des facteurs extérieurs tels la qualité des matières premières ou l'absentéisme humain.

4.1.3 Théorie des contraintes

Cette approche, que nous détaillerons plus loin, identifie un goulet et focalise toute son attention sur ledit goulet. Un buffer lui est adjoint de manière à éviter de le mettre en attente; un suivi particulier permet de réduire sa variabilité (cette préoccupation ici est un peu moins obsessionnelle qu'en JIT); enfin, chaque fois que l'en-cours du goulet a tendance à s'annuler, une action spéciale est exécutée en amont de manière à reconstituer ce stock aussi rapidement que possible. Nous supposons, ici, que le goulet est la station 3. Son buffer (En-cours2) va être porté à un maximum de 4 articles.

Compte tenu de la simulation des actions spéciales en amont du goulet, nous allons supposer que la variabilité des stations se définit (pour $i = 1,2$) par :

- si $Stat3 < 0.20$ alors $Cap3 = 2$
- si $0.20 \leq Stat3 < 0.80$ alors $Cap3 = 3$
- si $Stat3 \geq 0.80$ alors $Cap3 = 4$
- si $En-cours2 > 2$
 - si $Stati < 0.33$ alors $Capi = 2$
 - si $0.33 \leq Stati < 0.66$ alors $Capi = 3$
 - si $Stati \geq 0.66$ alors $Capi = 4$
- si $0 < En-cours2 \leq 2$

- si $Stati < 0.50$ alors $Capi = 3$
- si $Stati \geq 0.50$ alors $Capi = 4$
- si $En-cours2 = 0$ alors $Capi = 4$.

La figure 4.5 donne l'évolution de la production pendant 10 jours, ainsi que les moyennes correspondant à une production de 1000 jours (En-cours1 initial est de 2 pièces, En-cours2 initial est de 4 pièces).

Jour	Stat1	Cap1	Prod1	En-cours1	Stat 2	Cap2	Prod2	En-cours2	Stat 3	Cap3	Prod3
1	0,384453	3	3	2	0,92897	4	3	4	0,621717	3	3
2	0,270662	2	2	2	0,098891	2	2	4	0,419138	3	3
3	0,562611	3	3	2	0,615438	3	3	3	0,429872	3	3
4	0,985946	4	2	2	0,183683	2	2	3	0,165285	2	2
5	0,478285	3	3	2	0,450817	3	3	3	0,681875	3	3
6	0,909787	4	2	2	0,225199	2	2	3	0,889408	4	4
7	0,089201	3	3	2	0,253418	3	3	1	0,030918	2	2
8	0,859557	4	4	2	0,9177	4	4	2	0,947636	4	4
9	0,946702	4	4	2	0,770928	4	4	2	0,490676	3	3
10	0,13685	2	2	2	0,219941	2	2	3	0,250534	3	3

	0,492051	3,182	3,006	1,094	0,501235	3,229	3,006	2,689	0,504521	3,006	3,006
--	-----------------	--------------	--------------	--------------	-----------------	--------------	--------------	--------------	-----------------	--------------	--------------

Figure 4.5

On constate que la production journalière moyenne s'établit, cette fois, à 3; le lead time moyen est de $2.26 (1/3 + 1.09/3 + 1/3 + 2.69/3 + 1/3)$ jours avec une dispersion très acceptable. On peut, donc, considérer que la théorie des contraintes obtient de meilleurs résultats en production que JIT en exigeant moins d'efforts au niveau des stations ; l'augmentation de 2.90 à 3 (3%) ne réclame qu'un léger accroissement de la capacité d' En-cours2 (2 unités) et un allongement de 0.6 jour du lead time moyen. Ce résultat a été atteint en déséquilibrant la cellule (les capacités moyennes des stations 1 et 2 ont été portées à 3.18 et 3.23 respectivement).

Nous allons examiner le détail des deux dernières méthodes.

4.2 Théorie des contraintes

4.2.1 Les étapes de la démarche

Il est impératif de définir, tout d'abord, la notion de contrainte. Une contrainte est quelque chose qui limite les performances d'un système productif. On distingue, à cet égard, deux types de contraintes :

- les contraintes de ressource interne; reprenons le cas de la figure 4.1 et supposons que le marché demande une moyenne de 4 pièces par jour. Dans ce cas, la station 2 (ou la station 1) est clairement avec sa capacité moyenne de 3 pièces par jour une contrainte de ressource interne.
- les contraintes de marché; dans le même cas de la figure 4.1 avec une demande de 2 pièces par jour, nous avons une contrainte de marché dans la mesure où la station la moins capable pour cette pièce a néanmoins une capacité supérieure à la demande.

La démarche consiste, alors, à parcourir, itérativement, les 4 étapes suivantes :

1. identifier la contrainte du système productif,
2. établir une procédure d'exploitation de la contrainte,
3. subordonner toutes les actions à la procédure établie en 2,
4. élever la contrainte, c'est-à-dire atteindre des performances supérieures pour le système productif. Cette élévation de contrainte conduit généralement à un changement de contrainte, d'où l'itération.

Pour concrétiser les choses, reprenons l'exemple de la figure 4.1 avec une demande journalière de 3.5 pièces et appliquons lui la démarche telle qu'elle vient d'être définie.

1a. La station 3 est identifiée comme contrainte de ressource interne¹⁵, avec sa capacité moyenne journalière de 3 pièces.

2a. L'exploitation de ladite contrainte consiste à la protéger en créant un stock tampon et à réduire sa variabilité. On peut, également, prévoir un contrôle de qualité juste avant passage sur la contrainte de manière à éviter que celle-ci ne consacre du temps à une pièce déjà défectueuse.

¹⁵La station 1 ou 2 auraient pu être sélectionnées sur base des mêmes critères.

Une dernière action envisageable est de revoir les proportions des diverses séries produites (product mix) en termes de profit car il peut être intéressant de privilégier les séries qui utilisent le moins la contrainte¹⁶.

3a. La production des stations 1 et 2 sont subordonnées à la contrainte en limitant la taille du stock tampon à 4. Cela signifie que les stations 1 et 2 sont arrêtées chaque fois que le stock tampon de la contrainte est plein et, par contre, qu'elles sont dopées chaque fois que le stock tampon se vide dangereusement.

4a. L'élévation de la contrainte ne peut se faire, dans le cas qui nous occupe, que par accroissement de la capacité de la station 3 (heures supplémentaires ou achat d'une machine plus performante) ou par recours à la sous-traitance. Supposons qu'un sous-traitant fournisse à l'atelier une pièce supplémentaire par jour; ceci porte la capacité moyenne journalière de l'atelier à 4 pièces par jour et, par conséquent, c'est le marché (avec une demande journalière de 3.5 unités) qui devient la nouvelle contrainte. Il est crucial de déceler, à temps, le changement de contrainte car le maintien des procédures habituelles conduirait à alourdir le stock de produits finis au rythme de 0.5 unités par jour.

1b. Le marché est la nouvelle contrainte.

2b. L'exploitation de cette nouvelle contrainte consiste à valoriser le fait que l'on dispose d'une surcapacité de production; on peut, donc, réduire fortement les stocks et, par conséquent, les lead times ainsi que les coûts d'exploitation. Ce nouvel avantage permettra sûrement d'ouvrir de nouveaux marchés. La contrainte risque de changer, à nouveau¹⁷. Et ainsi de suite.

¹⁶En effet prenons l'exemple d'une contrainte de ressource interne ayant une capacité hebdomadaire de 168 heures (24 heures par jour, 7 jours sur 7) et capable de produire des pièces P1 et P2. Les données sont présentées ci-après.

Pièce	Temps de passage sur contrainte	Profit	Marché hebdomadaire
P1	2 heures	1000 FB	50 pièces
P2	0.5 heure	500 FB	300 pièces

Deux mixes sont possibles :

	Proportions	Profit	Temps de passage sur contrainte
Mix 1	50 P1	50000 FB	100 heures
	136 P2	68000 FB	68 heures
Total		118000 FB	168 heures
Mix 2	300 P2	150000 FB	150 heures
	9 P1	9000 FB	18 heures
Total		159000 FB	168 heures

Ce résultat provient du fait que P2 est plus profitable par heure de la contrainte ($500/0.5 = 1000$ FB/heure) que P1($1000/2 = 500$ FB/heure)

¹⁷Le caractère changeant de la contrainte doit, impérativement être accompagné d'un changement de comportement de tout le personnel de l'atelier. Celui-ci est, à l'heure actuelle, souvent trop peu flexible.

4.2.2 La planification drum-buffer-rope

La théorie des contraintes dissocie, clairement, le lot de production du lot de transfert. Le lot de production représente le nombre d'articles produits sur une station entre deux changements de série tandis que le lot de transfert concerne le nombre de pièces transportées d'une station à une station aval. Il faut remarquer que, dans beaucoup d'ateliers, ces deux lots sont, pour des raisons diverses mais non rationnelles, égaux. Si on peut comprendre que la taille minimum du lot de production soit imposée par des considérations liées au coût du changement de série (setup), il n'en va pas de même pour le lot de transfert. Or il faut être conscient qu'une taille exagérée du lot de transfert conduit à des lead times et des en-cours anormalement élevés. Pour fixer les idées, on peut reprendre l'exemple de la figure 4.1; si nous supposons que la taille commune des deux lots est 150 articles pour un temps de travail d'une demi-heure sur chaque station, on obtient :

- un lead time de 225 heures (près de 1 semaine) pour un temps de travail d'une heure et demie,
- un en-cours moyen de 75 pièces au pied de la station 1 et de 150 pièces au pied des stations 2 et 3.

La théorie des contraintes prend le contrepied de cette tendance trop répandue en proposant de minimiser le plus possible¹⁸ la taille du lot de transfert. Dans l'exemple de la figure 4.1, avec une taille unitaire du lot de transfert, on obtient :

- un lead time de 76heures,
- un en-cours moyen de 75 pièces au pied de la station 1 et de 1 pièce au pied des stations 2 et 3.

