

- PARTIE 1 -
***Introduction sur la
production industrielle***

Sommaire

Introduction	15
I- Définitions, techniques, règles et principes généraux d'organisation et de gestion de la production industrielle.....	17
<input type="checkbox"/> I.1- Contexte général	17
<input type="checkbox"/> I.2- Définitions de base.....	17
<input type="checkbox"/> I.3- Définition de la production.....	20
<input type="checkbox"/> I.4- Définition et objectif de la gestion de production.....	20
II- Evolution de la production et nouvelles règles.....	22
<input type="checkbox"/> II.1- Les principales périodes	22
<input type="checkbox"/> II.2- Les nouvelles règles de la production moderne.....	23
III- Typologie de la production.....	24
<input type="checkbox"/> III.1- Structure du produit.....	24
<input type="checkbox"/> III.2- Modes de production.....	25
<input type="checkbox"/> III.3- Circulation des produits dans l'atelier	26
<input type="checkbox"/> III.4- Relation avec le client	28
IV- Synthèse des différents modes de pilotage des flux de production	32
<input type="checkbox"/> IV.1- Pilotage centralisé	32
<input type="checkbox"/> IV.2- Pilotage par l'aval et décentralisé.....	33
<input type="checkbox"/> IV.3- Pilotage par l'amont et décentralisé.....	34
<input type="checkbox"/> IV.4- Pilotage synchronisé entre flux physique et flux informationnel.....	34
<input type="checkbox"/> IV.5- Pilotage par les contraintes ou méthode OPT	34
V- Typologie des flux physiques et implantation des lignes de production.....	37
<input type="checkbox"/> V.1- Flux physique avec opérations et manutentions synchronisées (ou liées).....	37
<input type="checkbox"/> V.2- Flux physique avec opérations et manutentions asynchrones (ou libres).....	38
<input type="checkbox"/> V.2.a) Manutention non automatisée	39
<input type="checkbox"/> V.2.b) Manutention (ou transfert) automatisée	41
<input type="checkbox"/> V.3- Autre typologie.....	41
Conclusion	43
Bibliographie	44

Introduction

Cette partie a pour objectif de situer le contexte général de la thèse, c'est à dire le domaine de la gestion de production et des systèmes de production. S'agissant d'un domaine peu exploré dans le monde de la recherche parce qu'encore à ses balbutiements (en France, la gestion de la production n'est toujours pas considérée comme une science à part entière), il m'a semblé utile et même indispensable de commencer par donner quelques définitions. L'une des particularités de la gestion de production est qu'elle repose souvent sur des règles de logique et de bon sens plus que sur des théories mathématiques abstraites. Un minimum de rigueur est donc nécessaire pour la promouvoir au rang des sciences nobles, et ceci passe en partie par l'utilisation d'une terminologie sans ambiguïté.

C'est ce qui explique la place donnée au chapitre 1, et plus particulièrement aux définitions, qui dans un autre cadre, auraient pu être données en annexe.

Le chapitre 2 fait une présentation de l'évolution de la production depuis le début de l'ère industrielle. Il met en évidence les caractéristiques très contraignantes auxquelles la production moderne doit s'adapter. Le concept du "Juste à Temps" est évoqué ainsi que les nouvelles règles imposées par le marché.

Dans le chapitre 3, la production est classifiée suivant 4 critères :

- structure du produit,
- modes de production,
- circulation des produits dans l'atelier,
- relation avec le client.

Chacun de ces critères comporte plusieurs classes, et la combinaison de chacune de ces classes permet d'établir jusqu'à 64 configurations différentes ($4 \times 4 \times 2 \times 2 = 64$), bien que l'on se soit contenté de prendre uniquement les principaux critères et les classes les plus significatives. On entrevoit déjà la diversité qui existe au sein des systèmes de production.

Pour cette recherche, on se focalisera sur la production de produits à structure convergente fabriqués en série et sur commande.

A la fin de ce chapitre, un modèle de représentation des flux est proposé permettant de situer les principales étapes et données d'un processus de production de produits assemblés.

Le chapitre 4 présente les cinq principaux modes de pilotage de flux de production que l'on rencontre dans les ateliers de production : pilotage centralisé (poussé), par l'aval (tiré), par l'amont, synchronisé, par les contraintes.

Les flux physiques et les principales implantations de lignes de production sont classifiés dans le chapitre 5. On met surtout en relief les modes de transfert possibles entre les postes de travail.

I- Définitions, techniques, règles et principes généraux d'organisation et de gestion de la production industrielle

□ I.1- Contexte général

La production industrielle comporte trois éléments en interaction :

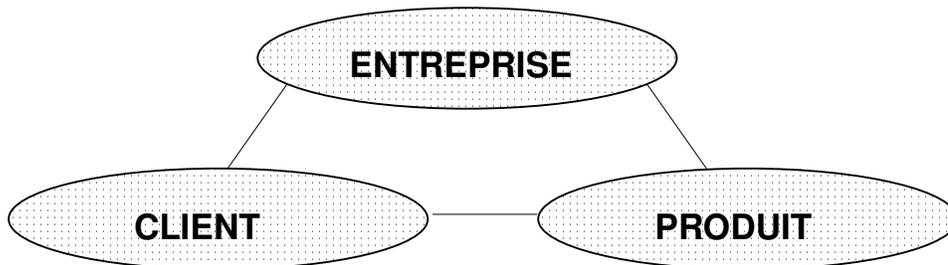


Figure 1 : Les 3 éléments de la production

Le **CLIENT** éprouve un **BESOIN** immédiat ou différé pour un **PRODUIT** réalisé par l'**ENTREPRISE**.

□ I.2- Définitions de base

- **ENTREPRISE** : La norme [AFNOR 90] définit l'entreprise comme un "Système dirigé et organisé en services dont la finalité est de générer de la valeur ajoutée"

- **CLIENT** : Dans la même source, le client est : "La personne ou l'entité pour qui le produit a été conçu".

- **PRODUIT** : L'Analyse de la Valeur présente le produit comme "ce qui est (ou sera) fourni à un client pour répondre à son besoin" [AFNOR 90]. Cette définition correspond donc au produit final commercialisé par l'entreprise.

De façon plus concrète, dans le domaine industriel, ce produit final peut être un **ENSEMBLE** (ou produit composé ou appareil) ou un **COMPOSANT indivisible** (ou pièce) correspondant à un bien d'équipement, à un bien de consommation durable ou à un composant destiné à être intégré dans un bien d'équipement ou de consommation.

La définition du produit nous amène à expliquer de nouveaux termes :

- **ENSEMBLE** : [BLONDEL 97] définit un ensemble comme "la réunion et l'assemblage de plusieurs pièces élémentaires, constituant un élément à nouveau stockable dans cet état".

Cette définition s'applique aussi à la notion de **SOUS-ENSEMBLE**, dont la principale différence avec l'**ENSEMBLE** est qu'il ne correspond pas à un produit fini.

- **PIECE détachée ou COMPOSANT indivisible** : On appelle pièce tout constituant simple du produit composé de matière et de **VALEUR AJOUTEE**.

- **VALEUR AJOUTEE** : C'est la différence entre la valeur de la production et les consommations de biens et de services fournis par des tiers pour réaliser cette production [BLONDEL 97]. Elle peut donc s'exprimer simplement par l'opération suivante :

$$\begin{array}{r} \text{VENTES (produits, pièces détachées)} \\ - \text{ACHATS (machines, matière première, salaires)} \\ \hline = \text{VALEUR AJOUTEE} \end{array}$$

A ces définitions de base, on peut rajouter quelques autres termes qui seront rencontrés dans ce mémoire :

- **ORDRE de FABRICATION (O.F)** : C'est la commande à l'atelier d'un produit donné, pour une quantité donnée et généralement dans un délai à respecter.

- **STOCK et ENCOURS** : [AFNOR 91] et [AFGI 91] distinguent précisément les STOCKS des ENCOURS :

- Le **STOCK** correspond , à un moment donné et à un endroit donné , à la quantité d'un article non encore utilisé soit pour l'encours, soit pour la consommation, mesurée dans une unité de stockage appropriée. Le stock se situe donc à l'interface des flux externes de l'entreprise.

