

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

LOGISTIQUE

## Logistique interne

Entreposage et manutention

Lionel AMODEO

Farouk YALAOUI

ellipses

# Avant-propos

Les systèmes de production sont de plus en plus complexes et sont caractérisés par des interactions nombreuses avec leurs environnements. La gestion efficace de ces systèmes est d'autant plus difficile que les frontières extérieures ne sont pas précises.

Globalement, il existe deux types de représentations : interne et externe. Le schéma de production interne ne prend en compte que les lieux de production, avec par exemple les ateliers de fabrication et les services administratifs associés alors que le schéma de production global représente une vision plus générale de l'entreprise impliquant plus d'acteurs. C'est le cas d'une chaîne logistique (*supply chain*) dont la distribution physique fait partie.

La distribution physique est une composante très importante de l'entreprise. Elle représente les activités en aval du système de production regroupant, par exemple, les opérations de traitement des commandes, de manutention, d'emballage, d'entreposage, de gestion des stocks et de transport. Cette activité constitue une part économique non négligeable (jusqu'à 15% du chiffre d'affaires en fonction des produits et des domaines). La distribution physique est complètement concernée par la qualité de service et la satisfaction du client. Elle est très importante et peut faire la différence entre les entreprises, surtout dans le monde concurrentiel de la distribution.

Tout gestionnaire se doit de réunir toutes les exigences opérationnelles et structurelles pour optimiser le fonctionnement de son système de production. Les exigences, opérationnelles et managériales sont les politiques de stockage et d'approvisionnement, les protocoles de productions et de planification, l'optimisation des tournées de distributions. L'aspect structurel est lié aux moyens humains, matériels et financiers, en prenant en compte leur nombre et leur dimensionnement. On peut ainsi gérer au mieux la structure du réseau de distribution, les niveau de stockage (plate forme centrale ou plusieurs dépôts), le nombre d'établissements par niveau (leur localisation, leur capacité, et le mode de transfert de données). Parmi les problématiques inhérentes à l'entreprise, on trouve entre autres le stockage, la distribution, la communication et l'entreposage.

Pour les entreprises, l'entreposage est un poste budgétivore. Des investissements importants en bâtiment, en sécurité, en gestion et en matériel de manutention sont consentis. L'amortissement de ces derniers ne se fait que sur des périodes assez longues. Selon certaines études, il faut en moyenne 10 à 15 ans pour l'amortissement d'un bâtiment, 10 ans pour le matériel de stockage et 5 ans pour la manutention. Ces amortissements représentent alors une part non négligeable du coût total d'exploitation d'un entrepôt en plus des frais financiers, des salaires et des charges, des assurances, du chauffage, de l'éclairage. La majeure partie des charges est fixe laissant ainsi le coût de fonctionnement pratiquement indépendant du niveau d'activité. La variabilité du coût est alors induite essentiellement par les frais du personnel permanent et intérimaire, et la consommation d'énergie des moyens de manutention.

Dans ce travail, deux thèmes sont développés : la manutention et l'entreposage. Ces thèmes sont des composants importants de l'organisation interne des systèmes industriels. Mais pour bien comprendre les problèmes liés à leur conception, à leur mise en place et à leur gestion opérationnelle, des rappels de notions d'optimisation et des exemples d'applications informatiques sont donnés à la fin du document.

# Sommaire

<b>CHAPITRE I : L'ENTREPOSAGE.....</b>	<b>7</b>
1 CARACTERISATION DES ENTREPOTS	8
2 RECEPTION	15
3 MISE EN ENTREPOT : STOCKAGE	37
4 PROTECTION DES STOCKS ET DES ENTREPOTS	40
5 EXPEDITION ET GESTION DES COMMANDES	41
6 CONCEPTION ET GESTION DES ENTREPOTS	47
<b>CHAPITRE II : LE MANAGEMENT DE L'ENTREPOSAGE.....</b>	<b>54</b>
1 ÉTAT DE L'ART SUR LES PROBLEMES D'ENTREPOSAGE	54
2 MODELES SPECIFIQUES DE GESTION D'ENTREPOSAGE	56
3 PROBLEME DE LOT-SIZING	69
4 ENTREPOSAGE ET INFORMATIQUE	70
5 ANALYSES ET COMMENTAIRES	71
<b>CHAPITRE III : LA MANUTENTION.....</b>	<b>73</b>
1 GENERALITES	73
2 CLASSIFICATION DES MATERIELS DE MANUTENTION	76
3 LES CHARIOTS DE MANUTENTION	76
4 LES APPAREILS DE LEVAGE	84
5 LA MANUTENTION CONTINUE	86
6 LES CHARIOTS GUIDES AUTOMATIQUEMENT	91
7 LES CHARIOTS DE MANUTENTION SPECIAUX	95
<b>CHAPITRE IV : CONCEPTION ET GESTION DE LA MANUTENTION.....</b>	<b>98</b>
1 SELECTION D'EQUIPEMENTS	98
2 CONCEPTION ET GESTION OPERATIONNELLE DES AGV	100
3 ETUDE DE CAS : ORDONNANCEMENT CYCLIQUE DES ROBOTS	106
<b>CHAPITRE V : MODELISATION ET EVALUATION DE PERFORMANCES.....</b>	<b>112</b>
1 INTRODUCTION	112
2 FORMALISME DES RESEAUX DE PETRI	112
3 MODELISATION DES STRUCTURES DE BASE	115
4 MODELISATION D'ENTITES ET EVALUATION DE PERFORMANCES	119
5 ETUDE DE STRUCTURES COMPLETES	123
6 ANALYSE DE PERFORMANCES	128
<b>CHAPITRE VI : NOTIONS FONDAMENTALES D'OPTIMISATION.....</b>	<b>129</b>
1 MODELISATION	130
2 COMPLEXITE	131
3 METHODES D'OPTIMISATION CLASSIQUES	131
4 CONCLUSION	138

---

<b>CHAPITRE VII : PROGRAMMES INFORMATIQUES .....</b>	<b>139</b>
1 FILE D'ATTENTE M/M/S (MACRO SOUS MICROSOFT EXCEL)	139
2 ORDONNANCEMENT CYCLIQUE DE ROBOT (MATLAB)	140
3 SELECTION D'EQUIPEMENTS : SOLVEUR MICROSOFT EXCEL	141
4 SIMULATEUR DE RESEAU DE PETRI (MATLAB)	144
5 CONTROLE PROGRESSIF (VISUAL BASIC SOUS EXCEL).	146
6 CONTROLE PROGRESSIF (LANGUAGE C)	149
<b>REFERENCES .....</b>	<b>153</b>
<b>INDEX .....</b>	<b>155</b>

# Chapitre I

## Entreposage

Dans un contexte économique fortement concurrentiel, les compagnies se doivent sur l'ensemble de la chaîne logistique, de réaliser une production à fort débit, avec des stocks minimaux et une livraison des plus rapide. Cette stratégie logistique a provoqué des modifications dans la gestion des entreposages. Des petits volumes doivent être livrés plus souvent, avec moins de délais, à partir d'une plus grande variété d'unités en stock (*Stock Keeping Units ou SKUs*). Pour diminuer le stock total, beaucoup de compagnies remplacent plusieurs petits centres de distribution (*distribution centers ou DC*) par un nombre réduit de grands centres avec une zone de distribution plus grande.

L'attention portée par les chercheurs, dans le domaine du management des stocks et des entrepôts, est limitée. Cette problématique est souvent étudiée dans un domaine différent. Cette constatation est également valable pour la recherche sur la manutention (*material handling*). En effet, la problématique d'entreposage est prise en compte dans le management des stocks or ce sont des problèmes à part entière avec leurs objectifs et leurs contraintes.

En pratique, les ERP (*Entreprise Ressources Planning*) sont des outils de gestion des différentes composantes de l'entreprise y compris l'entreposage. Ils permettent de faire de la gestion financière, des ressources humaines, de la planification, et de la gestion des stocks. Ils peuvent également gérer la planification des entreposages, l'ordonnancement, le flux des entrées et des sorties. Les différentes composantes de l'ERP communiquent entre elles via l'EDI (*Electronic Data Interchange*).

La manutention (*Material Handling*) est le mouvement des matériaux (matières premières, produits semi-finis, produits finis, déchets, rebuts) à travers et en provenance du processus de production, au niveau des entrepôts, et des secteurs de réception et de distribution. La manutention concerne le flux (convoyeurs, véhicules autoguidés, ponts roulants ...) et l'entreposage des matériaux. Les études relatives aux entrepôts et à leurs modes de gestion se confondent souvent avec les études des problèmes de manutention ou plus largement de transport interne.

L'étude de l'entreposage et des entrepôts consiste à analyser, comprendre, maîtriser et gérer les produits, leur acheminement (manutention) et les lieux physiques de stockage.

On distingue 3 types d'entrepôts :

- Les entrepôts de distribution qui se chargent des flux de produits venant de différents fournisseurs pour être livrés à des clients
- Les entrepôts de production qui gèrent le stockage des matières premières, des produits semi-finis et des produits finis.
- Les entrepôts communs à plusieurs clients (fournisseurs, producteurs, distributeurs).

Le stockage de l'information et sa classification n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage.

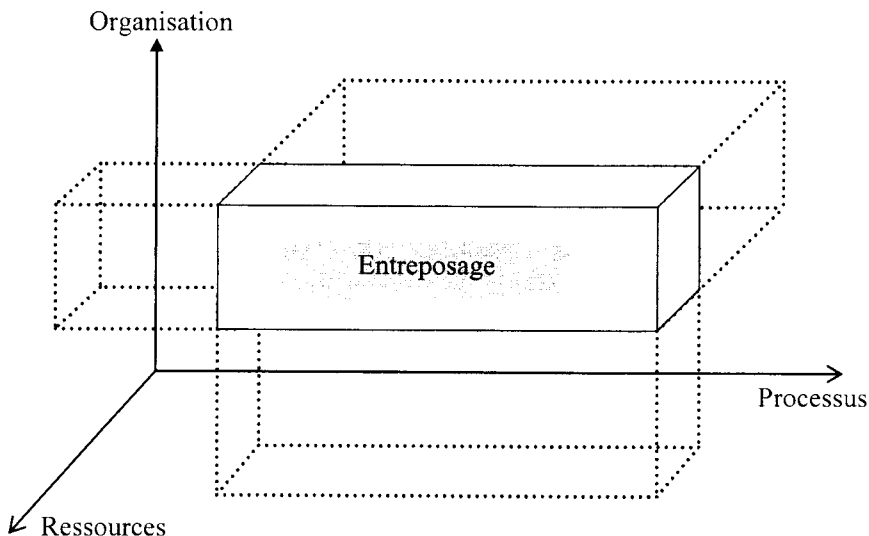
## 1 Caractérisation des entrepôts

Dans le cadre de l'entreposage, un produit est tout type de marchandise. Les unités sont des articles (*items*) (ou *SKU's* : *Stock Keeping Units*) et la combinaison de plusieurs articles, demandés par un client, est appelée commande ou ordre (*order*).

Un entrepôt peut être vu sous trois angles différents : le processus, les ressources et l'organisation. Les produits qui arrivent à un entrepôt passent par un certain nombre d'étapes appelées processus. Les ressources sont tous les moyens, les équipements et le personnel nécessaires pour faire fonctionner l'entrepôt. Alors que l'organisation inclut tous les plannings et les procédures de contrôle utilisés pour faire fonctionner le système.

Si on considère le flux des matériaux dans un entrepôt, les marchandises sont d'abord livrées par camions, déchargés à la réception, puis vérifiées en terme de quantité et de qualité. Ensuite, les produits sont préparés pour le transfert vers la zone de stockage. Un code est alors attribué aux marchandises. Si les moyens d'entreposage en interne (*storage modules*) (palettes, emballages ou cartons) sont différents de ceux de la livraison, alors il faut réassembler. Les marchandises sont ensuite transportées aux lieux de stockage (*storage area*). Enfin, chaque fois que l'on a besoin d'un produit à expédier, il faut le prélever de son lieu de stockage (*order picking*). Un ordre ou une commande (*order*) liste tous les produits et les quantités demandés par le client.

L'entreposage peut être défini par une combinaison de fonctions ou d'opérations effectuées sur les marchandises (voir Figure 1). Ces opérations s'étalent entre la date d'arrivée des produits dans le système jusqu'à leur utilisation ou leur sortie. La fonction stockage, ou entreposage, représente un poste important dans le bilan économique des entreprises. Ses performances et ses coûts doivent être suivis en permanence. Cette activité peut se situer à différents niveaux de l'entreprise et ce en fonction de l'importance et de l'activité de celle-ci.



*Figure 1 : Entreposage et ses composantes*

## 1.1 Processus d'entreposage

Le flux des articles dans l'entrepôt peut être divisé en plusieurs étapes (ou processus) distinctes :

- La phase de réception est la première étape du flux du produit dans l'entrepôt. Les produits sont contrôlés ou transformés (c'est-à-dire réemballés dans différents modules) et attendent d'être acheminés dans la prochaine étape du processus. En résumé, dès leur arrivée, il y a :
  - Le déchargement du moyen de transport utilisé (camion, wagon, bateau, ou autre) en utilisant le moyen de manutention adapté.
  - Le contrôle de la quantité des produits reçus et de leur qualité. Des procédures de réclamations ou de blocage sont déclenchées en cas de non-conformité.
- La phase de stockage où les articles sont entreposés à des emplacements dédiés. La zone de stockage peut être décomposée en deux parties : la réserve où les produits sont stockés de manière économique et le magasin (*forward area*) où ils sont placés pour être prélevés simplement par un préparateur de commande (*orderpicker*). Dans le magasin, les produits sont souvent stockés en petites quantités et facilement accessibles.
- La phase de transfert (manutention) des produits de la réserve au magasin est appelée remplissage (*replenishment*). Le prélèvement (*orderpicker*) consiste à récupérer des articles des stocks. Il est fait de manière manuelle, partiellement ou totalement automatique. Ces articles peuvent être transportés au processus de sortie/consolidation. La consolidation fait ici référence à un groupe de produits destinés à un même client. Par la suite et même durant d'autres étapes de l'acheminement, le choix des systèmes de manutention est un point important qui conditionne la qualité de la gestion
- Les phases d'enregistrement et de protection des produits dans les entrepôts sont fondamentales pour une bonne gestion du système de stockage. La partie protection, par l'emballage, est très importante. Cette étape peut être faite durant la phase de réception.
- La phase d'expédition, qui en fonction de la place de l'entrepôt par rapport à la durée de vie du produit stocké, occupe une place importante. Elle passe par :
  - La préparation des produits en fonction des commandes clients ou des besoins internes.
  - Le contrôle de sortie et l'emballage pour les besoins commerciaux, de protection et de sécurité.
  - La manutention et le chargement des moyens de transport et d'expéditions sont à ce stade du processus l'enlèvement des produits (*picking*) dans les zones de préparation des commandes.

En plus des opérations précitées, il en existe d'autres dites occasionnelles, telles que la peinture des lieux de stockages, l'ajout d'options, etc. Toutes ces opérations doivent s'intégrer de façon à assurer un flot continu de marchandises, sans goulet d'étranglement, et au moindre coût.

L'organisation des activités d'entreposage nécessite un effort certain vu l'importance du nombre d'opérations à réaliser, de l'effectif impliqué et du matériel nécessaire. Au sein de structure importante, cette activité occupe plusieurs dizaines de personnes.