La trajectoire d'un article dans un atelier gouverné par la théorie des contraintes, consiste en :

- un transit très rapide¹⁹ du magasin de matières premières au stock de la contrainte,
- un séjour d'une certaine durée dans le stock de la contrainte (supposée de ressource interne),
- un transit très rapide de la contrainte au stock d'expédition.

La planification de la production dans l'atelier fait, donc, intervenir trois éléments importants :

- la planification détaillée de la contrainte (appelé le cabestan),
- les temps nécessaires au transit du magasin à la contrainte (appelé le câble liant le magasin à la contrainte) et de la contrainte à l'expédition (appelé le câble liant la contrainte à l'expédition).

On appelle stock de la contrainte l'ensemble des articles se trouvant en amont de la contrainte et devant y subir un travail; une partie du stock est réel : c'est celle qui se trouve, physiquement, dans le stock tampon décrit plus haut; l'autre partie est virtuelle et constituée de tous les articles en route vers la contrainte. La taille de ce stock se mesure, en général, en unité temporelle (temps nécessaire a la contrainte pour traiter tous les articles dudit stock); la taille du stock est égal, bien sûr, à la longueur du premier câble. Son rôle est clairement de protéger la contrainte, c'est-à-dire d'éviter qu'elle soit obligée de s'arrêter suite à un manque de travail.

De la même manière, on appelle stock de l'expédition l'ensemble des articles se trouvant en aval de la contrainte et ayant subi un travail au niveau de la contrainte²⁰; à nouveau, la taille de ce stock

¹⁸OPT propose clairement une taille unitaire pour le lot de transfert argumentant que la plupart des opérateurs travaillent sur des stations autres que la contrainte et qu'ils peuvent, par conséquent, consacrer une partie de leur temps au transport des pièces. Dans certains cas, les ressources de transport nécessitent, elles-mêmes, un temps de set-up et, par conséquent on peut admettre des tailles légèrement supérieures à l'unité.

¹⁹Comme le lot de transport a une taille unitaire, il n'y a, en principe, aucun temps d'attente en chemin.

(exprimée en nombre d'articles de chaque type) est égale à la longueur du second câble. Son rôle est de protéger l'expédition c'est-à-dire les délais de livraison promis à la clientèle.

Enfin, on prévoit, en général, un troisième stock (dit stock d'assemblage) dont le rôle est de stocker aux diverses stations d'assemblage les composants non-contraints (ne devant subir aucun travail sur la contrainte) devant être assemblés à des composants contraints (qui, eux, doivent être travaillés sur la contrainte).

La planification drum-buffer-rope consiste, donc, à :

- identifier la contrainte de ressource interne,
- planifier l'activité de la contrainte (c'est-à-dire du cabestan),
- fixer la longueur du premier câble (ce qui revient à déterminer la taille du stock de la contrainte),
- fixer la longueur du deuxième câble (ce qui revient à déterminer la taille du stock de l'expédition).

Il faut remarquer que le problème complexe de la planification de la production d'un environnement multiressource a été réduit à celui de la planification des opérations d'une machine unique. D'autre part, la taille des stocks dépend de la variabilité des ressources et de leur surcapacité éventuelle.

Ce qui se passe entre le magasin et la contrainte est le symétrique de ce qui se passe entre la contrainte et l'expédition; dans la suite, nous nous concentrerons sur la première partie et tout ce que nous en dirons pourra être, mutatis mutandis, transposé au niveau de la seconde.

Supposons que le plan de travail de la contrainte soit donné par la figure 4.6.

Type d'article	Taille du lot	Temps de travail (heures)
A1	24	6
A2	30	3
A3	50	10
A4	60	20

Figure 4.6

La taille du stock de la contrainte est supposée être de 15 heures; ce stock est divisé en trois régions de 5 heures chacune (la première pièce de la région 1 est celle qui est sur le point d'être traitée par la contrainte).

L'évolution temporelle du stock de la contrainte peut être représenté par la figure 4.7.

²⁰Certains articles ne passent pas, dans l'exécution de leur gamme opératoire, par la contrainte; ils ne sont pas pris en compte dans le calcul des stocks de la contrainte et de l'expédition.

Temps (heures)	Région 1	Région 2	Région 3
0	A1 A1 A1 A1 A1	A1 A2 A2 A2 A3	A3 A3 A3 A3 A3
1	A1 A1 A1 A1 A1	A2 A2 A2 A3 A3	A3 A3 A3 A3 A3
2	A1 A1 A1 A1 A2	A2 A2 A3 A3 A3	A3 A3 A3 A3 A3
3	A1 A1 A1 A2 A2	A2 A3 A3 A3 A3	A3 A3 A3 A3 A3
4	A1 A1 A2 A2 A2	A3 A3 A3 A3 A3	A3 A3 A3 A3 A3
5	A1 A2 A2 A2 A3	A3 A3 A3 A3 A3	A3 A3 A3 A3 A4

Figure 4.7

Les articles présents dans le stock réel sont représentés en caractères gras.

Normalement, tous les articles des régions 1 et 2 doivent se trouver dans le stock réel. Si un article de la région 2 n'est pas dans le stock réel (ce qui est le cas dès l'instant initial), une investigation est menée et une action corrective est lancée pour éviter ce phénomène dans l'avenir. Si un article de la région 1 manque dans le stock réel (c'est le cas à l'heure 5), une intervention d'urgence est programmée et exécutée de manière à reboucher le trou correspondant dans le stock.

On voit que la philosophie théorie des contraintes tend à améliorer sans cesse le fonctionnement de l'environnement productif en focalisant son effort sur ce qui provoque les trous les plus importants et les plus sévères dans le stock. Quand ces trous ont disparu, une tentative de réduction du stock est faite.

Signalons que les deux autres stocks peuvent être gérés de la même manière.

4.2.3 Les indicateurs de performance

Pour inciter les opérateurs (contraint et non-contraints) à travailler correctement, on utilise des indicateurs assortis de pénalités (qui, en général, grignent des primes extra-salariales).

Tout indicateur basé sur le degré d'utilisation des ressources de production (temps de travail, nombre de pièces produites,..) doit être proscrit dans le cadre de la théorie des contraintes puisque les ressources autres que la contrainte sont volontairement sous-utilisées. Un indicateur idoine mesure l'écart de production par rapport à la planification :

- l'avance par rapport à la planification sera pénalisée par le coût du stock excédentaire créé (par rapport à la planification) ; ce coût s'exprime en pénalité d'avance.
- le retard par rapport à la planification sera pénalisée par le manque à gagner de l'entreprise résultant du retard; ce manque s'exprime en pénalité de retard.

Tous les opérateurs disposent d'un display (remis à jour dynamiquement) leur montrant les indentificateurs des pièces se trouvant dans les trois régions du stock de la contrainte.

Opérateur contraint :

toute déviation, en avance ou en retard²¹ par rapport au planning, est sanctionnée en pénalités d'avance et/ou de retard. En fait l'incitant à suivre le planning est double : en effet l'article travaillé à la place d'un autre génère des pénalités d'avance tandis que l'article qui aurait dû être traité génère des pénalités de retard.

Opérateur non-contraint :

- il n'accepte de travailler un article qui lui arrive que s'il fait partie du stock courant aval (de la contrainte ou de l'expédition selon le cas); tout autre décision génère des pénalités d'avance. Il suffira de laisser passer suffisamment de temps pour que l'article apparaisse dans le stock courant.
- il donne la priorité à un article qui apparaît en région 1 ou 2 du stock car cet article génère des pénalités de retard jusqu'à ce qu'il soit passé à la station aval.
- il traite, sans pénalité d'aucune sorte, un article qui se trouve en région 3 du stock. Si cet article n'est pas traité dans des délais raisonnables, il apparaîtra en région 2 du stock et générera des pénalités de retard.

²¹Sauf au cas où le retard est dû au fait que le stock réel de la contrainte est vide; dans ce cas, c'est la station qui retient l'article qui est pénalisé en pénalités de retard.

4.3 JIT (Just In Time)

4.3.1 Philosophie

La philosophie JIT consiste en un nombre limité de principes à caractère universel :

- Tout ce qui n'est pas une source de valeur ajoutée pour les produits doit être détecté et éliminé. La valeur ajoutée doit être entendue soit comme une augmentation de performances ou de qualité à coût égal soit comme une réduction de coût à performances et qualité égales.
- Les problèmes de production doivent être résolus et non contournés par des pseudo-solutions qui permettent de s'en accommoder.
- La survie et le développement de l'entreprise supposent l'engagement de tous les travailleurs; un effort particulier doit être fait pour que tous puissent faire des suggestions pour ce qui concerne l'augmentation de la valeur ajoutée. L'idée maîtresse est que ce sont les opérateurs d'une station de production qui en connaissent le mieux les faiblesses et les défauts.

Concrétisons les deux premiers principes en prenant l'exemple des stocks et en-cours. On sait qu'ils allongent les lead times et les coûts (par les immobilisations financières qu'ils occasionnent).

D'autre part ces stocks ont été créés pour masquer des problèmes de grande variabilité productive (au niveau des stations de production et des opérateurs), de faible fiabilité (au niveau des prévisions de vente, des fournisseurs, des équipements internes de production, ...), de temps de changement de série trop longs ou de taux de rebut anormalement élevés. Ces stocks et en-cours font, donc, l'objet, dans le cadre JIT, d'une diminution graduelle et systématique.