- L'**ENCOURS** a pour effet ou pour fonction de constituer un "tampon" de régulation des flux internes. De façon plus générale, un encours correspond à l'accumulation d'une différence de flux entre deux ressources. Au point de vue comptable, tous les articles (pièces, sous-ensembles et ensembles) en cours de fabrication sont considérés comme étant sortis du stock fournisseurs ou matières premières et non encore rentrés dans le stock clients ou produits finis. Donc la totalité des articles présents dans le flux interne du processus, qu'ils soient en attente devant une ressource, en transfert d'une ressource vers une autre, ou en transformation sur une ressource, est considéré comme de l'ENCOURS.

- **CAPACITE** : La CAPACITE d'une ressource correspond à la quantité maximale d'unités d'œuvre pouvant être raisonnablement (ou théoriquement) atteinte dans une période donnée et dans le cadre de certaines hypothèses de travail.

Exemple :

- *Chaîne d'embouteillage ayant une capacité de 6000 bouteilles/heure.*
- *Tour à commande numérique ayant une capacité de 36 heures/semaine.*

- **CHARGE** : La CHARGE d'une ressource correspond à une demande planifiée sur une période donnée et exprimée avec la même unité que la capacité. Pour une ressource donnée, la charge doit bien sûr être inférieure ou égale à la capacité.

La définition du **PRODUIT** présentait celui-ci comme correspondant au **BESOIN** d'un **CLIENT**. Pour l'entreprise, deux situations peuvent se présenter, suivant que le produit correspond à :

- un **BESOIN immédiat**, ce qui signifie que le délai de livraison acceptable par le client est nul;
- un **BESOIN différé**, ce qui signifie que le client accepte un délai de livraison non nul. Ce délai doit toutefois être le plus faible possible, car l'entreprise évolue dans un marché où la concurrence est sévère et le délai peut être un critère de décision du client par rapport à des produits similaires d'entreprises concurrentes.

La première situation implique que le produit soit stocké en quantité suffisante sur le lieu de vente. L'entreprise doit donc produire sur des prévisions de vente et constituer un stock de produits capable de répondre à la demande.

La seconde situation implique que l'entreprise produise avec un délai inférieur ou égal au délai acceptable par le client.

Dans [BITEAU 98], cette situation est caractérisée par un ratio d'incertitude **Ri** dont la valeur peut être inférieure à 1 si le lancement de la production se fait à partir d'une commande ferme, et supérieure à 1 si l'entreprise est obligée de commencer sa production avant de savoir exactement quelle sera la demande du client.

Ces deux cas vont être détaillés par la suite, et d'autres définitions complémentaires à celles-ci seront données chaque fois que cela sera nécessaire.

□ 1.3- Définition de la production

[GIARD 88] définit la production comme étant une transformation de ressources appartenant à un système productif et conduisant à la création de biens et de services. Les ressources peuvent être de quatre types :

- des équipements (machines, ...),
- des hommes (opérateurs, ...),
- des matières (matières premières et composants),
- des informations techniques ou procédurales (gammes, nomenclatures, fiches opératoires, ...).

La production d'un bien s'effectue par une succession d'opérations consommant des ressources et transformant les caractéristiques morphologiques ou spatiales de "matières".

Comme on l'a déjà vu dans la définition des STOCKS et ENCOURS, un élément fondamental de la production est la notion de **FLUX** entre les différentes ressources. Un flux correspond à une circulation d'entités physiques ou informationnelles au travers d'un processus, caractérisé par un débit. En production, on pourra donc distinguer essentiellement deux types de flux : Les flux de matières et les flux d'informations.

Une autre distinction des flux concerne la localisation des flux dans la chaîne logistique qui comporte trois maillons : approvisionnement, production et distribution. Les flux **EXTERNES** concernent uniquement l'approvisionnement et la distribution, alors que les flux **INTERNES** correspondent à l'ensemble de la production. La Gestion de Production s'intéresse essentiellement aux flux INTERNES de l'entreprise (voir figure 2).

□ 1.4- Définition et objectif de la gestion de production

[BLONDEL 97] définit la Gestion de Production (G.P) comme la fonction qui permet de réaliser les opérations de production en respectant les conditions de qualité, délai, coûts qui résultent des objectifs de l'entreprise et dont le but est d'assurer l'équilibre entre :

- le taux d'emploi des ressources,
- le niveau des encours et des stocks,
- les délais.

[MOLET 97] remarque tout à fait justement que cet équilibre est très difficile à obtenir puisque "l'on veut réduire en même temps stocks, délais, pannes tout en accroissant la flexibilité, la variabilité des produits,... autant d'objectifs complexes, multiples mais

souvent contradictoires et dont l'importance relative peut varier à chaque moment". Il en conclut d'ailleurs que "la gestion de production reste, malgré les apports des outils, la gestion des compromis".

Dans [COURTOIS 95], l'objectif principal de la Gestion de Production est de gérer les flux de matières et d'informations par rapport aux objectifs prioritaires définis par la Direction Générale de l'entreprise. Le schéma suivant montre l'ensemble des flux que gère, totalement ou partiellement, la gestion de production.

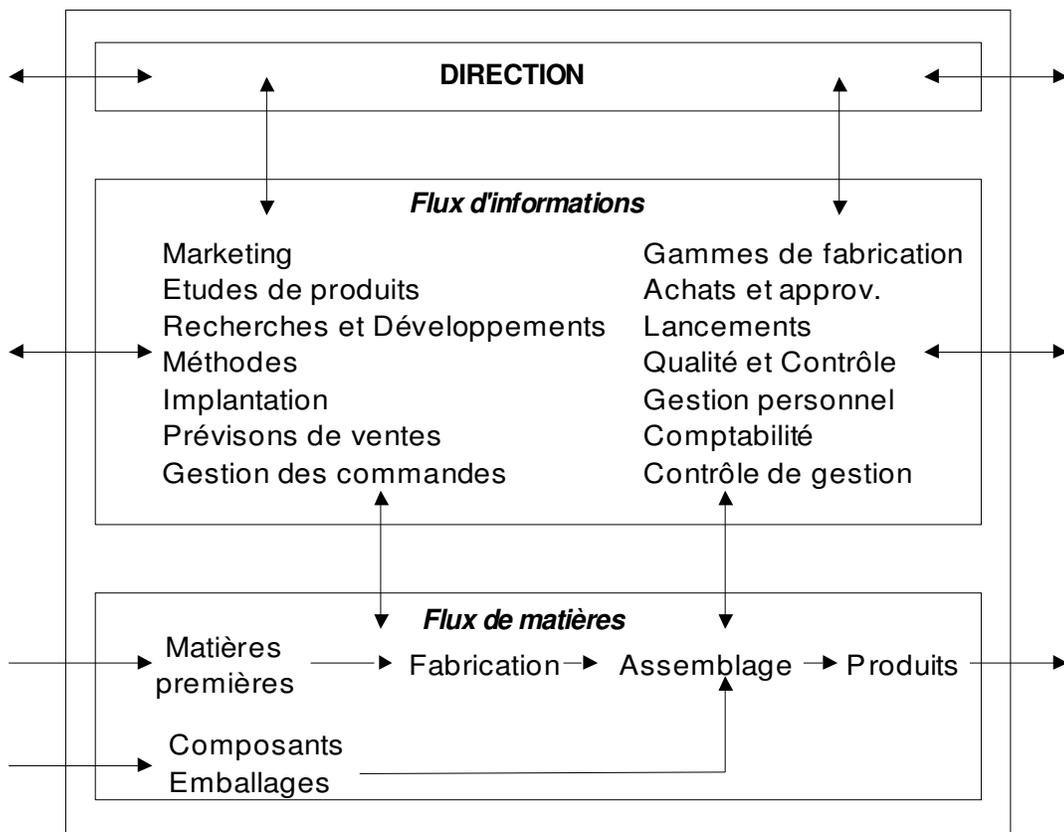


Figure 2 : Les flux informationnels et physiques

II- Evolution de la production et nouvelles règles

□ II.1- Les principales périodes

Dans [COURTOIS 95] et [BLONDEL 97], on distingue trois à quatre périodes qui marquent chacune une évolution de la production industrielle :

1^{ère} période : les débuts de l'industrie (à partir de la fin du 19^{ème} siècle), il y a à peine 100 ans... ! La production est alors proche de l'artisanat : faibles quantités, grande diversité, personnel très qualifié (compagnons).