Une étude sur le marché anglais a montré que la phase de préparation pour l'expédition (*order picking*) représente plus de 60% des coûts de gestion d'un entrepôt. Cette phase du processus a suscité beaucoup d'études et de recherches. L'organisation des sorties et des expéditions conditionne la sécurité et le niveau d'accessibilité, mais également le niveau de service, la conception et le management des entrepôts. La satisfaction du client est d'autant plus importante qu'elle dicte la durée de vie d'un certain nombre d'activités.

## 1.2 Les ressources d'entreposage

Il faut distinguer trois grandes catégories : le personnel, le bâtiment et les équipements.

### Le personnel

Selon Roux, [35] : *"Une organisation aussi parfaite soit-elle ne vaut que par la qualité des hommes qui la servent"*. Le dimensionnement précis et pertinent d'un entrepôt (ou système de stockage) n'est valide que grâce à une quantification nette de l'ensemble du personnel opérationnel, administratif et d'encadrement. Les activités peuvent être résumées en postes opérationnels, fonctions annexes, postes de maîtrise, service maintenance, service informatique, direction de l'encadrement et services administratifs.

Le travail du personnel est régi par une série de règles et de protocoles comme pour tout métier. Il existe, par exemple, des limites journalières aux chargements, aux manipulations, et aux distances parcourues dans les entrepôts.

### Le bâtiment

Les bâtiments comptent parmi les ressources fondamentales de tout système d'entreposage. Le bâtiment est conditionné par différents paramètres dont le terrain, la position géographique, les accès, ...

Les caractéristiques de base pour le choix d'un terrain sont la superficie, les propriétés géophysiques, le prix, la proximité d'un réseau routier, d'un aéroport, d'une voie ferrée, d'une zone de ferroutage, ...

Le bâtiment impose des exigences et des règles. Citons par exemple les normes de construction fixant la hauteur des rambardes de sécurité à 1 mètre ou la pente du toit de 2 à 4% suivant les zones géographiques. Pour les sols, il faut respecter les recommandations de la Fédération Européenne de Manutention FEM 9.831 et la norme DIN 1045 pour leur résistance, la norme DIN 18202 pour la planéité des sols. Au delà d'une hauteur de stockage de 7 mètres aucune dénivellation supérieure à 2 mm n'est acceptée.

### Les équipements

Les équipements peuvent être distingués par les types de ressources. On retrouve :

- L'unité de stockage dans laquelle les produits peuvent être entreposés (palettes, boîtes en carton ou en plastique).



- Le système de stockage qui se compose de plusieurs sous systèmes dans lesquels sont placés différents types de produits. Ils sont très variés car on trouve de simples étagères à des systèmes hautement automatisés, avec des grues et des convoyeurs.

La récupération des articles stockés est réalisée soit manuellement soit au moyen d'équipements de prélèvement (*reach truck*). Les autres équipements des préleveurs (*orderpicker*) sont appelés les auxiliaires (scanners ou lecteurs pour codes à barres). En fonction du type d'entreposage, le système par ordinateur peut être utilisé pour permettre le contrôle informatisé du processus par le système de management de l'entrepôt. Par exemple, l'équipement pour la préparation du prélèvement des articles pour l'expédition inclut des systèmes de triage, des palettiseurs (*palletizers*) et des chargeurs de camions.

Une grande variété d'équipements et de méthodes est utilisée. La méthode la plus simple est dite d'empilement en blocs (*block stacking*). Le rayonnage en casier (*bin shelvin*) et le mode des tiroirs modulaires de stockage (*modular storage drawers*) sont parfois utilisés pour le stockage de petits objets. Pour les objets encombrants sur palettes, les supports de palettes (*pallet racks*), les équipements basés sur le principe dit de l'écoulement par gravité (*gravity flow racks*), les supports mobiles de stockage (*mobile storage racks*) sont largement utilisés.

Les équipements sont de deux familles soit fixes, soit mobiles.

### Équipements fixes

- Les palettiers sont des rayonnages à palettes. Ils se composent d'échelles verticales reliées par des lisses horizontales. Les épaisseurs des échelles sont de 100 mm en moyenne. Des règles de calcul de rayonnages existent. On trouve ainsi la règle SIMMA (Syndicat des Industries et Matériels de Manutention) qui depuis 1975 a très longtemps été la seule. Mais, on trouve actuellement la règle FEM 10/2.02. Bien entendu, les règles et des normes de sécurité habituelles sont également imposées par les lois en vigueur.

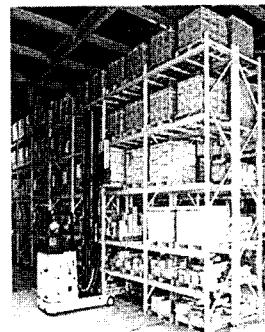
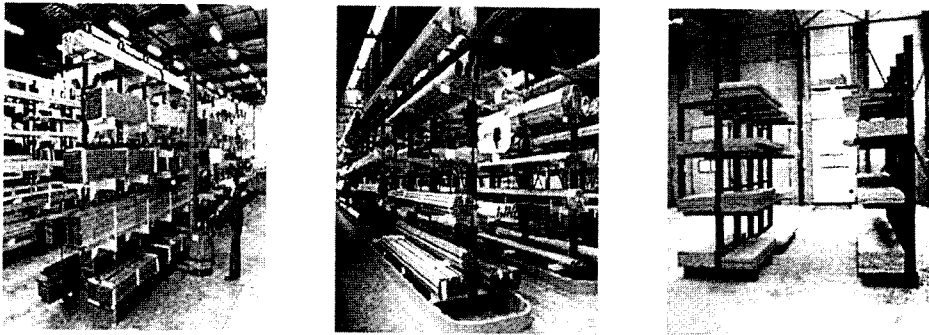
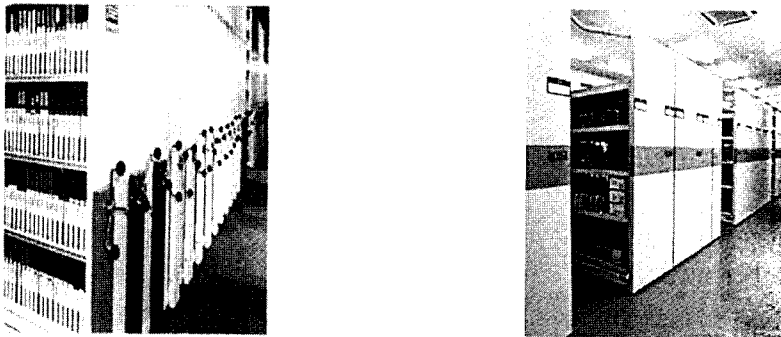


Figure 2 : Exemples de palettiers [44]

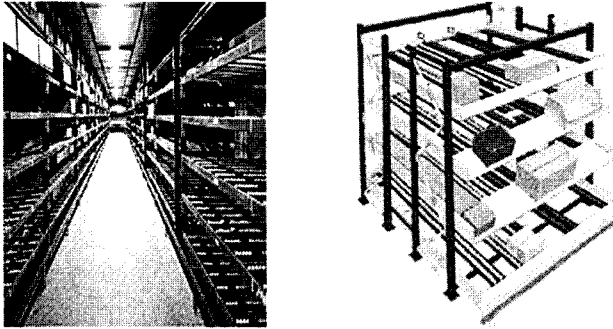


*Figure 3 : Exemples de cantilevers [44]*



*Figure 4 : Exemples de stockages mobiles [44]*

- Les cantilevers sont des systèmes de stockage pour les charges lourdes. Ils consistent en un ensemble de supports en porte-à-faux ou en gondoles. Des cantilevers peuvent avoir des bras supérieurs plus courts que leurs bras inférieurs. Avec l'utilisation de pont roulant, ces systèmes sont appelés sapins.
- Les casiers sont dédiés aux produits de petite et moyenne dimension. Ce type d'équipements peut comporter également des armoires.
- Les stockages mobiles sont très utilisés pour les systèmes d'archivage, de bibliothèques et les officines pharmaceutiques avec des dimensions moyennes.
- Les stockages dynamiques consistent à introduire les produits à une extrémité des alvéoles et de les récupérer à l'autre extrémité. L'avance des articles à l'intérieur de ces alvéoles spécifiques, en forme de tunnels ou de couloirs, se fait le plus souvent par simple gravité sur des rampes à galets. En général, la pente des rouleaux ou des galets est fixée entre 2 et 4%. La règle de gestion de ce mode de stockage est de type FIFO (*First In First Out*, Premier Entrée Premier Sortie).

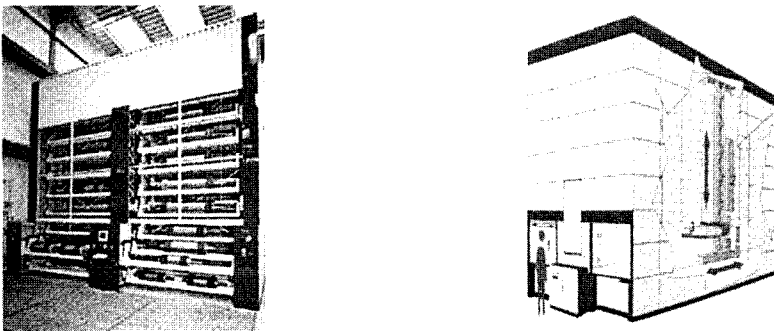


*Figure 5 : Exemples de stockages dynamiques [44]*

### Équipements mobiles

Une partie importante de ce type d'équipements est présentée dans le chapitre consacré aux moyens de manutention.

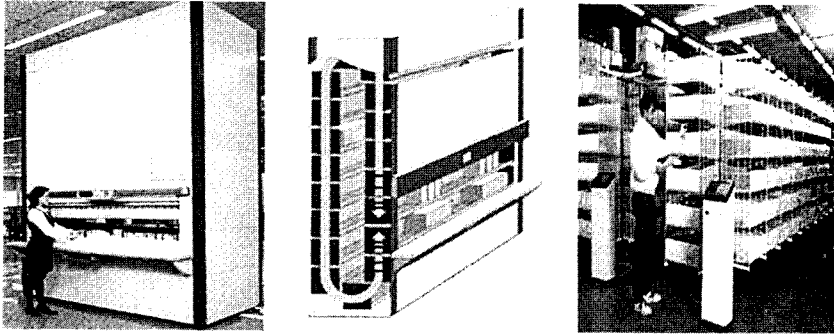
- Les transpalettes sont des moyens de manutentions destinés aux transferts horizontaux de charges sur des palettes ou des conteneurs adaptés. Ils peuvent être manuels ou électriques.
- Les armoires rotatives sont des systèmes de stockages verticaux rotatifs. Ils sont construits autour de deux axes horizontaux superposés distants de plusieurs mètres (2 à 12 mètres). La mise en rotation des axes fait défiler les balancelles devant une ouverture à hauteur ergonomique. L'arrêt des balancelles peut se faire très simplement par les opérateurs.



*Figure 6 : Exemples d'armoires rotatives [44]*

- Ces armoires permettent une bonne utilisation des volumes à condition d'avoir une hauteur de plafond importante. La compacité du stockage est excellente pour les petits objets. Les articles sensibles sont bien protégés et la préparation des commandes est ergonomique. L'un des inconvénients majeur réside dans la difficulté d'équilibrer les poids.
- Les silos à tiroirs sont mis en place pour palier aux problèmes de déséquilibre des armoires. Un dispositif mécanique va chercher automatiquement un tiroir qui peut être de grandes dimensions (3\*0,8 m) et le présente à la hauteur ergonomique du chargé de commande. Les tiroirs sont pourvus de cloisonnements qui permettent le

rangement d'un grand nombre de références. L'un des inconvénients de ce système reste la lenteur d'utilisation par rapport aux armoires.



*Figure 7 : Exemples de carrousels verticaux et horizontaux [44]*

- Les carrousels horizontaux sont des équipements construits autour d'axes verticaux. Une autre variante est celle des carrousels verticaux.
- Il existe aussi les convoyeurs, les robots, les gerbeurs à bras porteurs, les chariots élévateurs, les chariots à mat rétractable, les chariots à fourche tri directionnelle, les chariots combinés, les chariots omnidirectionnels (quadrirectionnels), les chariots autoguidés, ...

### 1.3 Organisation des entrepôts

Les décisions les plus importantes concernent la définition du processus de flux au niveau de la conception telle que l'utilisation ou pas d'une réserve séparée. La réponse à ce genre de question implique la prise en compte de différentes informations liées aux processus d'approvisionnement, aux modes de récupération des produits et aux schémas de décomposition des espaces (zone de récupération, point d'entrée et/ou de consolidation). De plus, certains processus nécessitent des politiques d'organisation spécifiques.

Au niveau du processus de réception, une politique d'affectation détermine l'allocation des camions aux différents quais.

Au niveau du processus de stockage, les articles sont transportés aux places qui leur sont allouées. Une politique permet de déterminer l'emplacement où chaque produit doit être entreposé. Cependant, une politique aléatoire laisse la décision à l'opérateur. Entre les deux, une décision basée sur les classes (ABC zoning) affecte des zones à des groupes spécifiques, en fonction de leur taux de rotation (*turnover*). D'autres politiques incluent le stockage corrélé, ou le groupement par famille, de manière à placer proches les produits souvent demandés en même temps. Si l'entrepôt a une réserve séparée, une politique lui est spécifiquement dédiée. Quels articles, et en quelle quantité, sont stockés dans le magasin ? Et comment les approvisionnements sont lancés ? Les réponses à ces questions sont données par des politiques de réapprovisionnement des magasins et des réserves.

Au niveau du processus de prélèvement des commandes, les ordres sont assignés à un ou plusieurs préleveurs (*orderpicker*). Différents problèmes de contrôle sont considérés à ce niveau. D'abord, l'espace total de prélèvements peut être divisé en zones, traitées par différents préleveurs. Il existe différentes politiques de sortie dont la séquentielle (*pick and*

*sort*) et la simultanée (*sort-while pick*). Alors, les ordres sont traités un par un ou en lot. Si une politique de prélèvement par lot est adoptée, cela implique que les produits prélevés sont regroupés. En plus de ce qui précède, une politique de routage définit la séquence de récupération et le chemin à parcourir entre les points de récupération. Finalement, une politique de point de repos peut décrire la position des équipements de prélèvement en inactivité. Si un processus de consolidation et de sortie est présent, les ordres sont assignés aux chemins de sortie par une politique d'affectation des lignes de tri (*sorter lane assignment*).

Au niveau du processus d'expédition, les ordres et les camions sont alloués aux quais par une politique d'affectation des quais. Finalement, l'allocation des tâches au personnel et aux équipements est effectuée par une politique d'affectation spécifique.

## 2 Réception

La réception d'un produit passe par :

- L'identification.
- Le contrôle.
  - Documentaire.
  - Qualité à travers :
    - Les techniques de prélèvements.
    - L'analyse des causes de rebuts.
    - La gestion des rebuts.
- Le choix d'une politique d'inventaire.
- Le calcul de valeur en stock.

La gestion de la production et des stocks nécessite la mise en place d'un système d'identification. Ceci permet de connaître les niveaux des stocks et leur valeur comptable.