Pour atteindre ces objectifs, la démarche JIT se focalise sur les points suivants :

- les changements de série (setups); la réduction de leur durée a une conséquence immédiate sur la taille des lots de production (dans le sens de la diminution) et donc sur le lead time et les stocks (dans le sens de la diminution). La réduction des temps de changement de série peut se faire en identifiant, soigneusement , les éléments externes (qui peuvent et doivent être exécutés pendant le travail de la station de production concernée) des éléments internes (qui réclament l'arrêt de la station); seuls ces derniers contribuent nécessairement au temps de changement de série. On peut réduire l'impact des éléments internes en faisant recours à des technologies avancées (changement automatique d'outils, serrages et palettes modulaires,..).
- la maintenance préventive et/ou prédictive généralisée en lieu et place de la maintenance curative; on sait que la panne d'une station de production crée des en-cours en amont et provoque l'arrêt des ressources en aval. En outre une certaine quantité de rebut est produite avant l'arrêt total de la station défailante. Enfin, un contrôle régulier permet de réduire la variabilité productive des équipements. On a, donc, intérêt à faire recours à une maintenance préventive ou prédictive qui a le grand mérite de pouvoir être planifiée et donc programmée à un moment où la ressource concernée peut être mise à l'arrêt sans conséquences pour l'atelier.
- l'obsession de la qualité; la non-qualité est, pour la première fois perçue comme ayant un impact très négatif sur les coûts à cause de ce qu'elle occasionne : du rebut, du retravail, des interventions sous garantie, de l'insatisfaction de la clientèle,...
- la flexibilité des équipements et des opérateurs; cette flexibilité est essentielle si l'on veut être capable de produire une grande variété de produits.

- l'établissement de relations durables et de confiance avec les fournisseurs et sous-traitants rigoureusement sélectionnés pour leur fiabilité et leur qualité; le coût unitaire de leur livraison n'est, donc, plus considéré comme le facteur essentiel. A cet égard, une livraison quotidienne, voire plusieurs livraisons par jour, sont autant d'atouts contribuant à une réduction des stocks; il y a, en outre, un effet indirect bénéfique de régularisation des flux matériels dans l'entreprise.
- Le passage d'une production poussée à une production tirée; l'organisation classique de la production prévoit que chaque station de production travaille à sa cadence maximum et envoie, le plus rapidement possible, sa production à la station aval. Ceci a un effet désastreux sur le volume global des stocks. Une organisation de production tirée n'autorise l'exécution d'un ordre au niveau d'une station que lorsque la station aval en exprime explicitement (cf méthode Kanban) le besoin.
- La responsabilisation et la motivation des travailleurs. Il s'agit d'un rejet catégorique des principes du Taylorisme (basé sur le modèle organisationnel militaire et sur une main d'oeuvre analphabète) et le recours à des techniques permettant à tout le monde de s'exprimer et de faire des critiques ou suggestions (cf cercles de qualité).
- L'approche incrémentale, graduelle et itérative au détriment de la recherche d'effets spectaculaires mais ponctuels.
- La stratégie de procédé; la démarche JIT identifie le transport de pièces et d'outillages comme étant coûteux sans apporter la moindre valeur ajoutée. Elle prône, donc, le passage d'une organisation de type job shop à une stratégie flow shop où les transports sont réduits au strict minimum.

Pour concrétiser les choses, nous allons considérer l'exemple simplifié d'un atelier fabricant un type de pièce en quatre opérations. Le lot de production Q est de 200 pièces; le lot de transfert est, ici, identique au lot de production.
L'organisation classique de la production est donnée à la figure 4.8

Opération	O _i (min)	Q*O _i (min)	Transfert (min)
1	2	400	20
2	3	600	20
3	4	800	20
4	5	1000	-
Total	14	2800	60

Figure 4.8

L'efficacité de la gestion peut être quantifiée par le rapport du temps de traitement d'une pièce par rapport à son lead time : $14 / 2860$ soit 0.49%.

Une première amélioration consiste à utiliser le principe du chevauchement (overlapping) des opérations qui consiste à transférer le lot de production en deux fois en sorte que les stations aval puissent être mises plus rapidement au travail. Les tailles Q1 et Q2 des lots de transfert se calculent de manière à ce que la station aval n'attende pas :

$$Q = Q1 + Q2$$

$$Q1 * O_{\text{aval}} > Q2 * O_{\text{amont}}$$

On déduit :

$$Q1 > (Q * O_{\text{amont}}) / (O_{\text{amont}} + O_{\text{aval}})$$

$$Q2 = Q - Q1$$

L'application de ce principe à notre atelier est représentée à la figure 4.9.

Opération	Oi (min)	Q1	Q2	Q1 * Oi (min)	Transfert (min)
1	2	80	120	160	20
2	3	86	114	258	20
3	4	89	111	356	20
4	5	200	-	1000	-
Total	14			1774	60

Figure 4.9

Le taux d'efficacité est, ici, égal à $14 / 1774$, soit 0.76 %.

On peut appliquer ce principe de chevauchement plus avant en imaginant des lots de transfert de 10 pièces. On remarque que les conditions de non-attente de la ressource aval sont remplies grâce au fait que les temps opératoires ont une croissance monotone de l'amont vers l'aval. Les données correspondantes sont résumées à la figure 4.10.

Opération	Oi (min)	Q1	Q2,...,Q20	Q1 * Oi (min)	Transfert (min)
1	2	10	10	20	20
2	3	10	10	30	20
3	4	10	10	40	20
4	5	200	-	1000	-
Total	14			1090	60

Figure 4.10

Le taux d'efficacité est, cette fois, égal à $14 / 1150$, soit 1.2 %.

Supposons, enfin, que les stations aient été regroupées géographiquement (de manière à rendre négligeable le temps de transfert) et que les lots de fabrication et de transfert soient unitaires. Dans ce cas, qui est celui du flow shop, le taux d'efficacité est égal à 100%.

On voit, clairement, le grand intérêt qu'il y a à passer, quand c'est possible économiquement, d'une organisation job shop à une architecture flow shop. Il est évident que le flow shop requiert plus de stations de travail que le job shop; la rentabilité de l'investissement supplémentaire suppose, donc, des volumes de production relativement conséquents.

Pour résumer en une phrase la philosophie JIT, on peut dire qu'il s'agit de fabriquer des produits de qualité, au moment voulu et en quantité adéquate.

4.3.2 La méthode Kanban

Cette méthode a vu le jour, comme chacun sait, chez Toyota (Japon) en 1958. C'est une des premières tentative (réussies) d'implantation du concept de production tirée en atelier de type flow shop. Kanban est la transcription latine d'un mot japonais signifiant "étiquette". Tout container présent dans l'atelier doit posséder un Kanban. **L'en-cours de l'atelier est, par conséquent, totalement maîtrisé.**

On trouve, dans les versions les plus sophistiquées deux variétés de Kanban :

- les Kanbans de production (lancement) KP attachés à une station de production,
- les Kanbans de transfert (prélèvement) KT attachés à un couple amont-aval de stations.

Chaque Kanban correspond à un type d'article particulier.

Le principe général est donné à la figure 4.11.

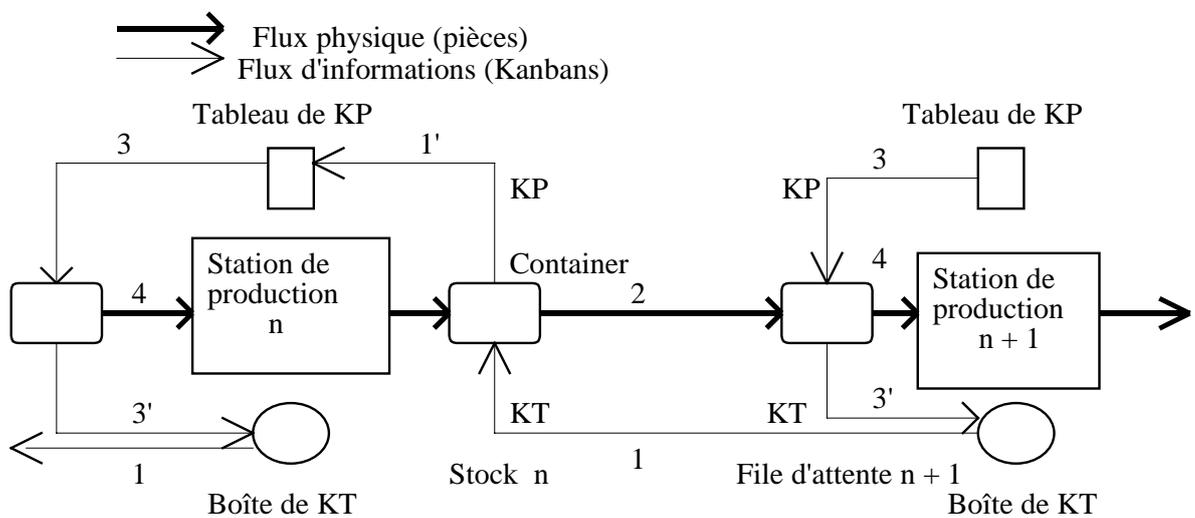


Figure 4.11

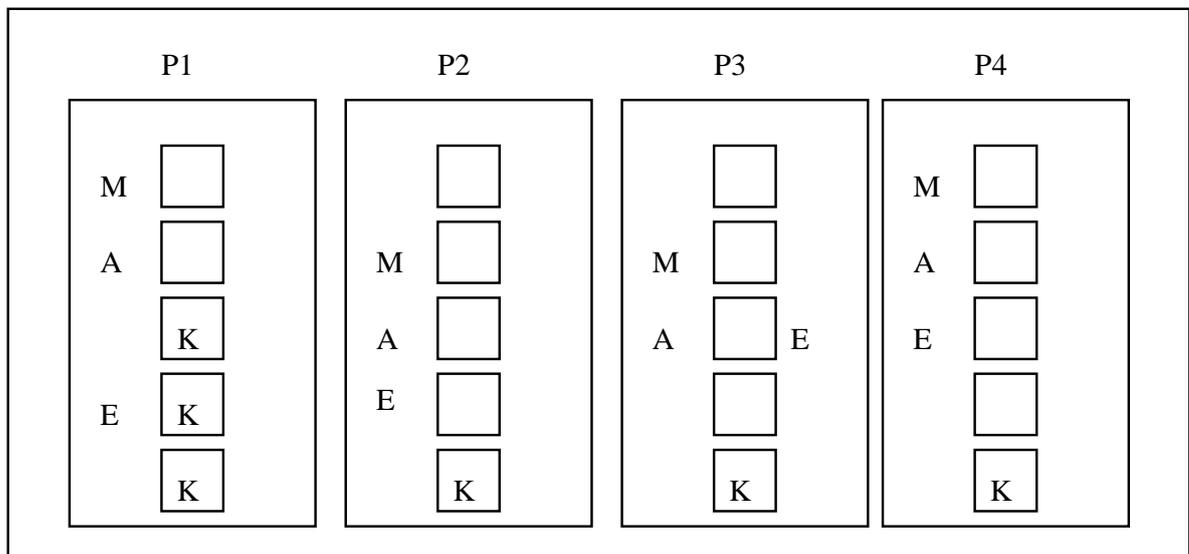
Les opérations se déroulent de la manière suivante (nous supposons, ici, que les containers voyagent d'un bout à l'autre de la ligne avec les pièces) :

1. Le préposé au transfert des containers prend les KT se trouvant dans la boîte correspondante et se dirige vers le stock de la station amont. Il remplace sur les containers de ce stock, les KP (qu'il place sur le planning de production de la station amont) par les KT.
2. Le préposé achemine les containers vers la file d'attente de la station aval. On voit, donc, que seuls les containers demandés par l'aval sont transférés; en outre, seuls les containers qui quittent le stock d'une station de production produisent un ordre de fabrication pour un autre container de même type.
3. L'opérateur de la station consulte son tableau de KP, choisit (nous verrons comment ci-dessous) un KP; il remplace, alors sur un container idoine le KT (qu'il place dans la boîte de KT de la station) par le KP choisi.
4. L'opérateur produit les pièces dudit container.