2^{ème} période : de la première guerre mondiale à 1975, période incluant les fameuses "Trente glorieuses" de l'industrie de 1945 à 1975, pendant laquelle la demande est très importante, et même supérieure à l'offre. Les marges sont confortables et les principales caractéristiques de la production sont les suivantes : fabrication en très grandes séries, faible diversité (on connaît la phrase d'Henry Ford " Le client qui désire une Ford T peut demander n'importe quelle couleur, pourvu qu'elle soit noire"), personnel peu qualifié, travail découpé en tâches élémentaires simplifiées et rapides pour garantir un enchaînement rapide des opérations (voir le début du film de Charlie Chaplin "Les Temps Modernes", qui ne doit pas être aussi caricatural qu'on l'imagine....). Dans ce contexte, pour que l'entreprise existe, il suffit de **PRODUIRE PUIS VENDRE**.

3^{ème} période : Durant cette période transitoire, de 1975 à 1985, l'offre et la demande s'équilibrent, le client a le choix du fournisseur. C'est l'après-choc pétrolier, il est nécessaire de faire des prévisions commerciales, d'organiser les approvisionnements, de réguler les stocks. Il faut alors **PRODUIRE CE QUI SERA VENDU**.

4^{ème} période : Depuis la fin des années 70, les marchés sont fortement concurrentiels et surtout se mondialisent. L'offre est supérieure à la demande et de nouvelles contraintes apparaissent : maîtrise des coûts, qualité, délais de livraisons courts et fiables, produits personnalisables et à faible durée de vie,....Les séries sont toujours importantes, mais très diversifiées : plus de 60 000 variantes pour la Renault 18 à la fin des années 70, plus de 200 000 variantes sur la Peugeot 306 au début des années 90 (environ 250 variantes de moteurs et 1000 variantes de caisses habillées). Toujours dans l'industrie automobile, la taille moyenne annuelle d'une série de même véhicule est de 40 véhicules, le véhicule le plus vendu atteint moins de 8000 exemplaires.

Des pays comme le Japon sont les précurseurs de l'utilisation de nouvelles méthodes dont le mot clé est le "**JUSTE A TEMPS**". L'entreprise doit tendre à **PRODUIRE CE QUI EST DEJA VENDU**.

□ II.2- Les nouvelles règles de la production moderne

Dans le contexte de la 4ème période définie précédemment, l'entreprise est face à plusieurs difficultés :

- Evoluer dans un marché volatile, mal maîtrisé, ou les clients sont imprévisibles, infidèles à une marque et sensibles au délai ou à son respect, à la qualité, au service après-vente.
- Trouver des compromis entre stocks minimums, délais minimums et aléas minimums.
- Réduire les coûts de production, limiter les investissements, disposer de ressources flexibles.
- etc...

III- Typologie de la production

III.1- Structure du produit

Le produit, ainsi que son flux de production, peut avoir plusieurs structures [COURTOIS 95] :

- **Convergente** : c'est le cas des produits réalisés à partir de l'assemblage de composants. Cette structure est caractérisée par une arborescence présentant plusieurs niveaux qui correspondent à des sous-ensembles du produit final. La forme générale du schéma ci-dessous permet de mettre en évidence l'autre appellation donnée à cette structure : "structure en A" [MARRIS 96].

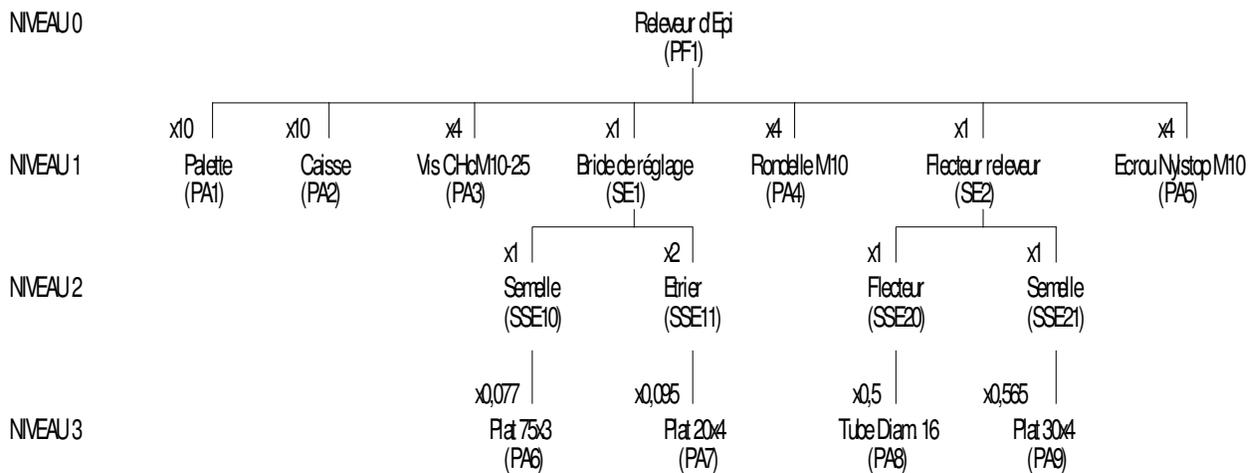


Figure 3 : Structure de produit Convergente

- **divergente ou "structure en V"** : cette structure est celle des produits réalisés à partir de la transformation d'une matière première unique : pétrole, lait, acier, etc..

- **parallèle** : les produits sont réalisés à partir de quelques matières premières faiblement transformées : industries de l'emballage, du pneumatique, ...

- **à points de regroupement ou "structure en T"** : cette structure dérivée de la structure convergente, est typique des produits réalisés à partir de l'assemblage de composants soit spécifiques (structure convergente) soit standards (points de regroupement) : cas de l'industrie automobile, où un même moteur peut être implanté dans plusieurs véhicules différents. Une structure en T cherche à concilier la production de masse et la personnalisation des produits. Il s'agit en fait d'un produit de conception modulaire destiné à permettre la réalisation de produits sur mesure en combinant de différentes façons des sous-ensembles dont certains sont standardisés. Une telle conception conduit ainsi à définir un produit complexe au moyen d'une nomenclature arborescente à plusieurs niveaux, chaque niveau correspondant à un stade de la décomposition

Les structures *divergentes* et *parallèles* correspondent à des usines fabriquant des produits peu variés, en très grandes séries, sur des périodes très longues avec un marché peu fluctuant.

Dans la suite de ce travail, on ne s'intéressera qu'aux structures *convergentes* et à *points de regroupements*, les plus fréquentes, correspondant aux industries manufacturières de type automobile, électronique, électroménager, ameublement, aéronautique, etc..

□ III.2- Modes de production

Les entreprises industrielles qui réalisent des produits implantent et organisent leurs ressources de production en fonction non seulement de la structure du produit, mais aussi du volume de production. On peut ainsi établir une classification des modes de production [WOODWARD 65] [MULKENS 93] [BARANGER 87] :

- **production unitaire ou par projet** : le produit est généralement complexe, nécessite la coordination de plusieurs ressources devant intervenir simultanément ou

séquentiellement afin de livrer au moment convenu. C'est le cas des grands projets industriels ou civils comme la réalisation d'un navire, d'un ouvrage de génie civil, de l'organisation d'une manifestation sportive internationale,

- **production continue** : elle correspond aux produits qui subissent des transformations en continu, par le biais d'opérations parfaitement synchronisées au niveau de leur temps opératoire : aciéries, cimenteries, stations d'épuration, raffineries sont des exemples de processus qui correspondent à cette typologie. Les équipements de production sont dédiés et d'un niveau d'automatisation très élevé.