### 2.1 Identification

L'identification est une phase fondamentale dans la gestion, car la caractérisation et la reconnaissance des produits et des services sont indispensables. Les systèmes d'identification permettent de caractériser des articles, des moyens de conditionnement, des lieux de stockage et même du personnel. Généralement, il est possible de connaître avec les systèmes automatisés : le numéro de bordereau de livraison, le numéro de la commande fournisseur, les références des articles livrés, le numéro de la palette livrée, les coordonnées du destinataire et de l'expéditeur, le nom et la quantité (en clair et en codé) du produit, etc. Il existe de nombreuses techniques d'identification dont deux seront développés dans la suite de l'ouvrage.

#### Système d'identification ou référencement

Ce type de système permet d'identifier et de situer tout produit dans l'entrepôt. Le principe est d'accoler à chaque produit un code numérique ou alphanumérique. La distinction entre produits se fait par l'apparition d'une nouvelle lettre ou d'un autre chiffre.

Ce type de code est construit de différentes façons. On retrouve :

- La numérotation en continu (numéro de série) de tous les produits de l'entreprise. Ceci passe par la prise en compte de l'antériorité ou de l'ancienneté des produits dans la numérotation. Cette façon simple différencie les produits mais ne donne pas beaucoup d'informations à la lecture.
- La décomposition du numéro en plusieurs parties où chacune d'elles véhicule une information précise : FE13T977 avec F (fabriqué en France), E (type de produit : écran), 1 (1 pour écran plat 0 sinon), 3 (l'un des niveaux de dimension), T (ville de fabrication : Troyes), 97 (année de fabrication) et 7 (numéro de lot).

Avec ces différents types de codifications, une communication claire s'établit entre les différents acteurs sauf, en général, pour le consommateur final pour qui c'est muet. Il existe des codes propres à certaines entreprises comme il existe des codes spécifiques à des secteurs ou à des branches de l'économie.

### **Système RFID**

Ce système appelé étiquettes électroniques RFID pour *Radio Frequency Identification* est assez utilisé. Ce sont des puces composées de microprocesseur, d'une mémoire et des émetteurs-récepteurs miniaturisés. La mémoire est d'une capacité de 8000 octets. Ces étiquettes sont lues, écrites et effacées par des systèmes spécifiques. Ce mode de référencement est régi par des normes comme l'ISO 15693.

### **Système de codes à barres**

Le code à barres est, comme le système d'identification RFID, un mode international utilisant des dispositifs automatiques. Ce système d'identification fait l'objet de normalisation (AFNOR, GALIA : Groupement pour l'Amélioration des Liaisons dans l'Industrie Automobile, ...). Une multitude de lecteurs de ces codes existe. Ils sont classés en plusieurs catégories en fonction des distances et de la portée de lecture. On trouve parmi ces lecteurs : les crayons, les douchettes, les pistolets et les lecteurs lasers fixes. En général, pour chaque code, on distingue 4 éléments :

- Le caractère d'identification : c'est le caractère en première position. Il sert à établir le sens des autres chiffres et la catégorie de produit.
- Le numéro d'identification du fabricant : il comprend les 6 chiffres suivants et est attribué aux fabricants par le conseil national des codes de produits (pour chaque pays).
- Le numéro de code article : il comprend 6 chiffres, et est attribué et contrôlé par le fabricant. Il doit être distinct pour chaque emballage de produit.
- Le numéro de contrôle : il existe sur certain produit et dans certains pays. Il permet au système optique de vérifier, en cours de lecture, si le code à barres a été interprété correctement.

La disposition et la largeur des barres et des espaces déterminent l'information numérique codée, lisible par le système optique. La lecture se fait en connexion directe avec le fichier central en question.

Il existe également plusieurs types de codage dont celui des Unités de Vente (UV) ou celui du codage des PCB (par combien : conditionnement en carton, en colis ou des palettes, avec quelques fois des entités et des produits différents).

### Codes des Unités de Vente (UV)

Ce type de code est réservé aux produits de grande consommation. Il utilise le protocole code EAN 13 (*Europe Article Number* et le chiffre 13 indique le nombre de caractères utilisés). Il est composé de 4 champs : la clé de contrôle, le pays du propriétaire du code, le fabricant ou le conditionneur (CNUF : Code National Unité Fabricant) et le dernier indique la référence de l'article (CIP : Code Interface Produit). Pour l'utilisation de ce type de code, l'entreprise intéressée se fait connaître auprès de l'organisme et obtient alors un numéro d'identification (voir Figure 9).

### Codes des PCB

Ce codage est destiné aux emballages collectifs. Ce type de conditionnement consiste à mélanger ensemble plusieurs produits dans un emballage (carton par exemple). Ce conditionnement est dit PCB (par combien donnant lieu au SPCB, sous par combien) car la notion centrale n'est pas le produit mais plutôt l'emballage. Il utilise le protocole ITF 14 qui comprend 14 chiffres placés entre un séparateur de début et de fin. Dans chaque binôme, le premier chiffre est symbolisé par 5 barres et le deuxième par 5 espaces. Chaque chiffre est composé de 5 éléments dont deux sont larges. ITF 14 est construit à partir de EAN 13 auquel est ajouté un caractère supplémentaire indiquant le conditionnement.

### Codes des colis et palettes





<b>Expéditeur</b> DUPONT & Cie 1A ROCHELLE Date de livraison : 31/12/1997	<b>Destinataire</b> Site SUPEROUEST 50, rue Nationale 59800 LILLE FRANCE	<b>59</b>
<b>Consignement N° (N° d'expédition)</b> 01123450010212345678 <b>Carrier (transporteur)</b> Transport DUVAL	<b>Ship to Post (livrer à)</b> 59800 <b>COLIS (UE) N°</b> 2/8	
 64205980014011301123456010212345678		
 Ship to (livrer à) 3021231234500		
<b>Désignation produit :</b> XXX <b>sccc :</b> 311234512345678917 <b>EAN N° :</b> 0311231234569 <b>Use by (D.L.C.) ddmmyy :</b> 31.12.99		
 0110312345123456912991231		
 001131234512345678917		

Figure 8 : Code à barres EAN UCC 128 [35]

Ce code est réservé aux unités d'expéditions. Il utilise le code EAN UCC 128 (European Article Number Uniform Code Concil) ([www.ean-ucc.org](http://www.ean-ucc.org)). Le symbole 128 exprime le fait qu'il est apte à transcrire les 128 caractères du code ASCII (un grand standard utilisé pour les échanges d'informations entre les calculateurs ou les ensembles automatisés). L'étiquette du code EAN utilise le code UCC 128 avec quelques spécificités telles que l'utilisation de l'*Application Identifier* (AI) dédié à la logistique (AI : deux caractères ou plus qui indiquent la signification et le format d'un élément d'informations dans les signes conventionnelles EAN UCC 128). Ce type de code peut également

représenter le transporteur, le N° d'expédition, le code de destination, le code client, le SSCC (Serial Shipping Container Code), ... (voir l'exemple sur la Figure 8).

DESTINATAIRE S.A. PEUGEOT	DEPT. QUAI, PORTE 25 - 03' 09623 12
	ADRESSE EXPÉDITEUR LEBLANC ET NOIR, NANTERRE
	POIDS BRUT 220 KG.
N° PRODUIT (19) <b>7700954832AB</b>	
QUANTITÉ (20) <b>1250</b>	PRODUIT ETIQUETTE MODÈLE
FOURNISSEUR (21) 055320	REF. FOURNISSEUR 2345123A34
N° PERMETTEUR (22) 0000000000	
LEBLANC ET NOIR, S.A.	LAOF

Figure 9 : Code à barres à 4 champs [35]

### Critiques et commentaires

Critères de comparaison	Codes à barres (Cab)	Étiquettes électroniques (EE)	Évaluation
Volume d'informations	<=100 caractères	>8000 caractères	EE
Évolution de l'information	NON	OUI (certain cas)	EE
Écriture au vol	OUI (délicate et lente)	OUI (Facile et rapide)	EE
Distance d'écriture	Au contact (pose)	Jusqu'à 1 m	EE
Distance de lecture	De 0,1 à 1 m	De 0,1 à 1 m	=
Contrainte de lecture	A vue directe	Peut être occultée	EE
Résistance en milieu agressif	Médiocre	Excellente	EE
Contrainte vis-à-vis de métaux	Indifférent	Sensible	CaB
Durabilité de l'indentification	Médiocre	Excellente	EE
Exploitation multi-site	OUI (code normalisé)	NON (en cours d'élaboration)	CaB
Coût de l'étiquette	0 à 500 €	10 à 50 €	CaB
Prix des lecteurs	300 à 10 000 €	Environ 600 €	EE
Prix des postes d'écriture	15 000 à 50 000 €	Avec le lecteur	EE

Tableau 1 : Comparatifs entre les deux systèmes d'identification [35]

La comparaison entre les principales technologies présentées ci-dessus, codes à barres et étiquettes électroniques, est loin d'être aisée. Les spécialistes trouvent que les



deux systèmes sont complémentaires car les faiblesses de l'un représentent les forces de l'autre. Le Tableau 1 donne un comparatif entre les deux systèmes d'identification. Des travaux de normalisation existent pour le choix du type de codes à barres (NF 63400) alors que pour les étiquettes électroniques, aucune norme n'existe à ce jour. Il est évident que les systèmes automatisés d'identification présentent quelques inconvénients tels que la dépendance technologique ou la possibilité d'erreur machine. Néanmoins, l'automatisation reste nettement plus productive. Dans les pays comme les USA et le Canada, ils utilisent le système UPC (*Universal Product Code*).

## 2.2 Contrôle

Cette étape est fondamentale à plus d'un titre car elle permet de comparer les produits réellement reçus et les produits commandés, en terme de référence, de caractéristiques, de quantité et de qualité.

La qualité traduit les aspects qu'une entreprise exige compte tenu de ses besoins, de la facilité de vérification, de la crédibilité et des garanties de la source. Il existe une multitude de méthodes pour réaliser ces contrôles. Chaque méthode prend comme point de départ une théorie ou un principe de bon sens.

En général les éléments vérifiés sont :

- Les dommages causés par le transport.
- La présence de tous les éléments du produit.
- Les dimensions des marchandises (au moins approximativement).
- Le matériau.
- Le fonctionnement.
- La performance.

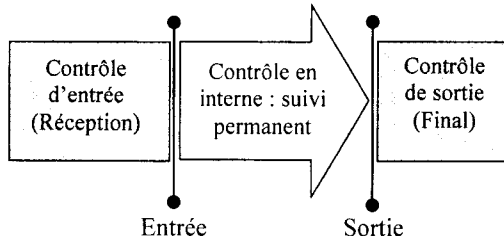
La qualité et ses spécifications indiquent la nature et le niveau de l'inspection. L'inspection est plus ou moins importante en fonction de la renommée, de la connaissance du produit et de la marque.

Le contrôle est la mise en place d'une politique de vérification permettant d'accepter ou de refuser un lot de produits. Un produit est satisfaisant ou acceptable par rapport à une caractéristique donnée lorsqu'elle demeure à l'intérieur d'une marge de tolérance.

La politique la plus sûre, malgré quelques erreurs, est de contrôler les produits à 100%. Ceci n'est pas toujours réalisable car le contrôle peut être destructif, difficilement réalisable, avec des coûts prohibitifs et avec des incertitudes sur les mesures.

Une catégorie de contrôle est assez intéressante pour l'entreposage spécialement pour ses phases de réception ou d'expédition. Il s'agit du contrôle d'entrée/sortie (Figure 10).

Le principe de ce contrôle considère un lot de produits, en arrivée ou en partance, sur lequel il faut statuer. C'est à dire décider de son acceptation ou de son refus. Ceci génère une réponse franche (directe) pour prendre les décisions correspondantes.



**Figure 10 :** *Contrôle d'entrée/Sortie*

Ce type de contrôle est de la famille des contrôles par prélèvement. Cette méthode consiste à sélectionner, au hasard, des pièces à partir d'un lot et, en se basant sur les résultats de l'échantillonnage, d'accepter ou de refuser la totalité du lot. Trois étapes sont nécessaires :

- L'identification des lots à contrôler (lot reçu ou à expédier).
- L'élaboration du protocole, ou de la politique de prélèvement afin d'assurer les conditions optimum de prise de décisions.
- La prise de décision et la finalisation de la démarche.

Ce type de contrôle s'applique à des lots de produits de toute nature (pièces, ensemble de pièces, matières premières, produits semi-finis, produits finis). Il s'applique à des lots homogènes, c'est-à-dire constitué de produits identiques (exemple : pièces fabriquées en grande série). On pratique ce type de contrôle :

- Lors d'une livraison de la part d'un fournisseur.
- Avant l'entrée des produits en magasin.
- Avant de livrer des produits à un client.
- Entre deux opérations de traitement, réemballage, stockage, production.

Ces contrôles satisfont deux objectifs. D'une part, ils permettent une prise de décision rationnelle et d'autre part, ils permettent de classer les fournisseurs en fonction de la qualité de leur production. Pour réaliser ces contrôles, il est nécessaire de mettre en place un plan de contrôle encore appelé politique de contrôle.

Un plan de contrôle est un protocole de prélèvement spécifique dont l'objectif premier est de fournir des règles de décision permettant l'acceptation ou le rejet d'un lot. Il contient une liste de points à satisfaire :

- Le nombre de prélèvements à réaliser noté :  $K$ .
- La quantité de pièces à prélever à chaque fois, appelée aussi taille de prélèvement :  $n_i$ , avec  $i=1 \dots K$ .
- Le schéma de décision pour chaque prélèvement. Donner le couple d'acceptation et de refus, le prélèvement  $i$  à la limite d'acceptation  $A_i$  et de refus  $R_i$ . Alors, pour tout  $i = 1 \dots K$ , il existe le couple  $(A_i, B_i)$ .
- La démarche exacte des prélèvements : le mode opérationnel, la fréquence des prélèvements, les règles de travail, etc.

En fonction des paramètres définis ci-dessus, il est facile de voir qu'il existe une relation entre  $K$  et  $n_i$ , et entre ces paramètres et la taille totale, notée  $N$ , et des produits concernés par le test.  $N$  peut représenter la quantité de produits réceptionnés ou la quantité de produits à expédier. Partant de cette codification et des valeurs possibles des paramètres, il existe entre autres les plans de contrôles suivants :

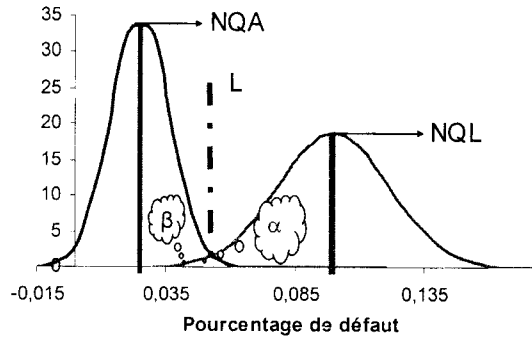
- Le plan simple.
- Le plan double.
- Le plan multiple.
- Le plan progressif.

Ces quatre catégories représentent la majorité des plans utilisés et normalisés. Ce travail a été effectué à l'origine par l'armée US avec sa norme MIL STD. En adoptant l'une des stratégies de contrôles citées ci-dessus, la question de savoir quelles sont les valeurs appropriées à chaque paramètre est capitale. En effet, l'efficacité n'est pas du tout garantie avec une stratégie identique et un paramétrage quelconque.