Supposons que la station de production considérée produise quatre types de pièces P1, P2, P3 et P4. Le tableau de KP possède dans ce cas quatre colonnes; chaque colonne est munie de trois index

indiquant respectivement la quantité économique, le niveau d'alerte (montrant qu'il devient urgent de produire ce type de pièce) et le nombre total de Kanbans (cf figure 4.12).

Tableau des Kanbans de production



K : Kanban
 M : Nombre total de Kanbans
 A : Point d'alerte
 E : Quantité économique

Figure 4.12

Dans la situation décrite à la figure 4.12, la meilleure décision est de produire 2 containers de P1. Le point d'alerte fait penser à la méthode du point de commande en gestion de stock; rappelons que le point d'alerte ne correspond, au plus, qu'à quelques heures de production.

Une dernière problématique intéressante concerne le nombre de Kanbans à prévoir.

Si on pose

- N = nombre de kanbans (KP ou KT) à prévoir,
- D = demande de pièces par unité de temps,
- P = délai de mise à disposition d'un container (somme des temps d'attente, de changement de série et de production),
- Q = quantité de pièces par container,
- S = coefficient de sécurité,

on a :

$$N \geq (D * P * (1 + S)) / Q$$

Toute diminution de P entraîne une réduction du nombre de Kanbans, et, donc, de l'en-cours.

La mise en oeuvre pratique de la méthode se fait de manière incrémentale; on part d'un nombre raisonnablement élevé de Kanbans et on tente une première réduction; les problèmes qui apparaissent, alors, sont analysés et résolus; on tente une réduction supplémentaire et ainsi de suite.

Signalons, enfin, la bonne complémentarité qui existe entre MRP et Kanban. Dans beaucoup d'entreprises (en construction automobile, par exemple), la fabrication des sous-ensembles et éléments standards est poussée (MRP) tandis que le montage final est tiré (Kanban).

5 Ordonnancement et gestion des flux physiques

5.1 Introduction

Les ordres d'achat et de fabrication ont été planifiés dans le cadre d'un MRP (avec contrôle des capacités de production).

Ce chapitre se focalise sur les procédures de planification court terme relatives au lancement et à l'exécution des ordres de fabrication.

D'une manière plus précise, l'ordonnancement consiste à :

- détailler les ordres de fabrication; les ordres issus du calcul des besoins concernent les postes de travail (départements) de l'entreprise; avant exécution, il est souvent nécessaire de détailler ces ordres à l'aide de leurs gammes opératoires; celles-ci donnent les séquences d'opérations primitives²² (partiellement²³ ordonnées) correspondant aux diverses ressources de production du poste de travail;
- allocation des opérations aux ressources de production avec établissement des priorités et gestion des files d'attente;
- gestion des entrées-sorties des postes de travail.

L'horizon de travail de l'ordonnancement est typiquement de 24 heures; les opérations correspondantes sont, dans la mesure du possible²⁴, non instanciées c'est-à-dire non liées à des ressources physiques dédiées. Remarquons, néanmoins, que l'ordonnancement travaille avec les capacités prévues dans son horizon de travail (qui est relativement court).

La gestion des flux physiques, quant à elle, a pour mission essentielle d'instancier les opérations définies par l'ordonnancement qui appartiennent à son horizon de travail (typiquement 1 heure) c'est-à-dire d'identifier et réserver les ressources de production disponibles nécessaires.

Une opération instanciée porte le nom d'action.

Certaines opérations ne peuvent pas être instanciées simplement parce que une (ou plusieurs) ressource(s) de production nécessaire(s) à son exécution n'(ne) est(sont) pas disponible(s) au moment voulu. Ces opérations sont mises en attente²⁵ et seront reconsidérées lors de l'exécution suivante de la gestion des flux.

Terminons ce paragraphe en signalant que la frontière entre ordonnancement et gestion des flux physiques est parfois ténue, pour ne pas dire inexistante; dans ce cas, toutes les procédures depuis le détail des ordres de fabrication jusqu'à l'instanciation des opérations se font en une fois.

5.2 Gestion de flow shops (batch)

²² C'est-à-dire directement exécutables par les ressources de production de l'entreprise.

²³ Il n'existe pas obligatoirement des relations de précedence entre toutes les opérations relatives à un ordre de fabrication; certaines opérations peuvent être exécutées indifféremment l'une avant l'autre, l'autre avant l'une ou même simultanément.

²⁴ La prise en compte du set up des ressources de production oblige parfois le planificateur à faire des instanciations prématurées.

²⁵ Ainsi que les opérations qui doivent suivre celles qui sont mises en attente.

Nous envisagerons ici les flow shops travaillant en batches entre lesquels un set up est requis. Ce sont les seuls flow shops qui posent des problèmes d'ordonnancement.

L'établissement des priorités entre les batches est, en général, gouverné par le délai de rupture (runout time) des produits correspondants.

Ce délai de rupture, pour un produit, est donné par le rapport :
(contenu du stock)/(débit de sortie du stock).

La figure 5.1 montre un exemple simple d'exploitation de ce rapport.

Produit	Stock (T)	Débit de sortie de stock (T/jour)	Délai de rupture (jours)	Priorité
A	0.8	0.2	4	1
B	1	0.1	10	3
C	1.5	0.2	7.5	2
D	0.6	0.04	15	4

Figure 5.1

Si le changement de produit nécessite un set up non négligeable, il est indispensable de travailler par lot (quantité économique); ceci peut compliquer considérablement le travail du planificateur. La figure 5.2 reprend les données de la figure 5.1 en y incorporant les quantités économiques des divers produits (le débit de production est de 0.5 T/jour pour les quatre produits).

Produit	Stock (T)	Débit de sortie de stock (T/jour)	Délai de rupture (jours)	Quant. écon. (T)	Temps de prod. (jours)	Priorité
A	0.8	0.2	4	4	8	1
B	1	0.1	10	2	4	3
C	1.5	0.2	7.5	1.5	3	2
D	0.6	0.04	15	1.5	3	4

Figure 5.2

On constate que le batch A est en retard; en effet, il y aura rupture en C (dans 7.5 jours, pendant 0.5 jour) et en B (dans 10 jours, pendant 1 jour).

5.3 Gestion de job shops

5.3.1 But poursuivi

Dans le cadre d'un job shop, l'ordonnancement consiste à :

- détailler les ordres de fabrication de chaque département en opérations relatives aux divers postes de travail en exploitant les gammes opératoires desdits ordres;
- séquencer les opérations de chaque poste de travail, c'est-à-dire déterminer la date de début, la date de fin et la priorité des opérations;
- gérer les files d'attente (et par conséquent les lead times) des postes de travail par une gestion de ses entrées-sorties.

5.3.2 Le formalisme de Gantt

H. Gantt a introduit un formalisme graphique en 1917; ce formalisme, également connu sous l'appellation " bar chart", est fort utilisé en gestion de job shops et en gestion de projets.

Il existe deux formes de représentation :

- orientée activités (cf figure 5.3);
- orientée ressources (cf figure 5.4).

La partie grise représente la partie de l'activité (ordre ou opération) déjà réalisée.

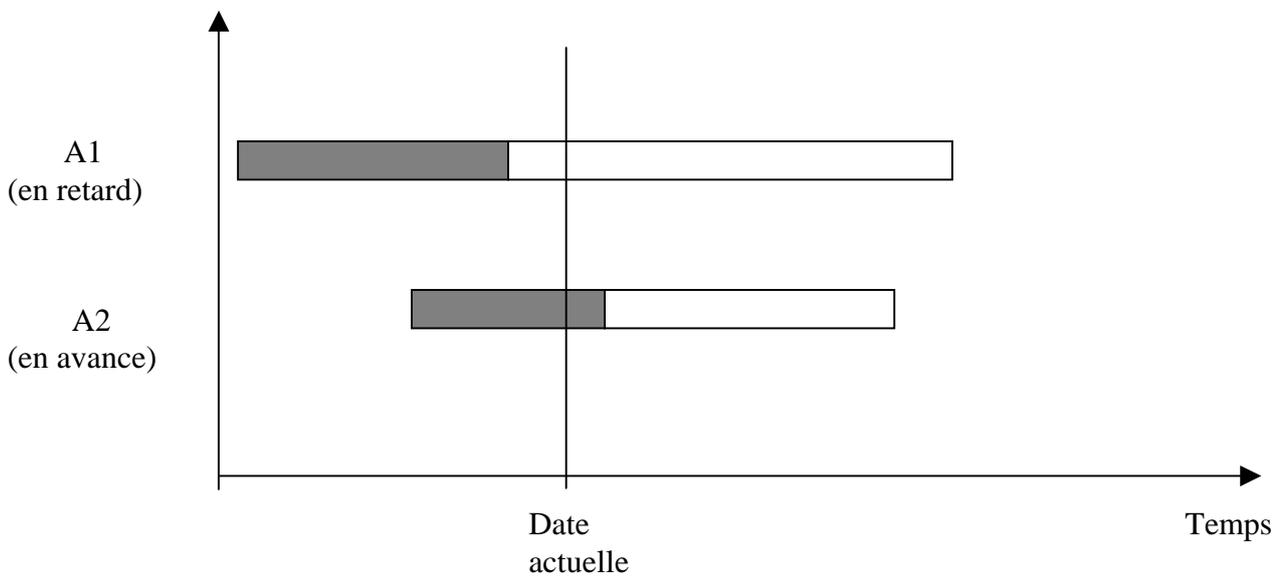
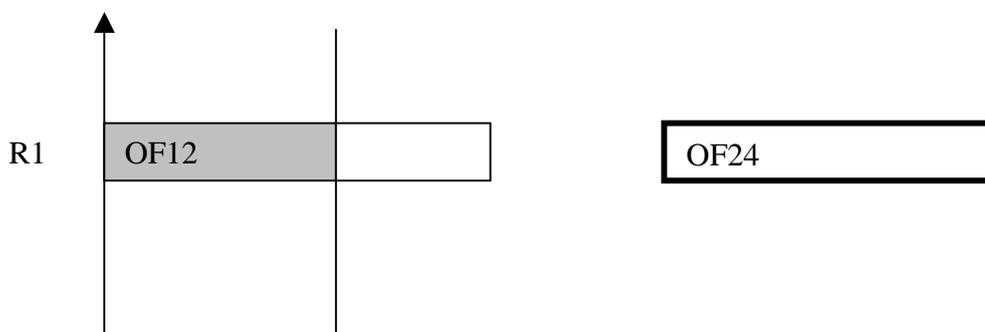