- **production de masse** : caractéristique des produits à structure en A ou V, réalisés par fabrication et/ou assemblage en très grande quantité, mais avec très peu de variantes. Les ressources de production (hommes et machines) sont donc fortement spécialisées et dédiées à des tâches précises. Le niveau d'automatisation est en général élevé.

Exemple : fabrication de roulements à billes, d'ampoules d'éclairage, etc....

- **production en petites à moyennes séries, répétitives ou pas** : c'est le cas des produits à structure en A ou T, "personnalisables" en fonction des besoins du client : produits de base avec possibilité d'options ou variantes. Les ressources de production sont très polyvalentes, flexibles, capables de passer rapidement d'une production à une autre. Le niveau d'automatisation est généralement faible ou nul.

Dans la suite, on ne s'intéressera qu'aux deux derniers modes de production correspondant aux *produits à structure convergente (en A ou T) fabriqués en série*.

□ III.3- Circulation des produits dans l'atelier

Cette typologie est très liée au critère précédent. On distingue 2 à 3 grandes classes : circulation en Job Shop et en Flow Shop [WIDMER 91].

- **Circulation des produits en Job Shop** : C'est le cas d'un atelier général, destiné à fabriquer une grande variété de pièces. Les produits circulent de machines en machines suivant un routage correspondant à leur gamme de fabrication.

- **Circulation des produits en Flow Shop** : tous les articles suivent le même cheminement. C'est le cas des lignes transferts dédiées (voir chapitre V.3) où les articles "visitent" systématiquement chaque poste de travail implanté sur la ligne, et toujours dans le même ordre. Cependant, les chercheurs ont décomposé cette classe en plusieurs sous-classes parmi lesquelles on trouve : les circulations de type "*pur flow shop*", où tous les temps opératoires sont positifs, les circulations de type "*flow shop généralisé*" où certains temps opératoires pouvant être nuls (la pièce ne devant pas subir une opération sur une machine particulière), et enfin les circulations de type "*flow shop de permutation*" dans lesquelles la séquence des pièces est la même sur toutes les machines (pas de dépassement autorisé).

En complément à la description des critères énoncés précédemment, on peut remarquer les particularités suivantes :

- Certains produits de grande série ont une durée de vie de plus en plus courte, ce qui implique qu'au niveau des équipements de production, il est nécessaire de prévoir une possibilité de réadaptation afin d'étaler les investissements.

- On constate une augmentation très importante des produits de grande série "à option" ce qui correspond à un mode de production de masse avec la flexibilité des petites à moyennes séries. En effet, les lignes de production doivent être capables de réaliser en grande quantité des produits pouvant posséder de nombreuses variantes et même des produits différents appartenant toutefois à une même famille. L'exemple le plus représentatif de ce mode de production est l'industrie automobile, essentiellement au niveau du processus d'assemblage.

- Vis à vis du client et du marché, une des principales qualités de l'entreprise industrielle est son temps de réponse qui doit être bien sûr le plus faible possible. On parle aujourd'hui de "*réactivité*". Le régime transitoire entre deux productions stabilisées comporte des opérations de réglage, de changement d'outillage, de modification de cadence, qui doivent se faire le plus rapidement possible afin de réduire la période d'arrêt.

□ III.4- Relation avec le client

Cette typologie distingue 2 catégories de relation avec le client [GIARD 88] [COURTOIS 95] : Production sur stock, production sur commande et mixte.

- Production sur Stock :

Une production sur stock est déclenchée par anticipation d'une demande s'exerçant sur un produit dont les caractéristiques sont définies par le fabricant. Ce type de production s'applique dans les cas suivants :

- l'éventail des produits finis est restreint ;
- la demande des produits est prévisible;
- le délai de fabrication est supérieur au délai admissible par le client;
- la saisonnalité du produit est trop forte pour justifier le maintien de ressources en hommes et machines qui seraient excédentaires une bonne partie de l'année.

L'équation qui régit le stock de produits finis est :

Stock produits finis	=	stock de sécurité	+	quantité de produits fabriqués	-	quantité de produits vendus
----------------------------	---	-------------------------	---	--------------------------------------	---	-----------------------------------

Le stock de sécurité permet d'amortir les variations de ventes par rapport aux prévisions.

L'objectif est de minimiser ce stock, soit à partir de prévisions de ventes très précises, soit grâce à une très grande réactivité du système de production lui permettant de se réguler par rapport aux ventes effectives (si les ventes diminuent, ralentir la production; si les ventes augmentent, accélérer la production).

La production sur stock repose donc sur une prévision très fine de la demande.

L'inertie du système de production pouvant être très importante, il est primordial d'avoir une boucle de retour des ventes effectives très rapide.

On peut assimiler un tel système à une boucle de régulation (voir figure 4) [BLONDEL 97]. Le système de production est piloté par l'écart entre les ventes effectives et les prévisions :

- Si l'écart est positif, l'excédent des ventes est tiré du stock de sécurité.
- Si l'écart est négatif, il faut ralentir ou même arrêter le système afin de ne pas augmenter le stock de produits finis.

Dans les deux cas, il est nécessaire d'augmenter ou de ralentir la cadence de production afin de tendre vers un écart nul entre prévisions et ventes effectives.

Comme le montre le schéma-blocs de la figure 4, le système de production peut rapidement s'avérer instable, si ce n'est chaotique [MASSOTTE 94] [ALFARO 97] quand les variations de la demande sont importantes. Mais comme le démontre d'ailleurs P. Massotte, même avec une demande constante, le système a une forte probabilité de comportement chaotique !

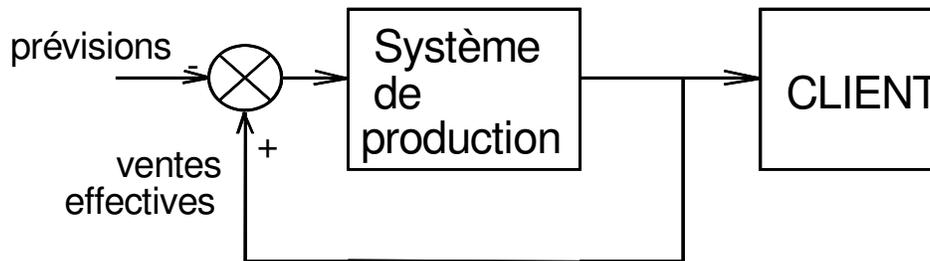


Figure 4 : Boucle de régulation du système de production

- Production sur commande :

Cette situation semble être la plus favorable à l'entreprise car elle lui permet de produire uniquement sur commande, mais à condition que le délai du cycle (achat + fabrication + assemblage + livraison) soit inférieur ou égal au délai acceptable par le client.

En théorie, si la condition précédente est remplie, aucun stock n'est nécessaire.

Dans certains cas où le délai de fabrication est trop long, il est possible d'anticiper l'achat et la fabrication des composants, et de procéder à l'assemblage dès que l'on a une commande ferme. Ceci implique aussi d'avoir de bonnes prévisions de ventes afin de ne pas constituer de stocks excessifs de composants. On parle alors de **Production MIXTE**, qui est de plus en plus rencontrée. En effet, dans ce type de production, le produit fini peut être personnalisé le plus en aval possible, tout en étant constitué de composants et sous-ensembles standards.

Le principal inconvénient de la production sur commande ou mixte est l'obligation d'avoir un système de production présentant le minimum d'aléas afin de ne pas perturber les délais. La maintenance préventive et prédictive doit donc jouer un rôle très important.

C'est ce type de fonctionnement que l'on appelle aujourd'hui le "**JUSTE A TEMPS**" (JAT) dont le principe est :

**IL FAUT ACHETER OU PRODUIRE SEULEMENT CE DONT ON A
BESOIN, QUAND ON EN A BESOIN.**

La différence avec la production sur stock réside dans la chronologie des opérations de ventes et de production :

Production sur stock : PRODUCTION puis VENTE;

Production sur commande : VENTE puis PRODUCTION.