Pour arriver à satisfaire cette dernière exigence, la première étape va consister à énumérer tous les facteurs intervenant dans le processus d'échange du produit et plus spécifiquement à en extraire les plus influents. La pratique, les spécialistes et l'histoire ont mis en évidence, au même titre qu'un plan de contrôle, un plan d'échange appelé accord partenarial (AP) (Figure 11). Cet accord est le recueil d'informations explicitant les caractéristiques des produits en cours de contrôle. Les niveaux de qualité sont des éléments contractuels que les deux parties (fournisseur et client) fixent dans les spécifications des contrôles de réception des produits (clauses techniques des contrats de fournitures : AP).

Cet accord partenarial est un vecteur à quatre paramètres ( $NQA$ ,  $NQL$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) avec :

- Le Niveau de Qualité Acceptable, noté  $NQA$  ( $AQL$  : *Acceptable Quality Level*), représente le pourcentage toléré de pièces défectueuses. Ce niveau est entendu entre les protagonistes de l'échange du produit. Un lot avec un niveau  $NQA$  de qualité a une forte probabilité d'acceptation car il rentre dans le cadre du protocole d'échange.
- Le Niveau de Qualité Limite, noté  $NQL$  ( $LPTD$  : *Lot Tolerance Per cent Defective*), représente le pourcentage limite toléré de pièces défectueuses
- Le risque du producteur (fournisseur), noté  $\alpha$ , est la probabilité de rejet d'un lot de qualité acceptable (de niveau  $NQA$ ).
- Le risque du consommateur (client), noté  $\beta$ , est la probabilité d'accepter un lot de qualité inacceptable (de niveau  $NQL$  et plus).



**Figure 11 :** Représentation graphique de l'accord partenarial

Les différents plans de contrôle font l'objet d'une normalisation. Ces normes sont consultables sur le site de l'AFNOR (<http://www.afnor.fr/portail.asp>).

### Plan simple (échantillonnage simple)

Il est caractérisé essentiellement par les paramètres suivants :

- un seul prélèvement,  $K=1$ ,
- $n$  : la taille de l'échantillon à prélever,
- un couple de décision  $(A, R)$  avec comme hypothèse  $R=A+1$  et  $A$  la limite d'acceptation et  $R$  la limite de rejet.

Le contrôle (Figure 12) consiste à prélever un lot  $n$ , parmi les  $N$  pièces à contrôler. à comptabiliser le nombre de pièces défectueuses et ensuite en fonction des limites  $(A, R)$  d'accepter ou de refuser le lot. Il est important de mettre en évidence que tout produit est jugé globalement, sans pour autant comptabiliser tous les défauts. On ne prend donc pas en compte les défauts particuliers, mais la pièce, en la jugeant défectueuse ou pas.

Il est possible de prendre la décision de rejet avant d'avoir tout contrôlé c'est-à-dire dès que l'on atteint  $NdF$  (nombre de pièces défectueuses) =  $R$ . Sinon, on teste toutes les  $n$  pièces et on accepte dans le cas où  $NdF \leq A$ .

La progression aléatoire du nombre de défectueux est donnée suivant deux axes sur la Figure 13. Si l'individu est conforme, on trace un segment unitaire parallèle à  $Ox$  (abscisse). S'il est défectueux, on trace un segment oblique correspondant à une progression d'une unité suivant  $Ox$  et d'une unité suivant  $Oy$  (ordonnée). Si l'on assiste à une progression de type horizontal, le lot a de forte chance d'être accepté. Dans le cas où la progression est de type vertical, le lot a de forte chance d'être rejeté. Si le chemin touche la zone de rejet, on refuse le lot. Dans le cas contraire, on l'accepte.

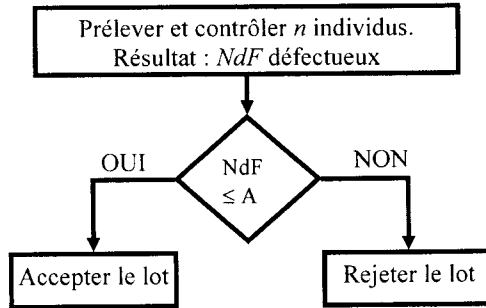


Figure 12 : Plan simple

Le raisonnement développé pour ce type de contrôle est une base incontournable pour l'étude des autres types de contrôle. La première information fondamentale est d'élaborer les lois de comportement régissant le phénomène en étude. Dans le cas du plan simple, l'étude concerne le nombre de défauts (ou plus exactement le nombre de pièces défectueuses) dans un lot de taille donnée. Initialement, ce lot est de taille  $N$ . Dans le cas du contrôle simple, ce lot est étudié au travers du lot prélevé de taille  $n$ .

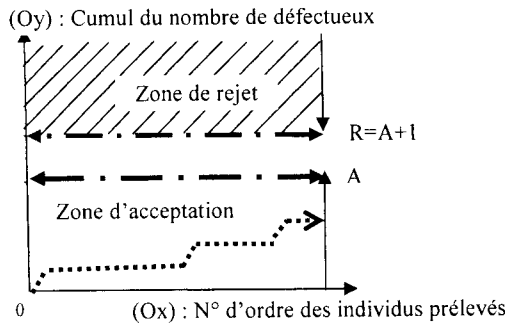


Figure 13 : Cheminement aléatoire du contrôle

En partant d'un raisonnement en test d'hypothèse, on peut établir que la variable  $NdF$  suit une loi Normal :

$$NdF \rightarrow N\left(NQA, \sqrt{\frac{NQA * (1 - NQA)}{n}}\right)$$

On admet que  $NdF$  est centré sur le paramètre  $NQA$  (la variable est également appelée qualité effective  $Qef$ ). Cette hypothèse n'est pas fantaisiste mais découle directement des conditions de l'accord partenarial. Cette variable,  $NdF$ , peut, dans des cas ultimes, se trouver centrée non pas sur  $NQA$  mais sur  $NQL$  alors :

$$NdF \rightarrow N\left(NQL, \sqrt{\frac{NQL * (1 - NQL)}{n}}\right)$$

On note les deux écarts types :

$$\sigma_{NQA} = \sqrt{\frac{NQA * (1 - NQA)}{n}} \text{ et } \sigma_{NQL} = \sqrt{\frac{NQL * (1 - NQL)}{n}}$$

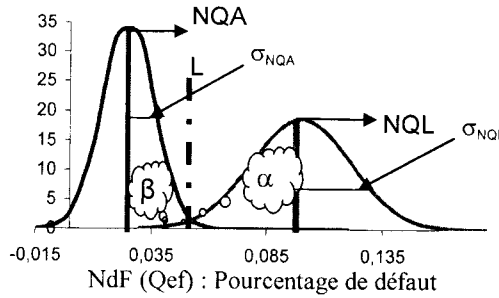


Figure 14 : Loi de variation de NdF

Selon la Figure 14, on peut définir la limite de contrôle simple  $L$ . Cette limite est l'expression de l'intersection entre un  $NdF$  basé sur la qualité énoncée,  $NQA$ , avec un risque d'erreur  $\alpha$  et un  $NdF$  centré sur  $NQL$  avec un risque  $\beta$ . Il faut lire par  $U_{1-\alpha}$  et  $U_\beta$  l'expression des points avec une variable centrée réduite,  $N(0,1)$ , pour les probabilités respectivement  $(1-\alpha)$  et  $\beta$ . On obtient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} L = NQA + |U_{1-\alpha}| * \sqrt{\frac{NQA * (1 - NQA)}{n}} \\ \text{et} \\ L = NQL - |U_\beta| * \sqrt{\frac{NQL * (1 - NQL)}{n}} \end{array} \right.$$

Des expressions précédentes, on déduit que :

$$L = NQA + |U_{1-\alpha}| * \sqrt{\frac{NQA * (1 - NQA)}{n}} = NQL - |U_\beta| * \sqrt{\frac{NQL * (1 - NQL)}{n}}$$

Alors, tous les paramètres pour la mise en place du plan de contrôle simple sont :

$$n = \left( \frac{|U_{1-\alpha}| * \sqrt{\frac{NQA * (1 - NQA)}{n}} + |U_\beta| * \sqrt{\frac{NQL * (1 - NQL)}{n}}}{NQL - NQA} \right)^2$$

$A = Ent[n \times L]$  : partie entière de  $L$

$R = A + 1$

### Courbe d'efficacité

La question qui se pose est de savoir quel est l'impact de ce plan simple de contrôle sur la qualité du lot vérifié ? Quelle est également la qualité du lot à la suite de ce contrôle ? Afin de répondre à ces questions et bien d'autres, le besoin impose de mettre en place un formalisme d'analyse de performance des plans de contrôles. Dès que l'analyse de la performance est abordée, elle devient généralement indissociable des notions de flux, de leur quantification, de leurs cheminements, et surtout de leurs indicateurs de performances. Hormis le contexte industriel spécifique, des formulations mathématiques sont élaborées afin de valider des systèmes d'évaluation.

Vérifier l'efficacité du plan de contrôle revient à établir la pertinence des décisions prises par rapport à des informations effectives ou avérées. Ceci pose une problématique d'identification des acteurs de décision, de leurs paramètres, et de la caractérisation de la situation. En d'autres termes, la relation entre les paramètres du plan et la valeur effective de la qualité des lots contrôlés est étudiée. Un plan simple est défini par le vecteur  $V(1, n, A, R)$  représentant un prélèvement de taille  $n$ , de seuil d'acceptation  $A$  et de refus  $R$  ( $R=A+1$ ). La qualité du lot est identifiée par la qualité effective  $Q_{ef}$  (ou  $NdF$  le nombre de pièces défectueuses) sachant que normalement le lot a un  $Q_{ef}=NQA$  et au pire  $Q_{ef}=NQL$ . Ces dernières informations sont importantes car elles rappellent le fait que les paramètres du plan sont basés sur l'accord partenarial.

Pour élucider cette efficacité, l'idée est d'étudier la relation entre  $V$  et  $Q_{ef}$ . L'une des interprétations du vecteur  $V$  est la probabilité d'acceptation  $P_a$  associé à ce plan de contrôle. Pour rappel, si on considère que toutes les conditions sont respectées, pour  $Q_{ef}=NQA$ , alors  $P_a=1-\alpha$ . Il reste par la suite à étudier la fonction  $FC_e$  reliant  $P_a$  et  $Q_{ef}$ :  $P_a=FC_e(Q_{ef})$ .

Cette fonction  $FC_e$  se traduit par l'étude la fonction de répartition de la variable  $NdF$  dont les paramètres changent en fonction de  $Q_{ef}$  mais dans la limite d'étude est donnée par  $V$ . Les paramètres inchangés sont le vecteur  $V(1, n, A, R)$ .

Alors :  $P_a=P(NdF \leq A)$  sachant que  $NdF \rightarrow N(n * Q_{ef}, \sqrt{n * Q_{ef} * (1 - Q_{ef})})$

Pour  $Q_{ef}=NQA$  alors  $NdF \rightarrow N(n * NQA, \sqrt{n * NQA * (1 - NQA)})$  et  $P_a=P(NdF \leq A) = 1-\alpha$ . Cette fonction va décroître plus ou moins vite en fonction des paramètres du vecteur  $V$ . Une représentation de l'évolution de cette fonction en faisant varier  $Q_{ef}$  donne une idée sur cette évolution. Elle appelée *courbe d'efficacité*.

**Exemple :** Si l'on effectue un essai correspondant à un contrôle de réception dont les caractéristiques sont : taille de prélèvement  $n=80$  et acceptation pour 5 non conformes au plus donc  $(A, R) = (5, 6)$ . Le vecteur  $V$  est alors :  $(1, 80, 5, 6)$ .

Sachant que les paramètres du AP sont :  $NQA=2,5\%$ ,  $NQL=12\%$ ,  $\alpha=3\%$  et  $\beta=7\%$ . La politique de contrôle pratiquée n'est pas uniquement  $V$  mais aussi  $V1(1, 200, 20, 21)$  et  $V2(1, 50, 10, 11)$ .

Les différentes valeurs prises par  $FC_e$  sont données dans le Tableau 2 et les courbes d'efficacités sont représentées sur la Figure 15.

A partir de la première analyse des différents plans de contrôle et à travers leurs représentations graphiques, on constate que :

- Le plan  $V$  est assez normalisé. Il passe d'une probabilité d'acceptation de 98% pour  $Q_{ef}=NQA=2,5\%$  à 62% pour  $Q_{ef}=5,5\%$ .
- Pour le plan  $V1$  nettement moins stricte que  $V$  avec quasiment la même probabilité d'acceptation pour des valeurs de  $Q_{ef} \leq 5,5\%$ .
- Le plan  $V2$  est complètement relaxé et permissif par rapport aux plans  $V$  et  $V1$  avec la même probabilité d'acceptation pour des valeurs de  $Q_{ef} \leq 8,5\%$ .
- Le plan  $V2$  est plus intéressant pour le fournisseur car il ne lui fait prendre aucun risque de refus et également sans aucune détection de décalage entre l'AP et la valeur reçue.

- La détection est plus visible avec le plan  $V$  car le risque fournisseur  $\alpha$  passe de  $\pm 2\%$  pour un lot respectant l'AP ( $NQA = 2,5\%$ ) à un  $\alpha$  de  $\pm 38\%$  si simplement la qualité reçue double à  $NQA = 5,5\%$ .

<i>Qef</i>	<i>Fce (1, 80, 5, 6)</i>	<i>Fce (1, 200, 20, 21)</i>	<i>Fce (1, 50, 10, 11)</i>
0,50%	1,00	1,00	1,00
2,50%	0,98	1,00	1,00
3,50%	0,91	1,00	1,00
4,50%	0,77	1,00	1,00
5,50%	0,62	1,00	1,00
6,50%	0,46	0,98	1,00
7,50%	0,34	0,91	1,00
8,50%	0,24	0,78	1,00
9,50%	0,16	0,60	0,99
10,50%	0,11	0,41	0,99
11,50%	0,07	0,25	0,97
12,50%	0,05	0,14	0,95
13,50%	0,03	0,07	0,91
14,50%	0,02	0,04	0,87
15,50%	0,01	0,02	0,81
16,50%	0,01	0,01	0,75
17,50%	0,00	0,00	0,68
18,50%	0,002	0,001	0,608
19,50%	0,001	0,000	0,536
20,50%	0,001	0	0,465
21,50%	0,0004	0	0,3981
22,50%	0,0003	0	0,3360
23,50%	0,0001	0	0,2797
24,50%	0,0001	0	0,2297
25,50%	0	0	0,1861
26,50%	0	0	0,1488
27,50%	0	0	0,1175
28,50%	0	0	0,0915
29,50%	0	0	0,0704
30,50%	0	0	0,0534
31,50%	0	0	0,0400
32,50%	0	0	0,0296
33,50%	0	0	0,0216
34,50%	0	0	0,0155
35,50%	0	0	0,0110
36,50%	0	0	0,0077

**Tableau 2 : Valeurs des Fce**

L'analyse de l'efficacité d'un plan et sa représentation reflètent la sensibilité et la robustesse des décisions prises. Cette analyse est importante car les paramètres de contrôles sont établis à partir des données fournisseur et de l'accord partenarial. La mise en place d'une politique de contrôle tend à être la plus efficace possible et à atteindre le plan représenté sur la Figure 16.



En plus de cette analyse d'efficacité, une évaluation de leurs performances après contrôle est très intéressante. En effet, la qualité vraiment consommée et perçue est celle après contrôle. Il est toujours important de vérifier la conformité des produits existants par rapport à ce qui a été prévu.