Figure 5.3



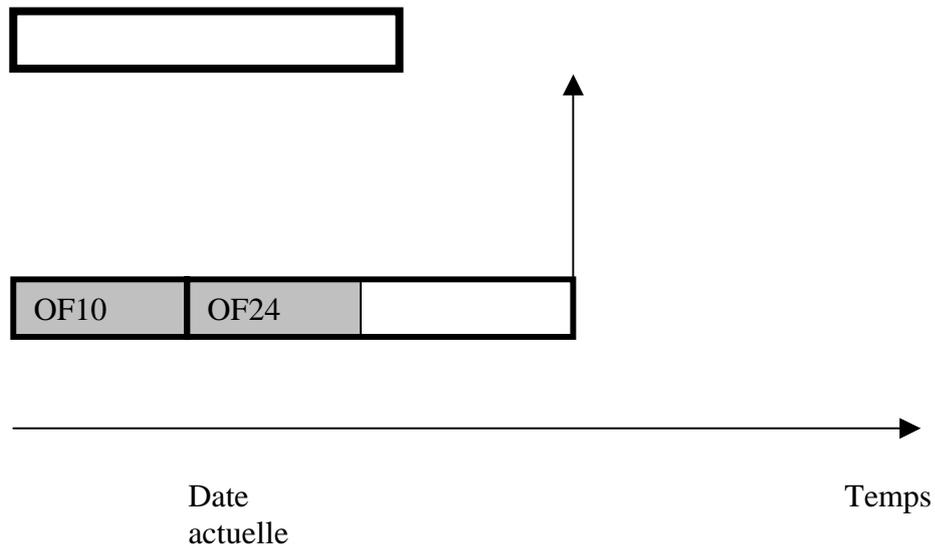


Figure 5.4

Les avantages de la représentation sont :

- convivialité et lisibilité;
- identification aisée des retards.

L'inconvénient majeur est lié au fait que les contraintes de capacité ou de précedence ne sont pas représentées.

5.3.3 Règles de priorité

Les règles de priorité déterminent l'ordre de passage des opérations en attente dans la file des postes de travail.

La figure 5.5 montre les règles les plus usitées.

Règle	Description
First Come, First Served	-
Shortest Operation Time	-
Shortest Processing Time Remaining	Somme des durées des opérations restant à effectuer sur le lot
Fewest Operations remaining	-
Shortest Manufacturing Time Remaining	On inclut ici les temps d'attente et de transport planifiés en sus de la durée des opérations
Earliest Due Date	-
Slack Time	$ST = DD - \text{Present Date} - PTR$
Critical Ratio	$CR = (DD - PD)/MTR$

Figure 5.5

La figure 5.6 présente des données relatives à un poste de travail au jour 125.

Ordre	Due Date	Operation Time (jours)	Process. Time Remain. (jours)	Manuf. Time Remain. (jours)	Number of Oper. Remain.	Slack Time (jours)	Critical Ratio
1	130	1.5	3	6	3	2	0.83
2	132	1	4.5	9.5	5	2.5	0.74
3	136	2	4	8	4	7	1.38
4	138	3.5	7	9	2	6	1.44

Figure 5.6

La figure 5.7 montre les séquencements proposés par les diverses règles.

Règle	Séquencement
Shortest Operation Time	2 1 3 4
Shortest Processing Time Remaining	1 3 2 4
Shortest Manufacturing Time Remaining	1 3 4 2
Earliest Due Date	1 2 3 4
Fewest Operations remaining	4 1 3 2
Slack Time	1 2 4 3
Critical Ratio	2 1 3 4

Figure 5.7

Terminons ce paragraphe en évoquant le cas des ordres en retard.

Pour ces ordres, le Critical Ratio n'est pas utilisable comme nous le montre la figure 5.8 (au jour 35).

Ordre	Due Date	Time Remain. (jours)	Manuf. Time Remain. (jours)	Critical Ratio	Avance (jours)
1	40	5	2	2.5	3
2	35	0	10	0	-10
3	35	0	8	0	-8
4	25	-10	4	-2.5	-14
5	25	-10	8	-1.25	-18

Figure 5.8

Le Critical Ratio met 2 et 3 à égalité alors que le retard de 2 est supérieur; en outre il classe 4 devant 5 alors que le retard de 5 est le plus important.

Dans certains cas, l'objectif de l'ordonnancement est de minimiser le retard moyen des ordres lancés; dans d'autres cas, c'est plutôt le nombre d'ordres en retard qui retient l'attention.

5.3.4 Taille des files d'attente

La file d'attente d'un poste de travail est constituée par tous les ordres en attente d'exécution au poste considéré. Dans la suite, nous utiliserons indifféremment les vocables file d'attente et en-cours.

La longueur de la file d'attente (mesurée en nombre d'heures de travail pour le poste) peut être considérée comme une variable aléatoire normale L de valeur moyenne L_{moy} et d'écart-type Lsd .

Pour la variable normale réduite $L_{red} = (L - L_{moy})/Lsd$, on sait, par exemple, que :

$$P(L_{red} > -2.33) = 0.99.$$

$$\text{Par conséquent, } P(L > L_{moy} - 2.33 * Lsd) = 0.99.$$

Si nous choisissons comme valeur moyenne $L_{moy} = 2.33 * Lsd$, nous aurons $P(L > 0) = 0.99$ et donc une probabilité de 99% de ne pas avoir de rupture d'approvisionnement du poste de travail.

Pratiquement, on calcule, périodiquement, Lsd sur base des fluctuations de la file d'attente lors de la semaine précédente, et on vérifie que l'en-cours moyen se trouve bien au niveau requis. La modification de ce dernier se fait par une gestion idoine des entrées-sorties du poste.

5.3.5 Gestion des entrées-sorties

Le but de cette gestion est de garder sous contrôle l'en-cours des postes de travail. Cet en-cours ne peut, en aucun cas, être trop élevé (car il induit une immobilisation financière et un lead time importants). Dans certains cas (ressources critiques), il ne peut pas descendre en dessous d'une valeur minimum garantissant l'approvisionnement du poste de travail.

La figure 5.9 montre une gestion des entrées-sorties d'un poste de travail dont la capacité est de 16 h/jour (2 pauses). L'évolution de l'en-cours réel nous donne une valeur moyenne de 30 heures et un écart-type de 3.3 heures. L'en-cours (planifié et réel) est, donc, inutilement élevé. Même si le poste de travail est critique, un en-cours moyen de $3 * 3.3$ heures = 10 heures nous garantit l'approvisionnement du poste avec une probabilité de 99.9%.

Il est donc raisonnable de planifier une réduction de l'en-cours par une augmentation temporaire de la capacité du poste (heures supplémentaires).

		J-5	J-4	J-3	J-2	J-1	J1	J2	J3	J4	J5
Entrées planifiées		16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Entrées réelles		12	19	22	10	15					
Sorties planifiées		16	16	16	16	16	20	20	20	20	18
Sorties réelles		17	15	17	18	15					
En-cours planifiés		32	27	31	36	28	24	20	16	12	10
En-cours réels	32	27	31	36	28	28					

Figure 5.9

5.4 Gestion de projets (la méthode PERT/CPM)

5.4.1 Introduction

Les acronymes ont les significations suivantes:

- PERT : Planning Evaluation and Review Techniques;
- CPM : Critical Path Method.

Les deux méthodes sont similaires et ne seront pas distinguées dans la suite.

Le projet à gérer possède les caractéristiques suivantes :

- une date de début;
- une date de fin;
- des activités de durées connues (éventuellement estimées), partiellement ordonnées²⁶.

La méthode PERT/CPM utilise un réseau sémantique dont les noeuds sont les activités du projet et dont les liens orientés sont les relations de précédence (has-to-precede) entre lesdites activités²⁷.

Signalons, pour terminer cette introduction, que la méthode ne prévoit pas de vérification de capacité.

5.4.2 Durée des activités

La méthode se base sur les trois estimations suivantes :

- a : durée la plus optimiste (courte);
- b : durée la plus pessimiste (longue);
- m : durée la plus probable.

La durée d'une activité quelconque est, alors, considérée comme une variable aléatoire D de distribution beta dont la moyenne et l'écart-type sont donnés par :

$$D_{moy} = (a + 4m + b)/6;$$

$$D_{sd} = (b - a)/6.$$

5.4.3 Notion de chemin critique

Prenons l'exemple de la figure 5.10.