Comme on l'a vu dans le chapitre II.1, nous sommes maintenant entrés dans une période dans laquelle les entreprises sont amenées à fonctionner en Juste à Temps, avec des productions très diversifiées, sur commande ou mixtes.

Bien que ce contexte semble plus favorable à l'entreprise vis à vis de sa trésorerie, il implique une gestion très précise, une forte réactivité de l'entreprise, une grande rationalisation des équipements de production, une grande maîtrise des flux physiques et informationnels, ...

La figure 5 de la page suivante présente un modèle de représentation des flux physiques et informationnels d'une production mixte en Juste à Temps. Il s'agit d'un macro-modèle, d'un niveau de description très général, qui permet de situer l'un des centres d'intérêt de ce travail : le processus d'assemblage des composants et sous-ensembles.

Un modèle de représentation des flux physiques et informationnels d'un processus d'assemblage en JAT

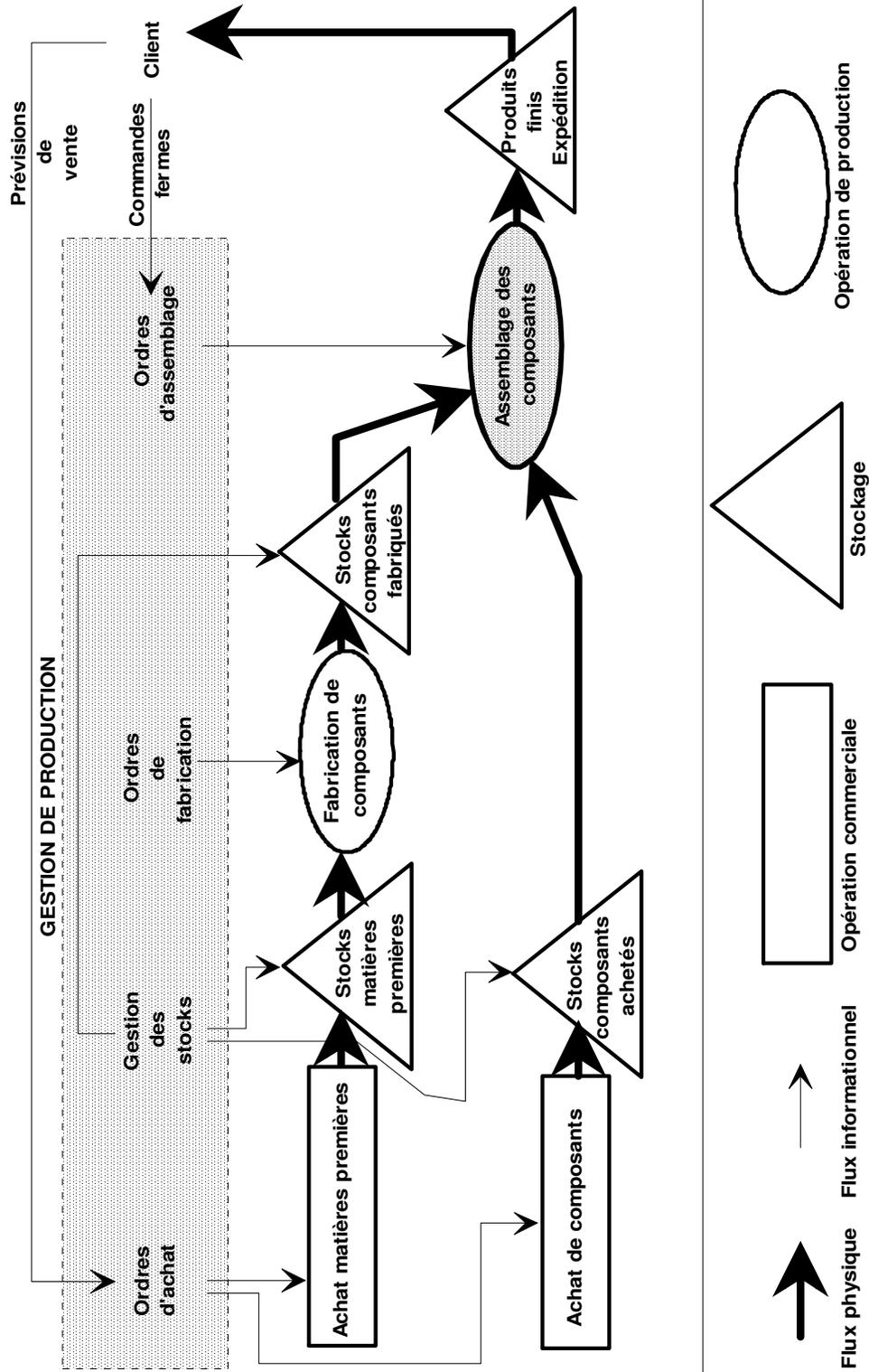


Figure 5 : Macro-modèle des flux dans un processus d'assemblage

IV- Synthèse des différents modes de pilotage des flux de production

Les principaux flux de production qui traversent l'entreprise sont :

- **les flux physiques** : composants achetés, fabriqués, pièces de rechange, sous-ensembles, produits finis, etc...
- **les flux informationnels** : commandes, ordres de fabrication, ordres d'approvisionnement, gammes, fiches opératoires, fiches de suivi, etc...

Les principaux objectifs d'amélioration des entreprises industrielles fonctionnant en Juste à Temps sont :

- **de simplifier les flux physiques** par l'amélioration de l'implantation des équipements; Plusieurs méthodes ont été développées pour répondre à cet objectif : Technologie de Groupe (TG) [MUTEL 92] , méthode des chaînons, algorithme de Kusiak, etc....

- **d'accélérer les flux physiques** en évitant les pannes, en diminuant les temps de changement de série, en améliorant la qualité, en développant la polyvalence des opérateurs, etc... La maintenance préventive et prédictive, le SMED (Single Minute Exchange of Die) [SHINGO 90], la TPM (Total Productive Maintenance) [NAKAJIMA 89], le SPC (Statistical Process Control)[VINCENT 93], sont des méthodes de plus en plus mises en œuvre dans les entreprises.

- **de rendre les flux informationnels plus cohérents et de faciliter la communication** et l'échange de données. C'est ce dernier objectif qui présente le plus de difficultés pour les entreprises, compte tenu de la quantité, de la diversité et de la difficulté à fiabiliser des informations, mais aussi à cause de l'éclatement des données dans l'ensemble des services. La Gestion des Données Techniques (GDT), l'Echange de Données Informatisées (EDI), la norme STEP, etc... répondent, tant bien que mal, aux interrogations des industriels dans ce domaine encore peu débroussaillé.

On distingue différents modes de pilotage des flux de production qui sont conditionnés par les flux d'informations qui contrôlent la production.

□ IV.1- Pilotage centralisé

Ce mode de pilotage s'applique aussi bien à la production de masse qu'à la petite série, chaque fois que des produits définis et planifiables existent. Le pilotage est réalisé à partir d'un programme directeur de production (PDP) sur un horizon de planification de

plusieurs semaines à plusieurs mois (plus précisément de 1,5 à 2 fois le cycle de production). Ce type de pilotage s'est particulièrement développé avec la création du MRP (Material Requirements Planning ou calcul des besoins nets) puis du MRP2 (Manufacturing Resource Planning ou Management des Ressources de Production) [ORLICKY 75],[WIGHT 84]. Le flux d'informations est déconnecté du flux de produits de par sa centralisation.