La Qualité Moyenne après Contrôle, noté  $QMC$ , sous certaines conditions et avec une certaine approximation est donnée par la relation :  $QMC = P_a \times NQA$ . Ce résultat reflète l'amélioration de la qualité en passant de  $NQA$  à  $QMC$  via le  $P_a$  ( $P_a < 1$ ).

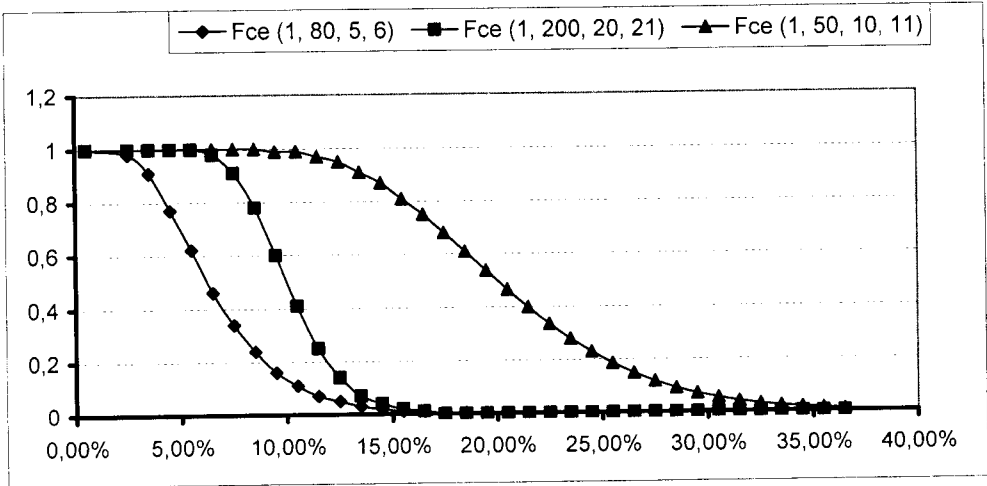


Figure 15 : Courbe d'efficacité pour  $V(1,80,5,6)$ ,  $V1(1,200,20,21)$  et  $V2(1,50,10,11)$

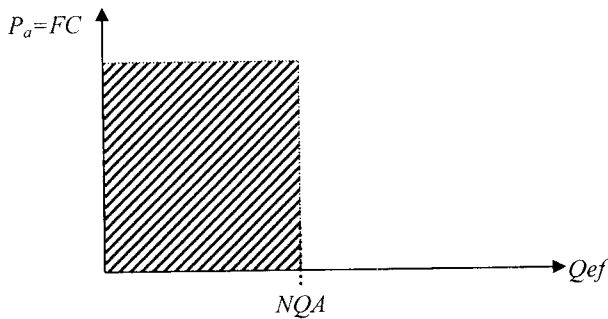
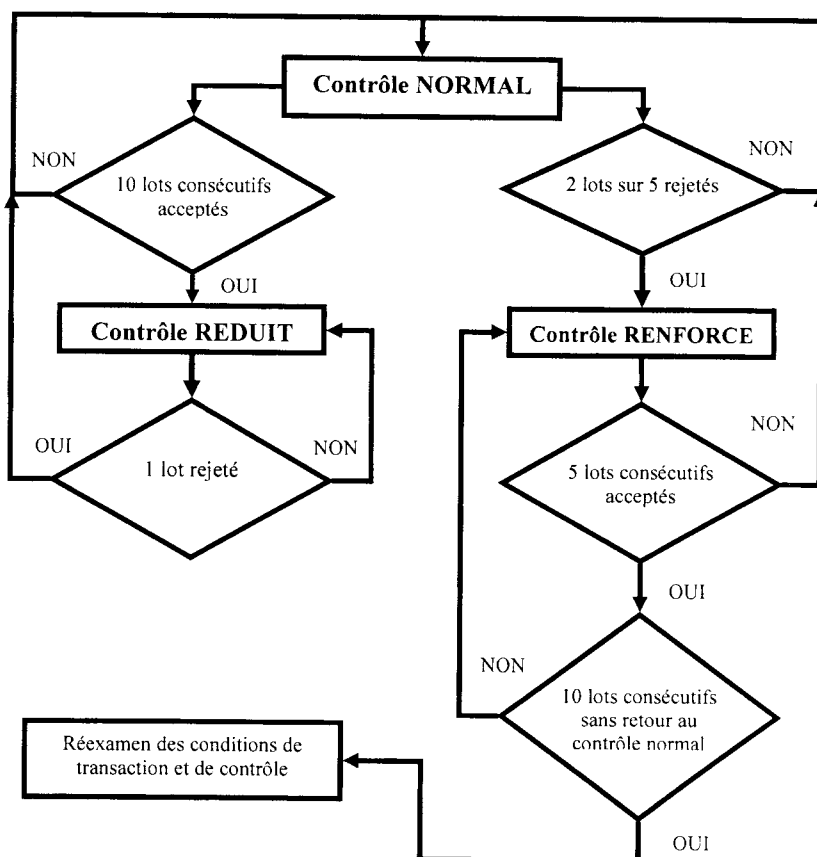


Figure 16 : Courbe d'efficacité parfaite

**Variantes de plan simple : Réduit et Renforcé**

Ces deux types de contrôle sont très proches de la formulation de base du contrôle simple, appelé alors normal, car le principe est toujours le même (Figure 12). Ces variantes apparaissent uniquement dans des objectifs bien précis que sont : l'aspect efficacité et optimisation des coûts pour le contrôle simple réduit et l'aspect stricte et plus robuste du contrôle simple renforcé.



*Figure 17 : Plan simple et ses variantes*

Chacune des variantes traduit une nouvelle orientation et la mise en place d'une stratégie du contrôleur vis-à-vis du fournisseur (interne ou externe), alors :

- Si le produit est dans une configuration contractuelle (accord partenarial respecté) alors le contrôle normal simple est appliqué.
- Si le produit reçu montre des signes de régularité et de qualité constante (10 lots réceptionnés ou expédiés consécutivement acceptés) alors il y a lieu de revoir la démarche en adoptant un plan simple réduit.
- Dans le cas où le produit montre nettement (40% de refus ou 2 lots sur 5 refusés) une détérioration du niveau de qualité alors il faut être plus prudent et plus exigeant en appliquant un plan simple renforcé.

Ce schéma de transition et des cas d'utilisation des trois variantes est donné dans la Figure 17 (selon la norme AFNOR et [25], [13], [28]).

Le retour d'un contrôle renforcé vers un contrôle normal respecte la règle des 10 lots consécutifs acceptés car le contrôle simple normal représente dans ce cas un contrôle réduit.

### Contrôle réduit

D'une façon générale, le contrôle réduit s'impose lorsque 10 lots consécutifs reçus d'un même fournisseur sont acceptés. Alors, un nouvel  $AP$ , noté  $AP^{RD}$  est pris en compte ainsi que de nouvelles valeurs pour les paramètres. Le Tableau 3 indique les relations entre les paramètres du plan simple normal et le plan simple réduit (RD).

Modifié	$\alpha^{RD} = 5\alpha$
	$n^{RD} = 0,4 \cdot n$
	$(A, R)^{RD} \neq (A, R)$
Non Modifié	$NQA^{RD} = NQA$
	$NQL^{RD} = NQL$
	$\beta^{RD} = \beta$

**Tableau 3 :** Plan simple normal et plan simple réduit

$NQA$ ,  $NQL$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $n$  sont les paramètres du contrôle simple normal.

### Contrôle renforcé

Il s'impose lorsque 2 lots sur 5 reçus successivement d'un même fournisseur sont refusés. Alors, une renégociation de l'accord partenarial entre le client et le fournisseur est réalisé ramenant les paramètres à ce qui suit. Le nouvel accord peut être noté  $AP^{RF}$ . Le Tableau 4 indique les valeurs des paramètres en comparant le plan simple normal et le plan simple renforcé (RF).

Modifié	$NQA^{RF} = 0,65 * x * NQA$
	$(A, R)^{RF} \neq (A, R)$
Non Modifié	$\alpha^{RF} = \alpha$
	$NQL^{RF} = NQL$
	$\beta^{RF} = \beta$
	$n^{RF} = n$

**Tableau 4 :** Plan simple normal et plan simple renforcé

Comme précédemment,  $NQA$ ,  $NQL$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $n$  sont les paramètres du contrôle simple normal.

### Contrôle progressif

Le contrôle progressif est l'expression limite des différents plans de contrôle et plus particulièrement les plans de contrôle multiples. Ce type de contrôle part d'une hypothèse fondamentale que plusieurs prélèvements sont nécessaires avec comme point commun le traitement d'une pièce à la fois. Le schéma de déroulement est le suivant :

1. Prélèvement d'une pièce à la fois  $n_1 = \dots = n_h = 1$  (avec  $h$  prélèvements et  $n$  la taille de tous les prélèvements en cours).
2. Calculer le nombre de défauts, défectueux cumulés :  $NdF_c$ . Pour chaque  $n$ , décider en connaissant :
  - Le niveau (seuil) de rejet  $B_n : NdF_c \geq B_n$
  - Le niveau (seuil) d'acceptation  $A_n : NdF_c \leq A_n$ .

- La plage d'incertitude entre  $A_n$  et  $B_n$  :  $A_n < NdF_c < B_n$ .

3. Arrêter dans le pire des cas pour un nombre limite de pièces totales prélevées :  $N_k$ .

La Figure 18, donne une représentation d'un plan progressif et son schéma de décision. Pour un échantillon de taille  $n$  :

- Si on obtient un nombre de défauts cumulés supérieur à  $B_n$ , on rejette le lot (dès qu'on franchit la droite ( $B_n$ )).
- Si on obtient un nombre de défauts cumulés inférieur à  $A_n$  on accepte le lot (dès qu'on franchit la droite ( $A_n$ )).
- Sinon on continue le prélèvement jusqu'à une certaine limite ( $N_k$ ).
- Si on ne touche aucune frontière et que l'on a atteint le nombre de prélèvement limite c'est la première bissectrice qui permet de trancher (au dessus, on rejette ; en dessous, on accepte).

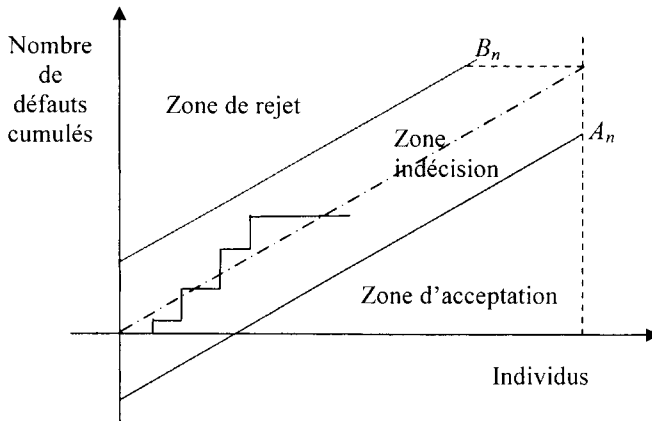


Figure 18 : Contrôle progressif

**Principe mathématique de construction du contrôle progressif**

D'un point de vue mathématique, le contrôle progressif est basé sur l'étude de la véracité d'un système d'hypothèses exposé dans les travaux de Cave [8].

Ce système est alors composé de deux hypothèses l'une,  $H_0$ , affirme que la proportion de pièces défectueuses,  $p$ , du lot en étude est inférieure ou égale à une valeur donnée  $p_0$ . L'autre hypothèse,  $H_1$ , affirme que la proportion en question est supérieure à une autre valeur  $p_1$ . Ceci est représenté ci-dessous :

$$\begin{cases} H_0 : p \leq p_0 \\ H_1 : p \geq p_1 \end{cases}$$

Il faut noter par rapport aux notions déjà rencontrées, les correspondances sont :

- $p = \%NdF$  : proportion de pièces défectueuses.
- $p_0 = NQA$ .
- $p_1 = NQL$ .

Sachant que le contrôle est une série de prélèvements successifs (avec un niveau de défauts  $x_i$ ), on a alors :

$$\begin{aligned}
 & x_1 \\
 & x_1 + x_2 \\
 & x_1 + x_2 + x_3 \\
 & x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n
 \end{aligned}$$

$p_0^n$  : Probabilité d'obtenir les  $n$  valeurs pour  $p_0 = NQA$

$p_1^n$  : Probabilité d'obtenir les  $n$  valeurs pour  $p_1 = NQL$

Soit  $R_n$  tel que :  $R_n = \frac{p_n^1}{p_n^0}$

$$\begin{cases}
 \text{Si } R_n \leq \frac{\beta}{1-\alpha} \Rightarrow H_0 \text{ acceptée} \\
 \text{Si } R_n \geq \frac{1-\beta}{\alpha} \Rightarrow H_0 \text{ refusée} \\
 \text{Si } \frac{\beta}{1-\alpha} < R_n < \frac{1-\beta}{\alpha} \Rightarrow \text{continuer le tirage}
 \end{cases}$$

D'après les formules précédentes et la construction d'une loi de prélèvement :

$$R_n = \frac{p_n^1}{p_n^0} = \frac{p_1^{(x_n)} * (1-p_1)^{(n-x_n)} * C_n^{x_n}}{p_0^{(x_n)} * (1-p_0)^{(n-x_n)} * C_n^{x_n}}$$

sachant que :

$X_n$  : nombre de défauts ou de défectueux (Ndf),

$n$  : nombre de pièces prélevées,

alors :

$$\ln(R_n) = x_n * \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) + (n-x_n) * \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right) \quad (1.1)$$

avec  $\ln(R_n)$  : logarithme népérien de  $R_n$ .

### Calcul de $A_n$

$$R_n \leq \frac{\beta}{1-\alpha} \Rightarrow \ln(R_n) \leq \ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)$$

De l'équation (1.1), on obtient :

$$\begin{aligned}
 & x_n * \left[ \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right) \right] + n * \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right) \leq \ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) \\
 & x_n \leq \frac{\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) - n * \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)}{\left[ \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right) \right]}
 \end{aligned}$$

Il s'ensuit que :

$$x_n \leq \frac{-\ln\left(\frac{1-\alpha}{\beta}\right)}{\left[\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) + \ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)\right]} + n^* \frac{\ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)}{\left[\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) + \ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)\right]}$$

Ainsi,  $A_n$  est donné par la relation suivante :

$$A_n = -g_0 + n^*k \text{ et } X_n \leq A_n = -g_0 + n^*k$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} g_0 = \frac{\ln\left(\frac{1-\alpha}{\beta}\right)}{\left[\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) + \ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)\right]} \\ k = \frac{\ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)}{\left[\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) + \ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)\right]} \end{array} \right.$$

### Calcul de $B_n$

$$R_n \geq \frac{1-\beta}{\alpha} \Rightarrow \ln(R_n) \geq \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)$$

alors :

$$x_n \geq \frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\left[\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)\right]} + n^* \frac{\ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)}{\left[\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)\right]}$$

Ainsi,  $(B_n)$  est donné par la relation suivante :

$$A_n = g_1 + n^*k \text{ et } X_n \geq B_n = g_1 + n^*k$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} g_1 = \frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\left[\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)\right]} \\ k = \frac{\ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)}{\left[\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)\right]} \end{array} \right.$$

Pour plus d'informations sur les différents modes de contrôle et plus spécifiquement les contrôles en réception, de nombreux documents existent. A la fin de ce document, des programmes informatiques écrits en C (Borland) et en Visual-Basic sous Excel illustrent ce type de contrôle.