²⁶ Ceci signifie qu'il existe des relations de précédence entre certaines activités.

²⁷ Ce formalisme est dit Activities On Nodes; il existe un formalisme dual appelé Activities On Arcs où les noeuds représentent les divers états du projet.

Activité	Has-to-follow ²⁸	Durée moyenne (jours)
A	-	12
B	-	9
C	A	10
D	B	10
E	B	24
F	A	10
G	C	35
H	D	40
I	A	15
J	E, G, H	4
K	F, I, J	6

Figure 5.10

A partir de ces données on peut construire le réseau sémantique de la figure 5.11. Les dates au plus tôt (Earliest Starting Time) et au plus tard (Latest Starting Time) des activités sont calculées à la figure 5.12.

Le flottement d'une activité est la différence LST – EST.

Le(s) chemin(s) critique(s) est(sont) constitué(s) par la séquence d'activités sans flottement.

Dans la cas de la figure 5.12, il n'y a qu'un chemin critique : BDHJK; la durée du projet est de 69 jours (longueur du chemin critique).

²⁸ Has-to-follow est la relation inverse de Has-to-precede.

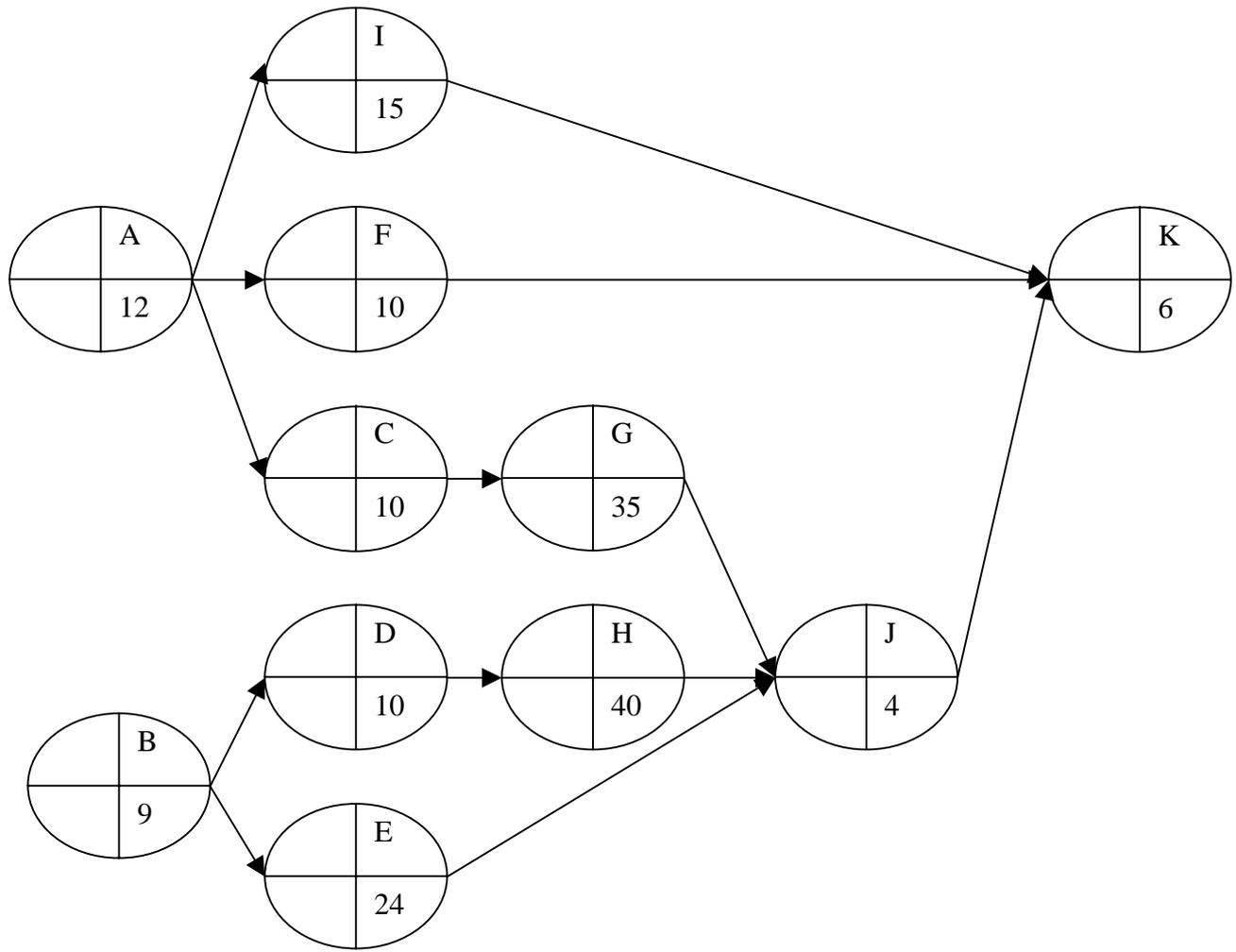
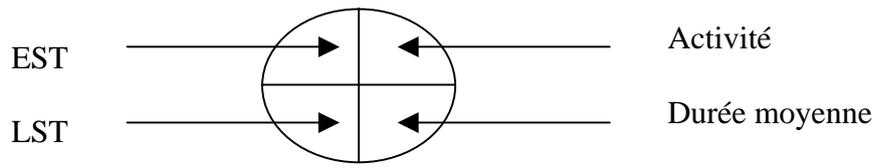


Figure 5.11

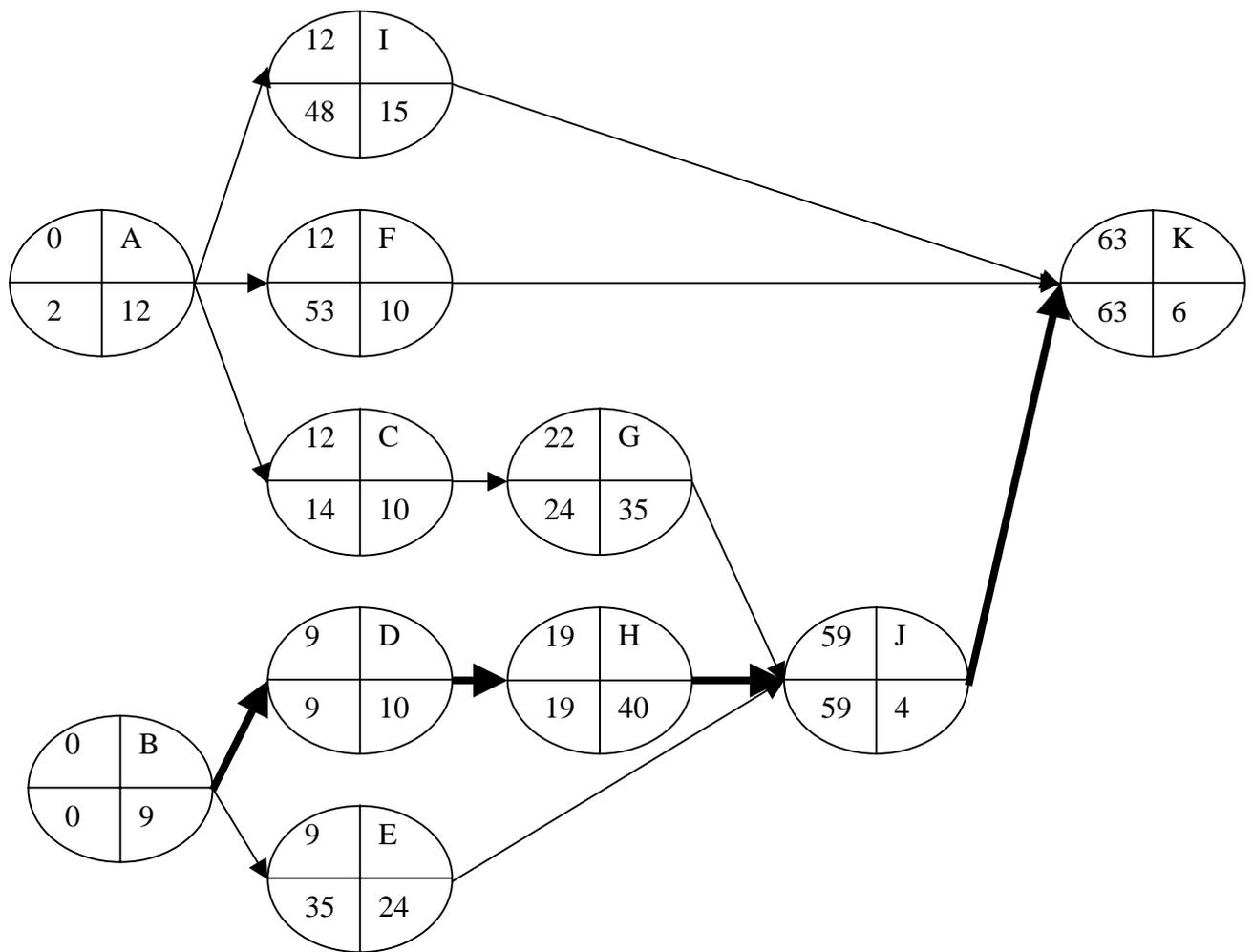


Figure 5.12

Soit LC la longueur du chemin critique; LC est la somme des durées des activités critiques (variables aléatoires de distribution beta). Le théorème central limite nous apprend que LC est une variable aléatoire normale. Ses valeurs typiques sont :

$$LC_{moy} = \sum_i D_{moy}_i$$

$$LC_{sd} = \sqrt{\sum_i D_{sd}_i^2}$$

$(LC - LC_{moy})/LC_{sd}$ est la variable normale réduite et, donc, la probabilité que LC soit inférieure à une valeur donnée se calcule aisément.

5.4.4 Ordonnement à durée minimum

La figure 5.13 montre l'évolution du coût direct d'une activité lorsqu'on augmente les ressources allouées à l'activité pour réduire sa durée. La fonction coût(durée) est, en fait, une fonction monotone décroissante approchée par une droite entre le point crashé et le point normal. La durée

crashée représente la durée minimum de l'activité lorsque toutes ressources possibles ont été mobilisées.