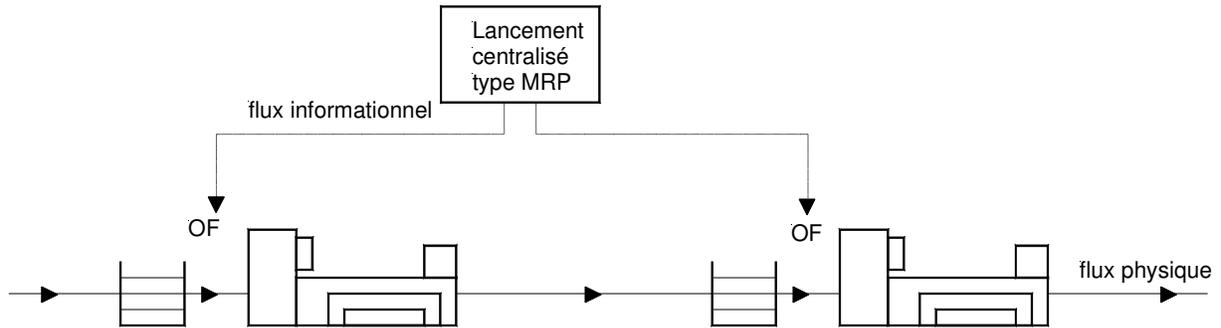


Figure 6 : Pilotage centralisé (type MRP)

□ IV.2- Pilotage par l'aval et décentralisé

C'est le mode de pilotage développé par l'industrie japonaise au début des années 60 et baptisé "Kanban", du nom des étiquettes servant d'ordres de fabrication [SHINGO 90].

Il est adapté aux productions en séries répétitives avec une demande régulière. C'est essentiellement un système de pilotage de l'atelier, ce qui fait qu'il est souvent couplé avec un système centralisé de type MRP. Le flux de produits est tiré par l'aval (le client), ce qui correspond à un flux d'informations remontant à contre-courant le flux physique.

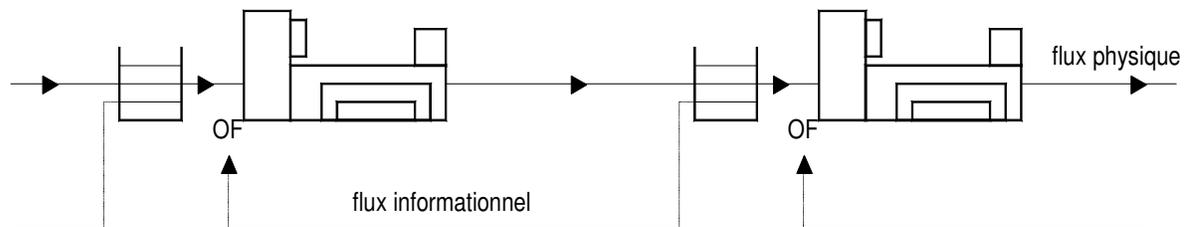


Figure 7 : Pilotage par l'aval et décentralisé (type Kanban)

□ IV.3- Pilotage par l'amont et décentralisé

Le flux de produit est dans ce cas poussé par l'amont. Ce pilotage est bien adapté à la fabrication sur commande de produits non planifiables, par petites séries non nécessairement répétitives [MULKENS 93].

□ IV.4- Pilotage synchronisé entre flux physique et flux informationnel

Ce pilotage est particulièrement adapté aux processus dont le transfert de produit est automatisé (système de convoyage, chariots filoguidés, etc...). On peut ainsi associer à chaque produit toutes les informations nécessaires à son élaboration (par exemple à partir d'étiquettes électroniques) [MULKENS 93].

□ IV.5- Pilotage par les contraintes ou méthode OPT

La méthode *OPT* (*Optimised Production Technology*) est née au Etats-Unis dans les années 80 [GOLDRATT 92]. Elle s'adresse, à priori, à des entreprises déjà partiellement informatisées qui utilisent un logiciel de type MRP. Mais les neuf règles de bon sens qui constituent son principe sont applicables par n'importe quelle entreprise, sans avoir nécessairement recours à l'informatique. La caractéristique de cette méthode est de prendre pour postulat l'existence d'une contrainte, un "goulet d'étranglement", quelque part sur la ligne de production : manque de personnel, machine inadaptée, etc.... Débit de sortie et niveau des stocks dépendent de ce goulet qui va donc déterminer le niveau d'utilisation des autres ressources, non critiques, appelées "non goulet". [MARRIS 95] a prolongé les travaux de [GOLDRATT 92] et défini cette méthode comme la *Théorie des Contraintes* ou *Management Par les Contraintes* (TOC ou MPC).

Les neuf règles de cette théorie :

1- Equilibrer les flux et non les capacités.

Bien que cela semble être judicieux, il est pratiquement impossible d'avoir un équilibrage parfait des capacités des différentes ressources d'une ligne de production, ne serait ce qu'à cause des aléas (pannes, défauts, rupture d'approvisionnement, etc...), mais aussi parce que la gamme de production n'est pas découpée en phases et opérations de

durées égales. Cette première règle propose donc de piloter la production à partir du flux de la ressource goulet.

2- Le niveau d'utilisation d'un non-goulet n'est pas déterminé par son propre potentiel, mais par d'autres contraintes du système.

3- Utilisation et plein emploi d'une ressource ne sont pas synonymes.

4- Une heure perdue sur le goulet est une heure perdue pour tout le système.

Cette règle permet, dans un premier temps, de limiter les actions préventives, de surveillance ou d'amélioration uniquement à la ressource goulet. En effet, il ne faut pas que la ressource goulet tombe en panne, qu'elle ne soit plus approvisionnée par son fournisseur. Il faut qu'elle ait des temps de changement de série rapide. En clair, il faut qu'elle ait une charge aussi proche que possible de sa capacité, donc un rendement opérationnel proche de 1.

5- Une heure gagnée sur un non-goulet est un leurre.

Si une amélioration doit être réalisée sur une ressource non-goulet, elle ne produira aucun effet sur l'ensemble du flux. Il est par exemple inutile de réduire le temps de changement de série ou de moderniser une ressource non goulet.

6- Le goulet détermine à la fois le débit de sortie et le niveau des en-cours.

Cette règle peut s'interpréter de la façon suivante : si on désire réduire le délai de production et la taille des en-cours, il ne suffit pas d'augmenter la taille et la fréquence des approvisionnements.

7- Souvent le lot de transfert ne doit pas être égal au lot de production.

C'est le cas du chevauchement d'opérations [AFNOR 91], où l'on transfère du poste amont au poste aval une quantité inférieure à celle qui est lancée.

8- Les lots de fabrication doivent être variables et non fixés.

Il s'agit de fractionner les lots en cours de cycle de production pour obtenir encore plus de souplesse. Cette règle s'oppose complètement à la notion de série économique de Wilson... Si les temps de changement de série sont courts, si les machines sont bien implantées, si l'on pilote la production par le flux de la ressource goulet, il n'y a plus besoin de créer des séries économiques !

9- Etablir la planification en prenant en compte simultanément toutes les contraintes de capacité et de priorité.

On ordonnance (en capacité finie) en priorité la production des ressources goulets. Les autres ressources peuvent être ordonnancées par des règles simples, puisqu'elles sont surcapacitaires.

La devise de la Théorie des Contraintes :

La somme des optimums locaux n'est pas l'optimum global du système .

L'identification des ressources goulets :

- Une ressource dont le niveau d'en-cours amont est important par rapport aux autres ressources est peut être un goulet.
- Les produits finis livrés en retard possèdent des composants réalisés sur la ressource goulet.
- La ressource goulet est celle qui a le taux d'occupation = charge/capacité le plus élevé.

V- Typologie des flux physiques et implantation des lignes de production

- V.1- Flux physique avec opérations et manutentions synchronisées (ou liées) "Paced flow lines"

Ce type de flux correspond à une production de masse (voir chapitre I.1) réalisée sur des équipements de production automatisés : transferts rotatifs ou linéaires.

Les produits présents à chaque poste de travail sont traités de façon simultanée, avant d'être transférés simultanément aussi vers le poste suivant [ANDERSON 97] .

L'implantation des postes de travail peut être circulaire, disposés autour d'un plateau tournant qui comporte en général de 4 à 24 positions. A un instant donné, à chaque position correspond une phase de la gamme de fabrication ou d'assemblage du produit.