### 2.3 Inventaire et dénombrement

Ce terme est synonyme de décompte et d'enregistrement des stocks. Cette technique permet de connaître le volume des stocks. L'inventaire regroupe toutes les opérations permettant de recenser et d'évaluer la valeur en fin d'exercice, par exemple, de tous les éléments du patrimoine de l'entreprise. Il existe deux types d'inventaire que sont l'inventaire périodique et l'inventaire permanent.

L'instruction quotidienne d'un fichier des stocks est une opération lourde en terme de coût et de temps. Reste que l'utilisation de l'informatique et les différents outils et logiciels de gestion de production (ERP) facilite grandement ce type d'inventaire. Les inventaires périodiques ne sont pas complètement ignorés dans le cas d'une mise en place d'un inventaire permanent. Ce type de vérification périodique permet de compléter les informations déjà existantes telles que : le recensement des produits détruits ou volés, la concordance entre les valeurs des stocks enregistrées et les valeurs réelles.

La période d'inventaire est une étape d'activité intense et qui nécessite une organisation importante. En général, les inventaires s'effectuent durant les périodes d'arrêt quasi complet de l'activité afin d'éviter de nouveaux mouvements. Certaines entreprises vont même jusqu'à la fermeture de l'entreprise pour inventaire. De par l'importance et la lourdeur de cette activité, des entreprises se sont même spécialisées dans la réalisation des inventaires. L'inventaire périodique est une image et un chiffrage parfait des stocks à un moment donné. Ces valeurs ne restent pas longtemps valides à cause de l'activité, ce qui les rend alors d'une efficacité relative pour la gestion quotidienne des stocks. Cette efficacité s'effrite encore plus du fait de la non spécialisation, ce qui est souvent le cas, des personnes participant périodiquement aux inventaires. Pour remédier aux insuffisances induites par l'inventaire périodique, les entreprises utilisent de plus en plus la méthode dite de dénombrement en rotation (inventaire tournant). Une équipe constituée d'employés du service des approvisionnements effectue, quotidiennement ou chaque semaine, le décompte d'une partie des stocks et compare l'information ainsi recueillie avec celle indiquée dans les fichiers des stocks. Parmi les avantages de ce procédé :

- La garantie d'un travail fait par des employés qualifiés.
- L'assurance d'un bon moyen de surveillance contre les vols et les détournements et ce en effectuant ces inventaires à l'improviste et sur certains produits uniquement.

Parmi les inconvénients de ce type d'inventaire, on trouve le mouvement permanent des niveaux des stocks qui fausse les résultats de l'inventaire. Lors des inventaires, des intervalles de confiance (en terme mathématique) sont appliqués et des tolérances sur les valeurs des stocks sont alors admises. Il existe toujours des décalages entre les chiffres dans les fichiers des stocks et les valeurs issues des inventaires. Selon chaque pays et la fonction des produits, des tolérances limites sont acceptées.

Pour toute entreprise, qu'elle soit commerciale ou de production, la valeur financière du stock représente une charge et une immobilisation importante. En entreprise de production, il faut incorporer la main d'œuvre en plus des produits en cours et des produits

finis. A partir du chiffrage des quantités en stock, le coût de chaque unité peut être établi. Toutefois, les prix varient d'une période à l'autre et rendent difficile une évaluation des stocks. Dans ce qui suit, quelques unes des nombreuses techniques et méthodes de gestion des stocks sont présentées.

### Estimation financière des stocks : Méthodes précises

Cette méthode et ses différentes variantes sont basées sur les prix d'achats des produits. La question de savoir quel prix choisir parmi une liste ou sur une période, crée alors les différences sur les techniques à suivre :

1. Coût spécifique ou exact : Chaque produit est identifié séparément en lui appliquant son propre prix. Cette technique est inapplicable dans le cas de produits qui se mélangent. Cette méthode est très efficace pour le cas de système avec un faible niveau d'unités de même type.
2. Coût moyen pondéré : Le coût moyen des unités est établi en prenant en compte des poids, en valeur, associés aux quantités des différents achats ou livraisons. Le principe de calcul est basé sur le calcul des moyennes pondérées.

**Exemple** : l'entreprise FAB a acheté à 5 reprises durant l'année 2002 le même produit avec les quantités et le prix donnés dans le Tableau 5.

Date	Quantité	Prix
17/01/2002	12000	7 €
17/05/2002	52000	7,2 €
17/07/2002	152000	7,37 €
17/08/2002	22000	7,15 €
17/10/2002	32000	7,7 €

**Tableau 5** : Quantités et prix du produit acheté en 2002

A la fin de l'année 2002, il restait dans le stock 17000 pièces. Deux démarches sont alors possibles pour le calcul de la valeur du stock.

**Première démarche** : En fonction des achats de produits, 5 cas notés  $C_1, C_2, \dots, C_5$  sont pris en compte. La pondération directe de chacun des 5 cas est le rapport entre la quantité correspondant à chaque cas et la quantité totale achetée.

Par exemple pour  $C_1$ , la pondération  $C_1$  est égale à :  $12000/17000 = 0,044$ . Le Tableau 5 donne la pondération directe des 5 cas.

Cas	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
Poids	0,044	0,193	0,563	0,081	0,119

**Tableau 6** : Pondération directes des cas

La valeur du stock restant est de :  $7,342 * 17000 = 124814€$ .

**Deuxième démarche** : On calcule tout d'abord le coût de chaque achat (Tableau 7).

Cas	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
Coût	84000 €	374400 €	1120240 €	157300 €	246400 €

**Tableau 7** : Coût de chaque cas



La valeur totale est de 1982340 €. Le prix moyen est le rapport entre le coût total et la quantité totale, ainsi  $PM = 1982340/270000 = 7,342$  €. On obtient exactement la même valeur du stock :  $7,342 \cdot 17000 = 124814$  €. Ce prix moyen ne correspond à aucun prix réel d'achat. D'une année sur l'autre, les entreprises utilisent indifféremment l'une des deux méthodes précédentes.

3. Epuisement successif : cette méthode est appelée aussi méthode du premier entré, premier sorti (*PEPS* ou *FIFO* pour *First In-First Out*). L'hypothèse fondamentale de cette méthode est de supposer que les produits vendus ou utilisés sont ceux achetés en premier et il ne reste dans le magasin que les produits nouveaux ou récemment acquis.

**Exemple** : On considère à nouveau les valeurs du stock de l'entreprise FAB. Le dernier achat est de 32000 pièces. Le prix moyen ou plutôt le prix unitaire du stock est de  $PM = 7,7$  €. La valeur du stock est alors de 130900 €.

4. Epuisement à rebours: cette méthode est appelée aussi méthode du dernier entré, premier sorti (*DEPS* ou *LIFO* pour *Last In-First out*). L'hypothèse fondamentale de cette méthode est de supposer que les produits vendus ou utilisés sont ceux achetés en dernier. Il ne reste dans le magasin que les produits anciens ou anciennement acquis. Cette méthode semble assez justifiée, car en général le profit réalisé à la vente d'une unité consiste de manière très réaliste à soustraire du prix de vente, la valeur actuelle du produit et non le prix payé pour ce produit. Ceci est dû au fait que la valeur actuelle du produit se rapproche plus du prix des derniers achats que du prix des anciens achats.

**Exemple** : On considère à nouveau les valeurs du stock de l'entreprise FAB. Le stock final est donc composé de 12000 pièces avec un prix unitaire de 7 € (premier achat) et de 5000 pièces avec un prix unitaire de 7,2 € (deuxième achat). La valeur du stock est alors de 120000 €.

Pour ces exemples, les stocks ont été pris en fin d'année. Il faut savoir qu'ils peuvent être pris sur des périodes plus rapprochées et même sur des situations d'inventaire permanent. La notion d'ancienneté ou de jeunesse dépend des cycles et de la périodicité des calculs.

### Estimation financière des stocks : Méthodes des estimations

Ces méthodes des estimations ne sont pas uniquement calculées avec les prix d'achats mais prennent en compte également les ventes depuis les derniers inventaires. La méthode de la marge bénéficiaire brute est l'une de ces méthodes. Cette méthode utilise un résultat financier de l'exercice en cours qui intègre la marge bénéficiaire brute. Cette marge peut concerner plus d'un exercice ou plusieurs périodes et prendre en compte différentes catégories de produits. La valeur d'un stock à la fin d'une période de référence est la différence entre les stocks en début de période ajoutée aux achats et la valeur des stocks perdus.

**Exemple** : La marge bénéficiaire brute de l'entreprise FAB est de 40%. Au début de l'année 2002, ses stocks sont de 17000 pièces avec une valeur totale de 125000 €. L'entreprise a fait des achats pour 250000 €, et ses ventes nettes pour la période en question sont de 370000 €.

L'estimation des stocks pour la période allant jusqu'au 30 juillet 2002 s'effectue de la manière suivante :

Il faut tout d'abord estimer les stocks vendus  $SV$  en utilisant les ventes  $V$  et la marge bénéficiaire brute  $Mbb$ .

$$SV = V - Mbb * V = V * (1 - Mbb) = 370000 * (1 - 0,40) = 222000 \text{ €.}$$

Le stock actuel (au 30/07/2002) = Stocks début + achats - stocks vendu, ainsi

$$\text{Stock actuel} = 125000 + 250000 - 222000 = 153000 \text{ €.}$$

Cette méthode de la marge bénéficiaire brute est utilisée pour valider une évaluation des stocks obtenue par une autre démarche.

### Analyses et commentaires

La méthode de l'épuisement successif et de l'épuisement à rebours sont basées sur les coûts récents. La première permet une évaluation actualisée des stocks alors que la seconde estime au mieux les ventes. Elles restent sensibles à l'impact de l'inflation sur la valeur réelle des produits.

Le prix des produits considéré dans la valorisation des stocks intègre en outre des coûts d'amortissement. Les amortissements pour dépréciation est la constatation comptable d'un amoindrissement de la valeur d'un élément d'actif résultant de l'usage, du temps, du changement de techniques et de toute autre cause dont les effets sont jugés irréversibles (définition du Plan Comptable Général PCG) [31].

Les amortissements dégressifs sont basés sur un des principes de l'actualisation : il est plus intéressant de disposer de 100 € aujourd'hui que dans un an. De même, il est plus intéressant de payer moins d'impôt sur les sociétés aujourd'hui que dans un an. C'est pourquoi, il est préférable pour une entreprise d'amortir un bien le plus vite possible. Les annuités sont donc décroissantes. L'amortissement dégressif est facultatif. Les entreprises peuvent donc soit pratiquer cette méthode, soit adopter la méthode de l'amortissement linéaire. Tous les biens ne peuvent prétendre à l'amortissement dégressif (sont exclus les biens achetés d'occasion et les biens dont la durée de vie est inférieure à trois ans) [27]. De plus, le Code Général des impôts donne la liste des biens pouvant donner lieu à amortissement dégressif. Il s'agit pour les principaux :

- Des matériels et des outillages pour les opérations industrielles de fabrications, de transformations et de manutention.
- Des installations productrices de chaleur, de vapeur ou d'énergie.
- Des matériels destinés à l'épuration des eaux et à l'assainissement de l'atmosphère.
- Des équipements informatiques et machines de bureaux.
- Des matériels et outillages utilisés à des opérations de recherche.
- Des installations de magasinage et stockage.
- Des bâtiments industriels d'une durée d'utilisation non supérieure à quinze ans.

La base de calcul des annuités d'amortissement est constituée par la valeur nette comptable, c'est-à-dire la valeur d'origine diminuée de la somme des amortissements déjà pratiqués à cette date. La première année, aucun amortissement n'ayant encore été pratiqué, la valeur retenue sera donc la valeur d'origine, identique à celle prise en compte par l'amortissement linéaire.

Le taux d'amortissement est obtenu en multipliant le taux linéaire par un coefficient. Ce coefficient dépend de la durée d'utilisation et est donné dans le Tableau 8.

**Exemple :**

- Pour une durée de 5 ans, le coefficient est égale à  $100/5*20 = 40\%$ .
- Pour une durée de 10 ans, il est égale à  $100/10*2,5 = 25\%$ .

Durée normale d'utilisation	Biens acquis ou fabriqués	
	Jusqu'au 31.12.2000	A compter du 01.01.2001
3 ou 4 ans	1,5	1,25
5 ou 6 ans	2	1,75
Plus de 6 ans	2,5	2,25

**Tableau 8 :** coefficients des taux d'amortissement [31].

Pour les annuités d'amortissement, la première est calculée au *prorata temporis* à partir du premier jour du mois d'acquisition.

**Exemple :** un matériel, d'une valeur de 15 000 € HT, a été acquis le 25 juin 2000. Il est amorti sur 5 ans. L'exercice coïncide avec l'année civile. Le taux d'amortissement est égal à  $100/5*1,75 = 35\%$ . La première annuité est donc égale à  $15\ 000*0,35*7/12 = 3062$  € par défaut. L'annuité suivante sera égale au produit du taux dégressif par la valeur comptable nette, soit ici  $(15000-3062)*0,35 = 4178$  €.

### 3 Mise en entrepôt : stockage (*storage, warehousing*)

Généralement, les entreprises opèrent de deux manières différentes et cela en utilisant soit la technique dite de stockage fixe (affecté) ou bien la technique de stockage aléatoire (banalisé). Il existe une solution intermédiaire qui est une combinaison des deux techniques précédentes, elle est appelée technique mixte.

#### 3.1 Stockage fixe

Cette technique est basée sur le principe d'affectation stricte des emplacements de stockage aux produits. Elle permet aux gestionnaires des stocks et des entrepôts de connaître les emplacements au même titre que les utilisateurs de ces produits. Ceux-ci sont chargés des retraits de produits ou responsables des inventaires. Normalement les produits sont en partie identifiés par l'emplacement qui leur est dédié. Ce type de stockage possède des avantages mais également quelques inconvénients.

#### Avantages

- Le partage d'informations sur les stocks est facilité entre les gestionnaires et les utilisateurs.
- La disposition des produits se fait en respectant une certaine logique en regroupant des produits et en éloignant d'autres, permettant ainsi une gestion plus simplifiée. Ceci permet la prise compte des exigences techniques des produits telles que la climatisation, les distances de sécurité, ...
- Avec les regroupements, les inventaires, les suivis de produits, les estimations des différents niveaux sont plus faciles.

### **Inconvénients**

- Les entrepôts et les places disponibles ne sont pas forcement optimisés, car des produits sont épuisés alors que d'autres, moins bien placés et plus difficiles d'accès, ne le sont pas. On peut alors avoir des places vides non exploitées.

### **3.2 Stockage aléatoire**

Par opposition au premier type de stockage cité, ce mode d'entreposage n'affecte pas de places précises aux produits. La gestion des emplacements se fait en général en *FIFO*, c'est-à-dire premier arrivé premier servi en terme d'emplacement. Ce type de gestion permet un remplissage au fur et à mesure, en prenant d'abord les places les plus accessibles. Ce type d'entreposage nécessite un suivi d'enregistrement très stricte et immédiat afin de pouvoir retrouver les différents produits et d'identifier leur emplacement. Il nécessite également des agencements et des réagencements fréquents des lieux de stockages en fonction des caractéristiques des produits utilisés et des nouveaux produits.