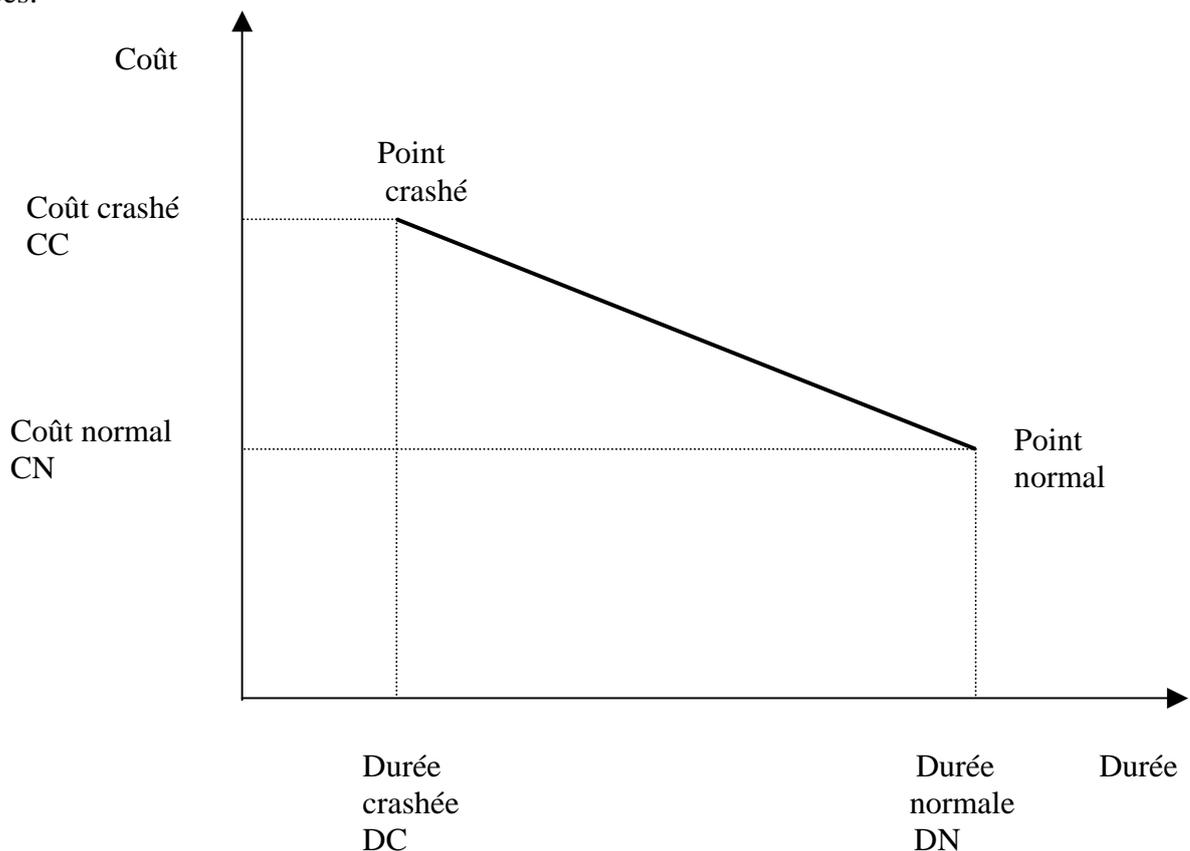


Figure 5.13

On appelle Cost to crash per week le rapport $(CC - CN) / (DN - DC)$.

La procédure d'ordonnement à durée minimum est extrêmement simple; elle consiste à :

- établir le réseau sémantique des activités crashées;
- identifier le chemin critique;
- décrasher au maximum (sans créer un nouveau chemin critique) les activités non critiques de manière à réduire le coût du projet en le maintenant à durée minimale.

5.4.5 Ordonnement à coût minimum

En plus du coût direct des activités, il faut prendre en considération :

- le coût indirect du projet; ce coût représente l'overhead, la location des équipements de chantier,...; il est proportionnel à la durée du projet;
- le bonus; dans certains contrats on prévoit un bonus par jour gagné sur une durée de référence;
- la pénalité; beaucoup de contrats stipulent une pénalité par jour de retard par rapport à une durée de référence.

La procédure d'ordonnement à coût minimal consiste en la séquence suivante :

1. établir le réseau des activités normales;
2. identifier le(s) chemin(s) critique(s),
3. sélectionner l'activité critique dont le cost to crash per week est le plus petit;
4. réduire au maximum la durée de l'activité; il se peut qu'on ne puisse pas atteindre le point crashé à cause de l'apparition d'un nouveau chemin critique ou parce que l'économie réalisée est inférieure au cout supplémentaire (condition d'arrêt de la procédure); notons que l'existence de plusieurs chemins critiques impose d'opérer sur une activité de chaque chemin simultanément;
5. aller en 2.

6 Maintenance et qualité totales

6.1 Introduction

L'élimination drastique des en-cours (pour des raisons financières et de délai de livraison) rend indispensable l'instauration d'une politique de maintenance rigoureuse (pour assurer la disponibilité des équipements de production) et d'un contrôle de qualité performant (puisqu'il n'y a plus de stocks plétoriques permettant de remplacer rapidement le rebut).

L'approche classique de la qualité consiste à trouver un compromis entre le coût de la non qualité (rebut, retravail, intervention en garantie chez le client, perte de confiance du client, ...) et le coût du contrôle (qui est proportionnel à la fréquence des contrôles).

Cette vision statique a été tout-à-fait contestée par l'approche dynamique JIT qui investigate les causes de la non qualité et qui y remédie au niveau de la conception des produits et des équipements de production, de la fabrication, de la distribution ainsi que du service en clientèle. D'où le nom de qualité totale.

L'approche classique de la maintenance a d'abord consisté à pratiquer ce que l'on appelle la maintenance curative, c'est-à-dire n'intervenir qu'en cas de perte de fonctionnalité.

Une ressource de production tombe généralement en panne au moment où elle est fortement sollicitée (donc indispensable à la production) et avant de perdre sa fonctionnalité, elle dérive (et produit donc des pièces de moins en moins conformes et même des rebuts).

On est, donc, passé au concept de maintenance préventive (inconditionnelle²⁹ au départ) en tentant de trouver un compromis entre le coût des arrêts machines et le coût de la maintenance préventive.

JIT, avec son concept de production tirée, ne peut pas tolérer de pannes récurrentes et, par conséquent, investigate et corrige les causes de panne.

6.2 Contrôle de qualité

6.2.1 Considérations statistiques

Prenons l'exemple concret d'une fabrication de pistons par tournage.

Supposons que le diamètre nominal soit de 50 mm, avec une tolérance de 0.06 mm.

Cela signifie que le diamètre du piston fabriqué doit impérativement se trouver dans l'intervalle (49.94 - 50.06) mm pour que le moteur fonctionne correctement.

Imaginons que nous travaillons avec un tour de qualité moyenne capable de fabriquer des pistons dont le diamètre D peut être considéré comme une variable aléatoire normale de moyenne

$D_{moy} = 50$ mm et d'écart-type $D_{sd} = 0.02$ mm.

On sait que $(D - D_{moy}) / D_{sd}$ est la variable normale réduite $D_{réd}$ dont la distribution nous apprend que : $P(-3 < D_{réd} < +3) = 0.997$; on en déduit que la probabilité $P(49.94 < D < 50.06)$ de fabriquer des pistons respectant les tolérances est de 99.7 %.

Les conditions de production peuvent être considérées comme acceptables dans la mesure où, grosso modo, on aura 0.3 % de rebut.

Supposons, maintenant, que la plaquette de l'outil de coupe s'use prématurément³⁰; cela va augmenter progressivement D_{moy} .

²⁹ La maintenance préventive inconditionnelle prévoit des interventions sur base du nombre d'heures (de km) d'utilisation de la ressource; la maintenance préventive conditionnelle n'intervient que lorsqu'une dégradation est enregistrée (par l'opérateur ou un capteur).

Prenons le cas où D_{moy} vaut 50.02 mm.

Cette fois, la distribution de la normale réduite nous apprend que $P(D_{red} < 2) = 0.98$; cela nous permet de déduire que la probabilité $P(D > 50.06)$ de fabriquer des pistons hors tolérance (vers le haut) est de 2 %.

Le rebut est, donc, multiplié par 7.

6.2.2 Acceptation par échantillonnage

Le client accepte un lot de 1000 pistons s'il contient un taux de rebut inférieur ou égal à 1 %. Le principe consiste à prélever avec remplacement³¹ un échantillon dans chaque lot de 1000 pistons, par exemple.

Chaque piston de l'échantillon est mesuré; le lot est accepté si aucun piston n'est hors tolérance. Si un ou plusieurs rebus sont trouvés dans l'échantillon, le lot est contrôlé à 100 %.

Le problème est de dimensionner l'échantillon en sorte que le risque du client (acceptation d'un lot dont le taux de rebut est supérieur à 1 %) et le risque du producteur (rejet d'un lot dont le taux de rebut est inférieur ou égal à 1 %) soient maintenus à des niveaux raisonnables.

Pour concrétiser les choses, imaginons qu'un lot donné contienne 15 rebus (il doit donc être refusé par le client) et que la taille de l'échantillon soit fixé à 50.

Le risque du client est égal à la probabilité de prélever successivement 50 pistons dans les tolérances, 0.985^{50} c'est-à-dire, à savoir 47 %. La seule manière de limiter ce risque est d'augmenter la taille de l'échantillon.

Si le lot ne contient que 6 rebus (il doit donc être accepté par le client), la probabilité de prélever successivement 50 pistons dans les tolérances, c'est-à-dire 0.994^{50} c'est-à-dire, à savoir 74 %. La probabilité de refuser le lot est, donc, de $1 - 0.74$, à savoir 26 %. La seule manière de limiter ce risque est de diminuer la taille de l'échantillon; les politiques du client et du producteur sont contradictoires.