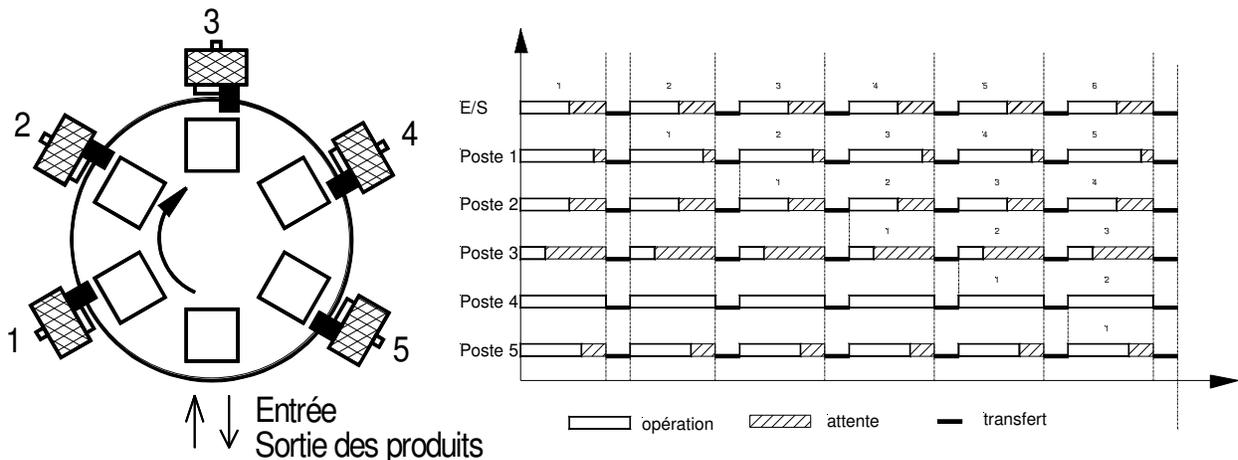


Figure 8 : Transfert et opérations synchronisées

L'implantation peut être aussi linéaire, ce qui permet une accessibilité accrue (côtés et dessus du produit) ainsi qu'un nombre d'opérations plus élevé par rapport à l'implantation circulaire.

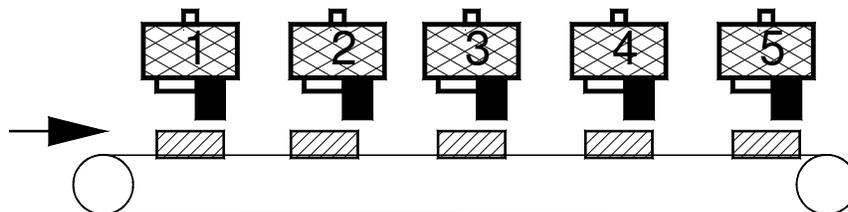


Figure 9 : Implantation Linéaire d'un Transfert Synchronisé

La cadence de production est en général très élevée (600 à 20000 produits/heure), bien que conditionnée par la cadence de l'opération la plus lente. Il est donc préférable d'équilibrer les temps opératoires de chaque poste afin de réduire les temps d'attente et de tendre vers un flux continu.

Le principal inconvénient de cette implantation réside dans les pannes et arrêts que peuvent subir les postes de travail. En effet, toute la production est stoppée en cas de problème survenant à l'un des postes de travail.

D'autre part, les équipements de production sont peu évolutifs et peu flexibles. Chaque produit passe par les mêmes postes de charge, dans le même ordre. On peut simplement prévoir que certains produits identifiables ne subissent pas certaines opérations, mais l'ordre est respecté. *Les équipements de production sont dédiés à un produit.*

Dans son article, [LITTLE 94] appelle ce type de ligne : "Dedicaced flow line"

□ V.2- Flux physique avec opérations et manutentions asynchrones (ou libres) "Unpaced flow lines"

Ce type de flux correspond à une production de masse ou en petites à moyennes séries avec une circulation des produits de type *Job Shop* ou *Open Shop*. Les équipements de production et de transfert peuvent être automatisés ou pas et être utilisés pour traiter différents produits.

Le principe général de ce flux est que le transfert des produits d'un poste de charge à un autre est indépendant des opérations qui s'y déroulent : les opérations de transfert ne sont pas synchronisées avec la fin de toutes les opérations de valeur ajoutée. C'est le type de flux qui correspond à la réalisation de produits dont les différentes opérations s'effectuent à des cadences très différentes [ANDERSON 97].

En ce qui concerne l'implantation des équipements, il faut distinguer au moins deux cas en fonction du niveau d'automatisation du système de transfert (ou de manutention) :

- **manutention non automatisé;**

- **manutention automatisé.**

V.2.a) Manutention non automatisée

Ce type de manutention se rencontre essentiellement dans les processus comportant des opérations d'usinage ou de transformation de la matière.

Les équipements sont implantés :

- **de façon fonctionnelle**, par ateliers spécialisés (voir figure 10). On regroupe les machines réalisant le même procédé : atelier soudage, atelier peinture, atelier fraisage, atelier montage , etc.... Cette implantation qui correspond à une organisation taylorienne, a dominé depuis le début du siècle et continue aujourd'hui à prévaloir dans les ateliers de sous-traitance réalisant des produits à la commande de façon non répétitive. En effet, il est possible de fabriquer tous les types de produits utilisant les moyens de l'atelier sans perturber davantage le flux.

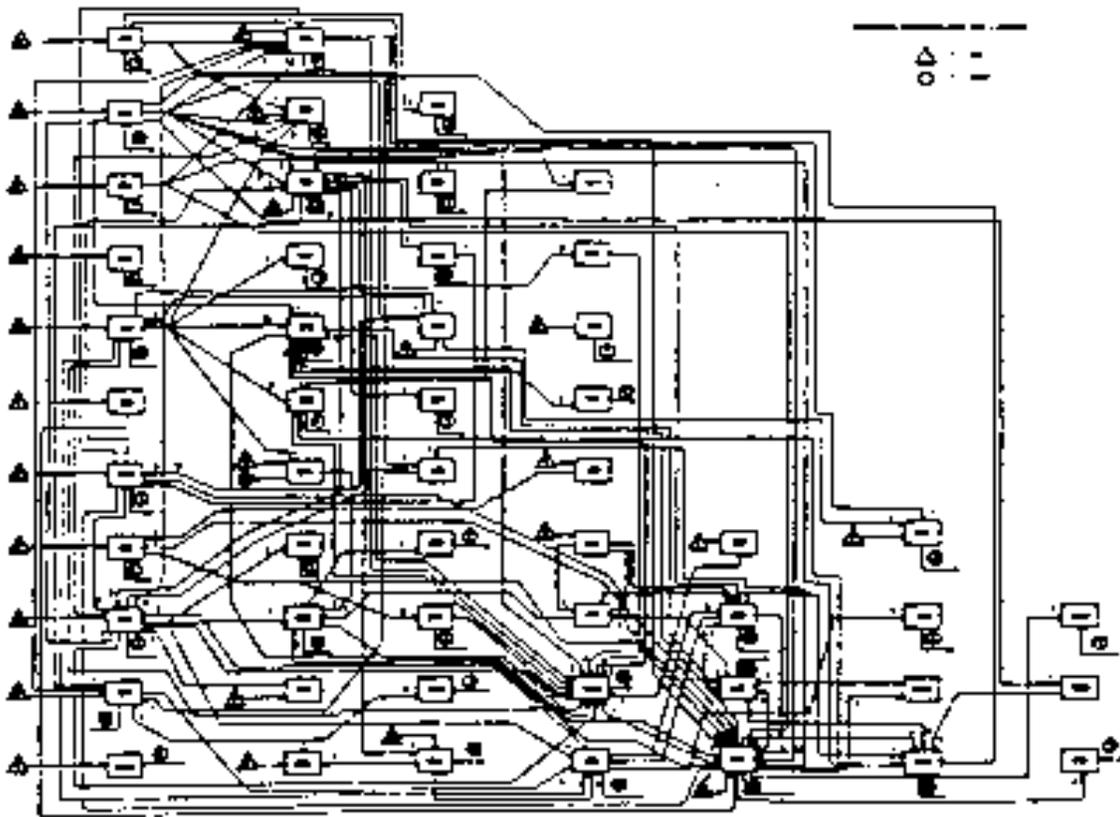


Figure 10 : Implantation fonctionnelle

- **en cellules ou îlots de fabrication.** Cette implantation est constituée de petits ateliers de production composés de machines différentes afin de réaliser entièrement ou partiellement une famille de pièces présentant des similitudes morphodimensionnelles ou de processus. Les machines sont généralement implantées dans l'ordre de la gamme dominante (gamme "mère") de la famille, de telle sorte que le flux physique soit le plus continu possible, avec le minimum de transfert ou d'attente entre deux postes (figure 11).