### **Avantages**

- On a la possibilité d'utiliser la totalité des espaces disponibles car aucun emplacement n'est réservé. En général, les utilisateurs de ce type d'entreposage cherchent à atteindre les 80 à 90% de remplissage.
- Il n'est pas nécessaire de respecter un schéma bien particulier pour entreposer les produits (sauf pour certains produits bien spécifiques). Ceci facilite en général le travail des magasiniers pour le rangement (mais un gros besoin d'enregistrement et de gestion de données).
- Les mouvements pour les rangements dans l'entrepôt sont en général minimisés (il faut espérer que les produits les plus accessibles sont les plus demandés).

### **Inconvénients**

- La gestion des données, des fichiers de suivi des produits et des emplacements est très rigoureuse. Elle faut également une mise à jour permanente qui est très consommatrice de temps et d'énergie.
- La réalisation des inventaires est plus difficile car les produits ne sont pas regroupés et l'erreur est plus difficile à déceler.
- Les fichiers et les fiches de suivi des produits sont plus sensibles. En cas de perte de celles-ci, une recherche physique des produits dans les entrepôts est induite et donc des coûts supplémentaires en personnel et en temps sont en prendre en compte.
- Une lisibilité des entrepôts est moins évidente.

### **3.3 Stockage mixte**

Le stockage mixte représente le mode d'organisation le plus souvent retenu dans les entrepôts. Il repose sur :

- La mise en place d'un stock de préparation permettant le prélèvement manuel des articles par les préparateurs. Il correspond à un stock affecté.

- La mise en place également de stock dit de réserve, destiné à entreposer l'ensemble des réceptions en provenance des fournisseurs. Il est souvent géré de manière aléatoire.

Une politique de stockage basée sur les classes (*ABC zoning*) alloue des zones à des groupes spécifiques, souvent basée sur leur taux de rotation. D'autres politiques de stockage incluent le stockage corrélé, ou groupement par famille, de manière à placer proches les produits souvent demandés ensembles.

En plus des techniques génériques déjà citées, d'autres méthodes propres aux entreprises ou à leurs activités sont développées. L'utilisation d'outils informatiques et de méthodes mathématiques d'optimisation telle que la recherche opérationnelle est largement faite.

### 3.4 Modalités d'entreposage

Il existe autant de modalités et de politiques d'entreposage que de produits et de familles de produits. En plus des durées et des modes d'approvisionnement ou de consommation des produits, l'entreposage dans des lieux dédiés prend en compte d'autres paramètres. Il faut en effet prendre en compte les caractéristiques physiques, les propriétés chimiques et mécaniques et les types d'emballages.

Le schéma de base est de traiter les produits en fonction de leur arrivée (FIFO). Les systèmes de gestion sont nettement plus complexes car les produits disponibles immédiatement ne sont pas forcément ceux qui vont être tout de suite consommés et quitter les stocks. Ceci est du à une grande variabilité. Les prévisions sont déterminées avec une certaine imprécision et dépendent également des stratégies commerciales et d'autres considérations.

Le schéma de fonctionnement consiste à placer les produits en fonction de leur demande, donc de leur sortie. En terme d'approvisionnement, ce paramètre, appelé également écoulement, doit être impérativement pris en compte. Ceci permet, en général, d'éviter la désuétude ou la détérioration des produits.

La disposition de l'entrepôt, des tablettes (rangements), des allées et les véhicules de transports internes (manutention) doit permettre une gestion en fonction des sorties d'entrepôts.

Le dimensionnement des entrepôts, des tablettes et des moyens de manutention, conditionne les rangements des produits. Avec des tablettes étroites les produits sont côte à côte, ou bien les uns derrière les autres avec des points d'entrée (par le côté par exemple) des produits sur les tablettes et des points de sorties (par devant ou par derrière). En fonction du poids et du volume des produits rangés, l'un derrière l'autre, sont installés sur les tablettes comme pour les supermarchés. On entrepose dans les endroits les plus accessibles, pour les clients ou les chargés des stocks, les produits les plus demandés. Les autres se retrouveront par exemple sur les tablettes les plus élevées, les plus basses ou dans les coins les plus isolés de l'entrepôt.

Il existe également des considérations commerciales qui vont dicter le choix des emplacements des produits en terme d'attractivité et de possibilité de vente.

Plus d'informations et de détails sont donnés sur les techniques de gestions de produits en entrepôts dans le chapitre dédié à la gestion des expéditions.

## 4 Protection des stocks et des entrepôts

Le stockage doit répondre à un ensemble de règles permettant d'assurer la qualité, la sécurité et la facilité d'utilisation des produits. La sécurité des lieux et des personnes doit être également assurée. La protection de l'entreposage consiste à mettre en œuvre un ensemble de moyens pour que les produits en stock conservent leurs qualités et soient alors en état pour les fins prévues.

L'entreposage doit éviter toute détérioration de la qualité : empoussièrement, assèchement, délavage de la couleur (couleur estompée), détérioration physique des produits (coins brisés, marques, rouilles), etc. En plus, il faut prendre en compte les conditions de sécurité contre le vol, la mauvaise utilisation, le mauvais suivi et l'enregistrement, etc.

### 4.1 Entreposage sécuritaire

Ce type de stockage prend en compte de manière significative l'aspect sécuritaire dans le sens de préservation et de mise à l'abri des produits des vols et de la détérioration. Il est évident que le stockage tient compte en plus des considérations commerciales et managériales des aspects d'attraction et d'intérêt pour les vols. Partant de là, certaines règles sont suivies et respectées pour ce type d'entreposage.

- Limiter les accès des entrepôts qu'aux personnes autorisées.
- Etablir des heures d'ouverture et de fermeture strictes à respecter par tout le monde.
- Prendre en compte la valeur des produits dans le choix des emplacements dans les entrepôts. Mettre en place un schéma d'entreposage efficace mais également maximisant la sécurité des produits de valeur ou intéressant les voleurs. Exemple : mettre dans des salles à part, fermées à clé, au niveau des entrepôts, les produits de grandes valeurs.
- Régir de manière stricte les différents mouvements d'entrée et de sortie des entrepôts avec des bons, des enregistrements continus.
- Etablir des fiches de produits décrivant clairement le produit, le poids, la couleur, le volume, les dimensions, la date d'arrivée, l'emplacement de stockage, ...
- Assurer les conditions de sécurité des bâtiments avec des clôtures, des portes renforcées, de l'éclairage, de la surveillance et du gardiennage.

### 4.2 Entreposage ouvert

Pour ce type de stockage, les produits ne sont pas entreposés dans des endroits fermés mais plutôt au plus près de leurs lieux d'utilisation. Ceci n'est possible que lorsque les produits à entreposer ne nécessitent pas de conditions particulières. Avec ce type d'entreposage, les utilisateurs ont un accès facile mais présente également certains inconvénients similaires au stockage aléatoire.

Ce mode d'entreposage, lorsque les propriétés des produits l'autorisent, est utilisé dans les entreprises de fabrication des produits de masse (fabriqués en grande quantité et où l'approvisionnement est répétitif et continu). Le responsable des stocks est chargé de l'acheminement de ces produits jusqu'à leur lieu d'utilisation. Ensuite, le responsable de production prend la relève. Pour ce type de stockage, l'aspect sécuritaire est loin d'être la préoccupation majeure des responsables.

Parmi les produits entreposés de cette manière, on trouve les produits peu fragiles, ne suscitant pas forcément l'intérêt des voleurs, difficilement dissimulables et/ou transportables.

En général, ce système fonctionne avec peu de produits en stock et un contrôle minimum. L'opérateur au niveau de son poste de travail a à sa disposition son besoin en produit et également peut en solliciter sans forcément passer par un protocole administratif lourd. Il est facile et rapide de voir que ce mode de gestion n'est pas toujours applicable et qu'il présente également un certain nombre d'inconvénients.

### 4.3 Présentation de quelques signalisations de sécurité

Il existe un certain nombre de signalétiques et de représentations permettant d'indiquer un danger. Globalement ces signalisations sont associées, pour un entrepôt par exemple, à trois catégories que sont : les dangers primaires, les dangers subsidiaires (secondaires) et les dangers de manipulation (manutention). Pour les dangers primaires, on trouve 9 classes de signalisations données par le Tableau 9.

Classe	Type de danger
1	Matières et objets explosifs
2	Gaz (inflammable ou non toxique)
3	Matières liquides inflammables
4	Matières solides inflammables, matières inflammables spontanément, matières volatiles (gaz inflammable) au contact de l'eau
5	Matières combustibles
6	Matières toxiques (poison à éviter avec des aliments), matières infectieuses
7	Produits radioactifs
8	Matières corrosives
9	Danger

*Tableau 9 : Classes de signalisation [35]*

### 4.4 Un entrepôt : comment sécuriser ?

La sécurité est le souci de tous les instants. Cette préoccupation est intimement liée à la vie de tout système y compris celui de l'entrepôt. A partir du moment où on pense à stocker les produits, la problématique de sauvegarde s'impose. Alors, certains choix stratégiques de gestion d'entrepôt sont dictés par des exigences sécuritaires.

Plusieurs acteurs sont impliqués dans la sécurité d'un entrepôt, comme le maître d'ouvrage (propriétaire), l'architecte concepteur, l'expert sécurité, certains organismes de type DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement), les Sapeurs-pompiers et l'APSAD (Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurances Dommages chargée de l'élaboration des règles de protection régissant les installations, les équipements et les constructions). L'équivalent de l'APSAD à l'échelle des USA et mondiale est le FMS (*Factory Mutual System*).

## 5 Expédition et gestion des commandes (*picking*)

En fonction du niveau de finition des produits et des points de destination, les sorties des produits des lieux d'entrepôt et leur acheminement vers les lieux de demande sont

soumis une procédure bien particulière. Il est évident que la procédure croît en complexité en fonction du niveau d'intégration (interne ou externe) de la demande au système d'entreposage et à l'entreprise. Si la demande émane d'un atelier en aval, en terme de processus de fabrication pour les produits stockés, et qui ne se trouve pas géographiquement très loin, la procédure est très simple. Alors que dans le cas contraire, il faut mettre en place toute une procédure et un ensemble documentaire.

L'expédition, quelque soit sa destination, nécessite une méthode et le respect d'un certain nombre d'étapes :

- En fonction du mode de stockage dans les entrepôts, des personnes sont chargées de préparer les commandes. Il est facile d'imaginer qu'en fonction de l'entreposage, de la diversité des produits dans la commande à expédier et de leur quantité, la préparation prend plus ou moins de temps.
- Dans le cas de commande importante en quantité et en variété, plusieurs personnes d'affections différentes, au niveau de l'entreprise et même au niveau des entrepôts, sont impliquées afin d'accélérer le processus.
- En général, on procède également par méthode en localisant déjà les produits et en établissant un chemin, avec la distance minimale, pour récupérer tous les produits. C'est à dire en cherchant à tout prix à optimiser la préparation et l'expédition des produits.
- Acheminement et manutention.
- Contrôle qualité et documentaire.

Cette dernière étape, qu'elle soit faite en interne ou vers l'extérieur, est très importante dans le processus d'entreposage. Ses incidences sont nombreuses que se soit sur le plan productif pur ou d'un point de vue commercial.

Avant de spécifier les différents systèmes de gestion des entrepôts pour l'expédition, voici quelques définitions importantes [34].

### Définitions

- Le prélèvement pour commande (*item picking operation*) est une opération dans laquelle des articles simples sont pris de leur position de stockage.
- Le chargement pour commande (*pallet picking operation*) consiste à charger des palettes de produits dites entrantes (pour le stockage) ou sortantes (pour l'expédition).
- Le système de gestion d'entrepôt (*warehousing system*) est une combinaison de politiques d'équipements et d'opérations utilisées lors de la collecte d'un objet ou dans l'environnement de stockage.

Il y a essentiellement trois types de systèmes d'entreposage et de déstockage. Cette classification est générée par le degré d'automatisation des systèmes. Pour un système manuel, le degré est nul tandis que pour un système automatique, ce degré est total. Entre les deux, on retrouve le système automatisé. L'ensemble de ces systèmes est présenté dans le cadre de la gestion d'un prélèvement (expédition de commandes).



### 5.1 Systèmes d'entreposage manuel (*picker to product system*)

Un véhicule de prélèvement se déplace le long des zones de stockage. Une grande variété de véhicules est disponible pour tous les types d'accès aux entrepôts (horizontal, vertical,...).

Un ordre de prélèvement peut contenir une liste de quantités de différents SKU. Deux approches fondamentales peuvent être distinguées dans ce type de systèmes :

- Le prélèvement unitaire (*single-order-picking*) : un chargé de commande (*order-picker, OP*) est responsable du prélèvement d'un ordre complet.
- Le prélèvement par lot (*batch-picking*) : est un prélèvement regroupé où plusieurs ordres sont effectués simultanément par un chargé de commande qui est restreint à une zone de l'entrepôt. Le prélèvement regroupé réduit le temps moyen des trajets. Cependant, il nécessite que les ordres soient triés après.
  - Le chargé de commande peut aussi trier les ordres pendant qu'il traverse l'entrepôt (*sort-while-pick*).
  - Les articles peuvent être réunis et triés par la suite (*pick-and-sort*). Pour appliquer la stratégie de prélèvement et trier en même temps, les véhicules de prélèvement doivent être équipés de containers séparés.
  - Le prélèvement par vague ou rafale (*wave picking*) : est une stratégie efficace si le regroupement et l'entreposage par zone sont appliqués. Cette stratégie implique que tous les chargés de commande commencent au même moment à prélever dans leurs zones respectives. La vague suivante commence seulement quand tous les prélèvements sont finis.
  - Le prélèvement et la sélection à la ceinture (*pick-to-belt*) : quand il y a utilisation de convoyeur.

Les équipements utilisés pour ce mode d'entreposage sont des équipements classiques de la manutention

### 5.2 Systèmes d'entreposage automatisé (*product-to-picker system*)

Ces systèmes automatisés sont des entrepôts contrôlés par ordinateur. Ils sont utilisés pour le prélèvement et le tri de produits de petite et de moyenne dimension. Le chargé de prélèvement a une position fixe dans l'entrepôt face au système en mouvement. Le chargé de commande récupère les produits du système qu'il met à sa disposition. Durant le temps de mouvement du système pour ramener les produits vers le chargé de commande, ce dernier se consacre à d'autres activités tels que le tri, l'emballage et l'étiquetage des produits récupérés.

Dans certain cas, avec par exemple l'utilisation de carrousels, le chargé de commande peut utiliser de deux à quatre systèmes en même temps. L'avantage d'avoir une multitude de carrousels réside dans le fait que le temps de rotation de chacun permet de décharger un autre et donc de minimiser les temps d'attente et d'inactivité de l'opérateur. Il est important de bien synchroniser les différents mouvements.

Le système dit de casiers rotatifs (*rotary rack*) est nettement plus cher que le carrousel horizontal, avec des possibilités de mouvement des différents compartiments de la zone de stockage. Il offre des possibilités importantes et permet un gain de temps non négligeable.