Signalons, pour terminer ce paragraphe, que dans le cas de fabrication de haute qualité (très faible taux de rebut), la limitation du risque du client conduit à des tailles d'échantillon énormes (quasiment du contrôle à 100 %); c'est la raison pour laquelle, on se tourne, dans ce cas, vers d'autres techniques.

6.2.3 Statistical Process Control

Le prélèvement d'échantillons (de taille n) peut s'utiliser non pas pour juger la qualité des produits fabriqués mais pour détecter une dégradation³² au sein de l'équipement de production.

Soit d_i ($i = 1, n$) le diamètre de chaque piston de l'échantillon.

³⁰ Cette usure prématurée peut être due, par exemple, à une augmentation de la dureté du matériau des pistons bruts.

³¹ Remplacement signifie qu'après mesurage, le piston est remis dans le lot et a, donc, une probabilité non nulle d'être encore prélevé; cette stratégie un peu absurde simplifie considérablement les calculs tout en n'introduisant que des différences marginales avec le prélèvement sans remplacement (qui paraît plus logique dans la mesure où un rebut n'est jamais remis dans le lot).

³² Il faut faire une distinction subtile entre dégradation et défaillance. La dégradation de l'équipement concerne l'apparition de phénomènes physico-chimiques (usure d'outil, entartrage, ...) conduisant à terme à la défaillance, c'est-à-dire la perte de fonctionnalité.

Si on pose, $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum d_i$ moyenne des diamètres de l'échantillon, nous savons que cette moyenne (dite échantillonnée) est une variable aléatoire normale dont la moyenne est D_{moy} et l'écart-type $\frac{1}{\sqrt{n}} D_{sd}$.

Supposons, cette fois, que nous travaillons avec un tour de précision permettant l'obtention de :

$D_{moy} = 50 \text{ mm}$;

$D_{sd} = 0.01 \text{ mm}$.

La probabilité de fabriquer du rebut est donnée par $1 - P(-6 < D_{red} < +6) \approx 10^{-6}$.

Si nous travaillons avec des échantillons de 4 pistons, la distribution de \bar{d} est normale de moyenne 50 mm et d'écart-type 5 microns.

Une carte SPC correspondant à des conditions normales de fonctionnement est, dans ce cas, donnée à la figure 5.14.

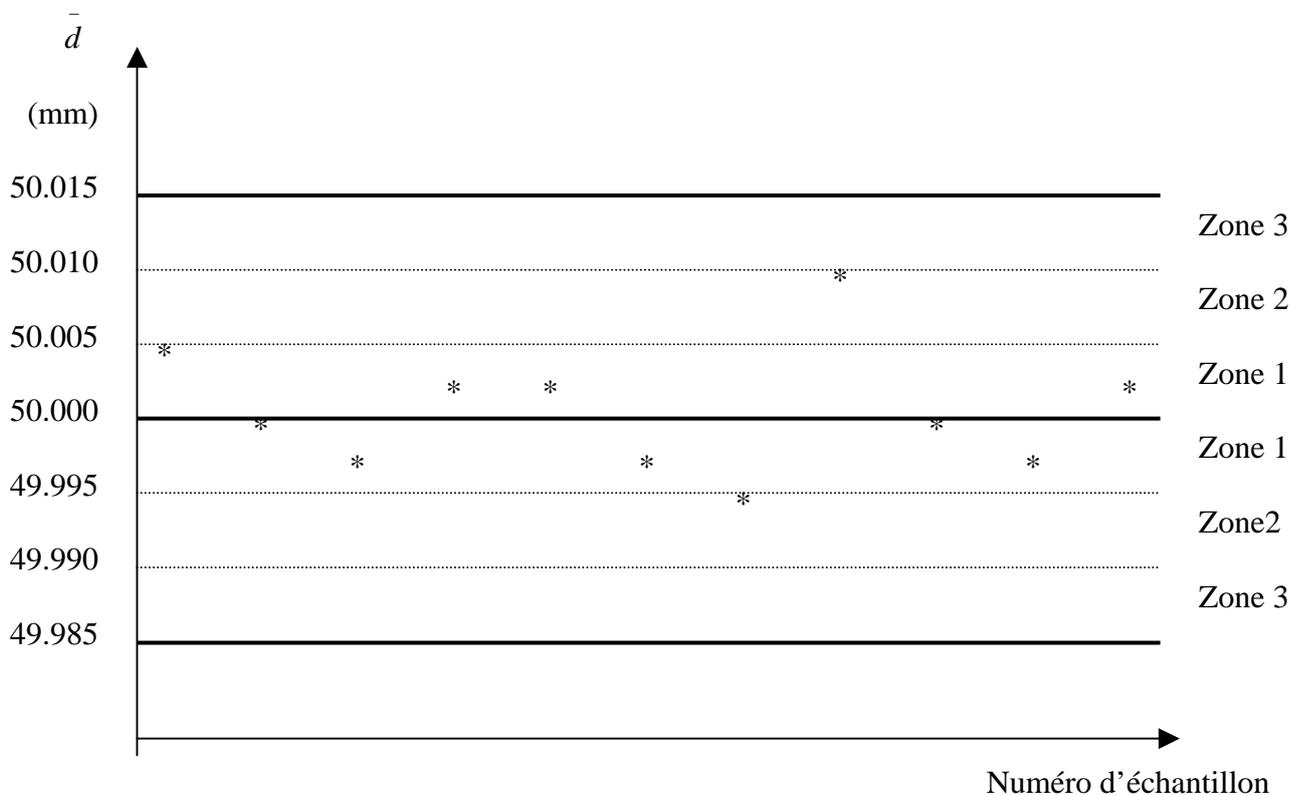


Figure 5.14

On sait que :

$P(-1 < D_{red} < +1) = 68.2 \%$;

$P(-2 < D_{red} < +2) = 95.4 \%$;

$P(-3 < D_{red} < +3) = 99.7 \%$.

De plus, la distribution normale est symétrique.

Par conséquent, un diagramme sain doit avoir les caractéristiques suivantes :

- aucune tendance;
- symétrie par rapport à D_{moy} ;
- la majorité des points (68 %) en zone 1 ;
- quelques points en zone 2;

- un point isolé en zone 3.

Tout autre aspect est pathologique et doit déclencher une investigation.

La critique la plus importante adressée au SPC est qu'il requiert au niveau de l'atelier³³ des compétences statistiques un peu trop sophistiquées.

6.2.4 Mistake proofing

Cette approche prend le contre-pied des démarches statistiques en constatant que le gros des rebuts en assemblage provient du fait que l'opérateur oublie de temps à autre d'insérer un composant (ressort, clip,..) dans son assemblage. Comme il est peu réaliste d'exiger un sans-faute pendant toute la durée de la vie de travail, il est proposé d'organiser la station d'assemblage en sorte qu'un oubli soit immédiatement et immanquablement détecté. Il s'agit par exemple de positionner tous les composants sur une palette dédiée avant de commencer l'assemblage³⁴; cette palette DOIT être vide à la fin de l'assemblage.

6.3 Maintenance

La gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) ressemble très fort à la GPAO traditionnelle dans la mesure où :

- les stocks de pièces de rechange et d'outillages de maintenance se gèrent comme les stocks de production;
- les ordres de maintenance ont une gamme opératoire au même titre que les ordres de fabrication.

Les systèmes de GMAO le plus sophistiqués prévoient donc des planifications à horizons décroissants et détails croissants comme leurs cousins de GPAO. Signalons, à cet égard que la maintenance est souvent intégrée aux gros progiciels de GPAO.

C'est l'approche JIT (production tirée à en-cours et stockage minima) qui fait de la maintenance préventive (conditionnelle ou non) un must. En effet, il est aberrant de s'inscrire dans un contexte JIT en gardant une optique de maintenance curative dans la mesure où le throughput des lignes de fabrication régies par Kanban, par exemple, est sérieusement menacé par l'arrêt des diverses stations de travail bloquées par leur amont ou aval immédiats.

D'où le concept de Total Preventive Maintenance (TPM) s'appliquant à tous les équipements de production.

L'acronyme TPM est également utilisé dans le sens Total Productive Maintenance dans la mesure où l'on tente de plus en plus d'impliquer les opérateurs machine dans le processus de maintenance. En effet, qui peut mieux détecter une dégradation (qui se manifeste par un bruit ou une vibration inhabituelle) que l'opérateur qui travaille sur la machine huit heures par jour ?

Les tendances les plus avancées consistent à confier la maintenance de premier niveau (vidanges,...) et le déclenchement des maintenances de niveaux supérieurs (remplacement d'organes,...) aux opérateurs machine.

³³ contrairement à l'acceptation par échantillonnage (mise en oeuvre par les agents qualité du client), le SPC est exécuté par le personnel de production.

³⁴ plutôt que d'autoriser l'opérateur à prélever les composants dont il a besoin directement dans les containers d'approvisionnement.

7 Bibliographie

- Benedetti C. et Guillaume J. *Gestion des approvisionnement et des stocks*. Editions des Etudes vivantes . ISBN 2-7607-0535-8.
- Biemans *.Manufacturing Planning and Control : a reference model*. Elsevier 1990.
- Boulanger A. *Vers le zéro panne avec la maintenance conditionnelle*. Afnor 1988. ISBN 2-12-467011-8.
- Brumet J., Jaume D., Labarrère M., Rault A. et Vergé. *Détection et diagnostic de pannes. Approche par modélisation*. Hermès 1990. ISBN 2-86601-241-0.
- Courtois A., Pillet M. et Martin C. *Gestion de production*. Editions d'organisation. ISBN 2-7081-1116-7.
- Crouhy M. *La gestion informatique de la production industrielle*. Editions de l'Usine nouvelle. ISBN 2-281-34013-9.
- Fogarty D., Blackstone J. and Hoffman T. *Production and Inventory Management*. South Western Publishing Company 1991. Cincinnati. USA.
- Fougerousse S. et Germain J. *Pratique de la maintenance*. Afnor Gestion 1992. ISBN 2-12-46721-8.
- Orlicky J. *MRP : Material Requirements Planning*. Mc Graw Hill. ISBN 0-07-047708-6.
- Roger P. *Gestion de production*. Editions Précis d'Alloz. ISBN 2-247-01342-2