Ce type d'implantation est en plein développement dans les ateliers d'usinage qui travaillent par petites séries répétitives de produits variés.

La recherche est très active dans ce domaine où des méthodes d'optimisation de l'implantation sont développées.

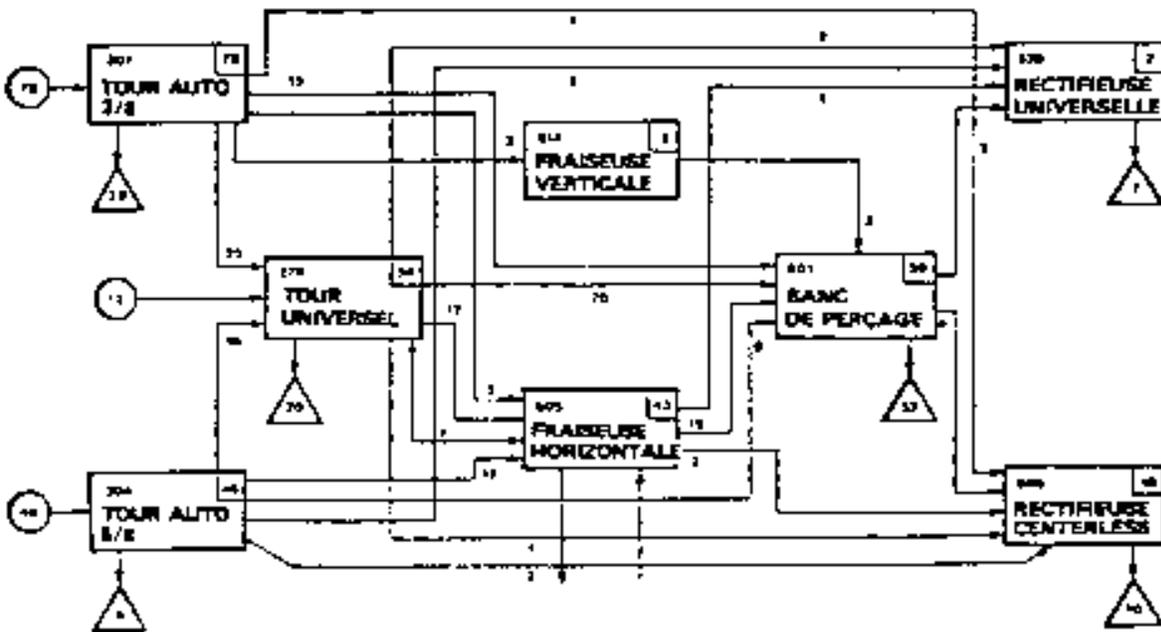


Figure 11: Implantation en îlot

V.2-b) Manutention (ou transfert) automatisée

Le transfert automatisé constitue l'ossature d'un processus d'assemblage de composants. En effet, bien que l'on rencontre quelques cas dans des ateliers flexibles d'usinage, le transfert asynchrone automatisé (Power-and-Free Transfer) est devenu l'élément essentiel des lignes d'assemblage correspondant aux critères de production suivants :

- flexibilité importante : assemblage d'une famille de produits en petites séries;
- cadence moyenne : 20 à 60 opérations par minute;
- différence de temps opératoires sur les différents postes de travail;
- faible durée de vie du produit assemblé;
- fréquents changements de produits;
- qualité optimale;
- automatisation progressive du processus, les postes de travail pouvant être manuels ou automatisés;

Ces différents critères correspondent à la grande majorité des produits assemblés de nos jours.

Ce type de système de manutention est appelé "Mixed Model Flow Line" et " Flexible Flow Line" dans la littérature [LITTLE 94], et sera donc analysé plus en détail dans la partie 2 (Caractéristiques des processus d'assemblage).

□ V.3- Autre typologie

[LITTLE 94] propose une autre typologie des systèmes d'assemblage, basée non pas sur le flux physique et l'implantation, mais sur la structure et la technologie du transfert. Cette typologie comporte deux grandes familles :

V.3-a) Les lignes transfert (Flow Lines) où le produit se déplace le long de la ligne et les composants sont ajoutés par étapes successives sur plusieurs postes de travail.

Cette famille est composée de trois catégories de lignes :

- **les lignes transfert dédiées (dedicated flow lines)** : elles sont dédiées, comme leur nom l'indique, à l'assemblage d'un seul et même produit. Chaque poste de

travail ne réalise qu'une seule opération et reçoit les produits toujours dans le même ordre. Sur ce type de ligne, la seule flexibilité consiste à ne pas réaliser certaines opérations, le produit passant quand même sur le poste de travail. Les postes de travail sont généralement reliés par un dispositif de transfert synchrone pas à pas, programmé pour libérer un produit seulement si le poste aval est prêt à le recevoir. De la même façon, les produits ne peuvent entrer sur la ligne que si le premier poste est libre.

- **Les lignes transfert multiproduits (mixed model flow lines)**, dont le principe est identique aux lignes transfert dédiées, à la différence que les postes de travail sont prévus pour réaliser l'assemblage de plusieurs types de produits (mais appartenant à la même famille). La principale différence réside donc dans les dispositifs de distribution des composants aux postes de travail qui sont adaptés pour servir plusieurs types de composants pour plusieurs types de produits.

- **Les lignes transfert flexibles (flexible flow lines)** : Les postes de travail sont dans ce cas reliés par un convoyeur asynchrone (non-synchronous material handling system) qui permet d'accumuler des produits entre deux postes de travail pour maintenir un niveau d'utilisation satisfaisant. Chaque poste de travail est constitué de plusieurs machines identiques en parallèle toutes capables de réaliser plusieurs opérations sur plusieurs produits. Un poste de travail ne peut libérer un produit que si le convoyeur d'accumulation aval (buffer) a une position de libre. Si ce n'est pas le cas, le produit est bloqué (blocking). A l'inverse, un poste de travail aval peut être en attente (starvation) par manque de produit provenant du poste amont.

V.3-b) Les cellules flexibles (Flexible Assembly Cells) où les mouvements du produits sont limités voire inexistantes. L'assemblage est donc réalisé sur un seul poste de travail. La possibilité de réaliser simultanément différents sous-ensembles de produits donne à ces systèmes leur flexibilité. Ces sous-ensemble sont ensuite amenés simultanément vers une étape d'assemblage final. Cette famille de systèmes peut elle aussi être divisée en trois catégories :

- **Cellules flexibles d'assemblage avec plusieurs postes de travail (multi-station cells)**, disposés en dérivation sur un transfert asynchrone, et pouvant réaliser tout ou partie des opérations d'assemblage.

- **Cellules flexibles d'assemblage avec postes de travail à opérations multiples (multi-stage assembly cells)**

- **Cellules flexibles à station de travail unique (single-station assembly cell)** : Dans ce cas, le poste de travail est constitué d'un robot d'assemblage qui dispose d'un système de changement d'outil/effecteur. Cela permet au robot d'assembler plusieurs produits par simple changement de pince et de programme.

Conclusion

Cette première partie de thèse a été consacrée à une description générale des principales caractéristiques de la production.

L'état de l'art fait ressortir un grand nombre de configurations possibles au niveau des produits, des processus, des modes de pilotage des flux, des systèmes de transfert et de l'implantation des lignes.

Il était important dans cette partie de montrer l'étendue et la variété des environnements de production pour mettre plus en évidence les configurations qui seront étudiées en détail et qui correspondent aux travaux de recherche.

On a insisté en particulier sur la description des processus d'assemblage car ils sont fréquemment rencontrés et leur étude est donc représentative.