Le système de stockage et de récupération automatique (*automated storage/retrieval system*) (AS/RS) est un système avec plusieurs emplacements en parallèle et avec une palette à deux compartiments longeant chacun d'eux. Sur les différents rayonnages se déplace une machine appelée machine d'entreposage/empilement (*Storage/Retrieval*) (S/R) ou une *grue d'empilage automatisée*. La machine S/R se déplace sur des rails qui sont montés au plancher et au plafond. Dans une configuration typique, la machine S/R peut porter tout au plus une palette en même temps. Les palettes pour le stockage arrivent à la station d'entrée et attendent un convoyeur d'accumulateur jusqu'à ce que la machine S/R les transporte à un endroit de stockage dans les supports. Par conséquent, les stockages sont exécutés selon la politique FIFO. Dans le cas d'expédition ou de déplacement plus important entre sites, la machine S/R dépose les objets recherchés à la station de chargement ou d'envoi, après quoi les produits sont acheminés à destination avec le moyen de transport adéquat. La machine S/R a trois commandes indépendantes pour le mouvement horizontal, verticale et le mouvement de navette.

Avec un déplacement horizontal et vertical indépendant, la période de mouvement de la machine S/R est mesurée avec le maximum des temps horizontaux et verticaux en dissociant les deux types de mouvements. Dans beaucoup d'applications, la machine S/R est confinée à un côté ou à un rayonnage avec un mouvement linéaire. Le mouvement circulaire des machines S/R, pour accéder à d'autres allées, est possible. Il impose des courbes sur les rails, une stabilité accrue de la structure et la résolution des problèmes de fluage. Ces problèmes de fluage sont importants car ils réduisent l'épaisseur des rails ou des roues dans les courbes et favorisent le déraillement du système. Une autre possibilité qui permet à la machine S/R d'entrer dans différents rayons (étalages, côtés) est l'utilisation d'un dispositif de navette qui transfère la machine S/R entre les rayons.

En raison de sa capacité en unité de charge, les caractéristiques opérationnelles de la machine S/R sont limitées à des cycles dits de commande simple et des cycles de commande duale. Dans un cycle de commande simple, un stockage ou une récupération est effectué entre deux visites consécutives entre l'entrée et la station de déchargement ou chargement. Dans un cycle de commande duale, la machine S/R exécute consécutivement le stockage, un déplacement à vide et la récupération à l'endroit désigné. Le déplacement à vide entre le stockage et l'endroit de récupération est mentionné comme un mouvement intermédiaire.

La machine dite de mini charge (*miniload*) AS/RS est conçue pour le stockage et la récupération de commande d'articles de petites dimensions. Les articles sont stockés dans des tiroirs ou des casiers modulaires. Ces éléments de stockage ou récipients peuvent être subdivisés en compartiments multiples et contiennent chacun un SKU spécifique. Dans une opération typique du *miniload* AS/RS, le chargé de commande est installé à l'extrémité d'une station. Cette station contient au moins deux positions de réception. Pendant que le chargé de commande extrait l'article du récipient d'une des deux positions de réception, la machine S/R replace le récipient de l'autre position à son emplacement d'origine, et recherche le prochain récipient. Il existe également des *miniloards* AS/RS avec plus de deux positions de réception par station, aussi bien que des systèmes avec un module de livraison par convoyeur des récipients aux chargés de commandes distants. Le *miniload* AS/RS est désigné généralement sous le nom de système en bout de rayon (*end-of-aisle*) pour la préparation des commandes, par opposition au système dit d'inter rayon (*in-the-aisle*) tels que les systèmes manuels de prélèvement présentés dans le paragraphe précédent 5.1.

Les équipements utilisés pour ce mode d'entreposage sont des équipements classiques de manutention mais on trouve également les armoires rotatives, les silos à tiroirs, les carrousels, etc.

### 5.3 Systèmes d'entreposage automatique

Ce système est surtout dédié aux prélèvements rapides de petits ou de moyens objets solides (peu fragiles) avec des tailles et des dimensions uniformes : compacts disques, produits pharmaceutiques, etc. Le système automatique de prélèvement de commandes (*automatic order-picking system*) est obtenu en remplaçant le chargé de commande d'un système de carrousel ou d'un support rotatoire par un robot.

Un système appelé distributeur automatique (*A-frame automatic dispenser machine*) est un autre dispositif de préparation des commandes sans intervention de l'homme. La machine se compose d'une bande roulante de convoyage avec des magasins disposés de chaque côté de la bande. Chaque magasin contient un mécanisme qui distribue automatiquement les articles sur la bande. Chaque commande est affectée à une section sur la bande du convoyeur (cellule). Quand la cellule passe devant un magasin qui contient un article demandé par la commande, celui-ci est automatiquement distribué. À l'extrémité de la bande, les articles appartenant à la même commande sont mis dans un casier ou un carton.

Les équipements utilisés sont des équipements classiques de manutention mais on trouve également les automates de préparations de commandes, les robots préparateurs (poste fixe, poste mobile), etc.

### 5.4 Système de tri et d'accumulation de commandes

Un système de tri et d'accumulation de commandes (*order accumulation and sorting system*) (OASS) est utilisé pour établir la totalité des ordres quand ces derniers ne sont pas prélevés un par un. Divers types de OASSs existent, allant de l'échafaudage manuel en utilisant une matrice, aux systèmes automatiques pour les gros volumes. Un OASS automatique se compose habituellement d'un convoyeur en circuit fermé et de travées ou de lignes d'accumulation. Une sonde balaye SKUs qui décrivent la boucle. Les SKUs de la même commande sont alors automatiquement détournés dans la travée réservée à la commande. Les systèmes d'entreposage rotatifs comme les carrousels (*rotary rucks*) sont utilisés pour l'accumulation et le tri des commandes.

Il est souvent spécifié que les machines de tri servent d'une part à regrouper les différents articles d'une même commande ou à regrouper les différentes commandes ayant la même destination. Il existe de nombreux modèles et variantes pour ce type de machines en fonction des technologies.

- Machines à poussoirs : ce sont les trieurs les plus économiques mais également les plus basiques. Ils sont gérés par des vérins pneumatiques répartis sur un ou les deux côtés d'un convoyeur à bande. Ce type de système rudimentaire est déconseillé en fonction des caractéristiques et de la fragilité des produits, mais également dans le cas de cadence supérieure à 1200 colis à l'heure (maximum 1400 colis à l'heure). Une autre variante de ce système est présentée dans la Figure 19. Le système, dit à écharpe, où les poussoirs sont remplacés par des bras, est présenté sur la Figure 20.

- Trieurs à galets déviateurs : ce sont des convoyeurs à galets qui sont pourvus de bandages à très fort coefficient de frottement. En phase normale et de non déviation des produits, les galets sont escamotés en dessous du niveau du convoyeur. En phase de déviation, ces galets sont remontés légèrement au dessus du niveau du convoyeur. Pour ce type de système, les cadences peuvent aller entre 3000 et 4000 colis à l'heure.

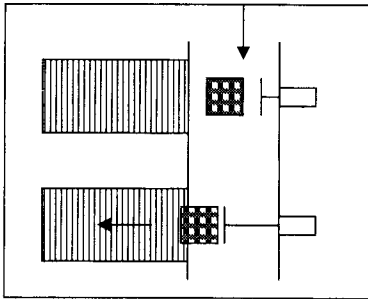


Figure 19 : Trieur à poussoirs

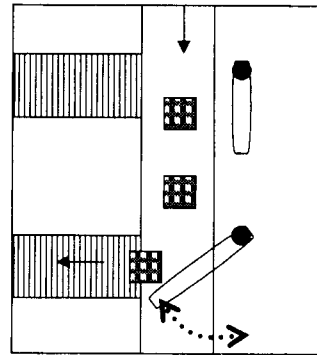


Figure 20 : Trieurs à déviateurs

- Trieurs à taquets : ils sont très efficaces dans la manipulation des produits fragiles mais également à grande cadence. Le niveau de cadence se situe entre 8000 et 12000 colis à l'heure. Pour le système de fonctionnement, voir la Figure 22.
- Trieurs à tapis (*Cross Belt*) : ce sont une suite de petits convoyeurs installés sur un convoyeur principal. Leur sens de mouvement est perpendiculaire au sens du convoyeur principal. Un petit convoyeur ne se met en marche que lorsqu'un colis doit être redirigé vers une sortie (voir la représentation de la Figure 23). Ce système peut traiter jusqu'à 15000 colis à l'heure.

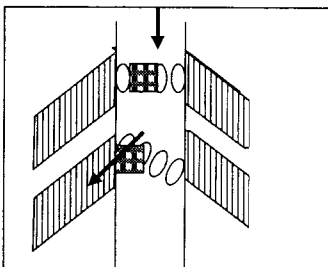


Figure 21 : Trieurs à galets déviateurs

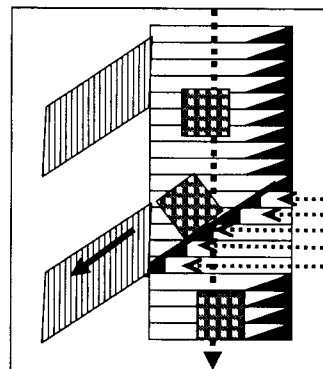


Figure 22 : Trieurs à taquets

- Trieurs à plateaux basculants : ils sont également appelés trieurs à ailes de mouette. Le principe consiste à avoir un convoyeur principal à chaînes supportant des plateaux avec des charges. Ces derniers peuvent basculer sur le côté, quand ils sont déclenchés. Pour ce type de système, les cadences peuvent aller jusqu'à 20000 colis à l'heure.

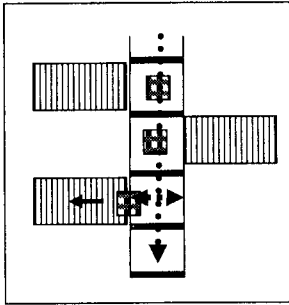


Figure 23 : Trieurs à tapis (Cross Belt)

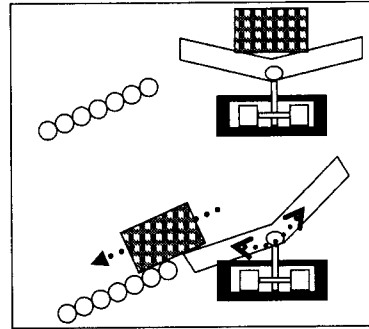


Figure 24 : Trieurs à plateaux basculants

### Remarques

Il existe de nombreux autres mécanismes de tri en fonction du type de produit, de sa technologie et de leur spécificité technique. Il faut signaler que les bonnes performances d'un trieur dépendent directement et fortement de la rapidité et de la fiabilité de la lecture des codes à barres lors de l'introduction du colis dans le trieur. Lors de la conception, une grande attention doit être portée sur la qualité d'impression du code, sa taille, la localisation de l'étiquette sur le colis, la performance des lecteurs utilisés, la distance de lecture et l'orientation de l'étiquette. Il faut également veiller à ce que l'orientation et la localisation de l'étiquette soient constantes au cours du temps.

Il est évident que les protocoles adoptés pour les préparations d'expédition supposent de les gérer déjà en phase de stockage. L'innovation est permanente et des méthodes voient le jour rapidement, comme par exemple le chargement global.

## 6 Conception et gestion des entrepôts

Dans la conception et dans la gestion des entrepôts, de nombreuses décisions de type stratégiques, tactiques et opérationnelles sont prises. Elles sont interdépendantes et peuvent porter sur des éléments structurels ou organisationnels d'un entrepôt.

Une hiérarchisation des différentes décisions et une discussion du nombre de critères de performance qui servent à évaluer des possibilités de conception sont présentées.

### 6.1 Méthodes de conception : Généralités

Un processus de conception est typiquement constitué des phases suivantes : création du concept, acquisition des données, spécifications des fonctions et des techniques, sélection des moyens et des équipements, agencement, sélection des politiques de planification et de contrôle. Alternativement, ces décisions peuvent être situées à un niveau stratégique, tactique ou opérationnel.

Les décisions concernant les flux dans le processus et le niveau d'automatisation appartiennent typiquement à la spécification technique et sont de nature stratégique. La sélection des systèmes de stockage de base est également de niveau stratégique, alors que le dimensionnement de ces systèmes et la détermination de leurs agencements sont des décisions tactiques. Les politiques détaillées de contrôle et de gestion appartiennent au niveau opérationnel. La phase d'acquisition des concepts, des données et la phase d'implémentation sont au delà du sujet traité par ce livre.

Cette décomposition hiérarchique souligne les différents horizons de décision (long, moyen et court terme) où les décisions prises à un niveau supérieur deviennent des contraintes pour les niveaux inférieurs.

Partant sur un niveau de détail limité, une première conception approximative est décrite tandis qu'aux étapes suivantes, cette conception est raffinée. Ceci est connu comme une approche de haut en bas (descendante), par opposition à l'approche ascendante. La méthode de conception idéale regroupe des problèmes relatifs à un même niveau et décrit une solution en optimisant simultanément les divers sous-problèmes afin d'atteindre un optimum global. Il est important d'identifier les relations entre les sous-problèmes, afin d'éviter les solutions sub-optimales ou d'optimalité locale.

## 6.2 Critères d'évaluation des performances des entrepôts

Les critères à prendre en compte pour l'étude de l'entreposage sont : les coûts d'investissement et les coûts opérationnels, la flexibilité des volumes et des mélanges, le taux de fonctionnement et d'expédition (la sortie), la capacité de stockage, le temps de réponse, la qualité (occurrence) de réalisation des commandes.

L'importance relative d'un critère dépend du type d'entrepôt. Globalement, il y a deux types d'entrepôts : l'entrepôt de distribution (*ED*) et l'entrepôt de production (*EP*).

Un entrepôt de distribution consiste à stocker et à réaliser des commandes venant de consommateurs externes. Ces commandes sont constituées d'un grand nombre de lignes (*order lines*) ou chaque ligne spécifie la quantité d'un certain produit. Le nombre de produits dans un d'entrepôt de distribution est généralement très important alors que les différentes quantités commandées par produit sont relativement faibles. Pour ce genre d'entrepôt, le coût et l'efficacité des prélèvements sont souvent optimisés.

Le principal critère de conception est la sortie maximum (*maximum throughput*) avec des coûts d'investissement et des coûts opérationnels minimums. La valeur présente Nette (*Net Present Value*) (NPV) est la valeur d'un investissement à une date présente. Les coûts et les profits planifiés dans le futur sont escomptés. Le retour sur investissement (*return on investment*) (ROI) est un autre critère de performance en terme de coût définissant le profit attendu par année, divisé par les coûts des investissements. Ces critères sont pris en compte principalement aux niveaux tactique et stratégique. Souvent, la combinaison du taux de sortie (*throughput*) désirée et un temps de réponse court élimine déjà un nombre de solutions techniques et indique l'utilisation de plus de systèmes automatisés.

Un système d'entrepôt de type distribution en A-frame a un système orderpicking fortement automatisé mais coûteux. La fonction d'un entrepôt de production est de stocker les matières premières, produits semi-finis et produits finis, liés à une fabrication et/ou à un assemblage. Des matières premières et des produits finis peuvent être stockés pendant de longues périodes. On trouve cette situation lorsque la série de fournitures de pièces entrantes est beaucoup plus grande que le groupe de fabrication, ou bien lorsque la production surproduit la quantité d'articles finis commandés par les clients. Le stockage des marchandises pendant de longues périodes doit être rentable et est habituellement pratiqué, en grande quantité, dans des systèmes de stockage peu coûteux telle que les palettes support.

Le critère prédominant et fondamental en conception d'entrepôt est la capacité de stockage. Les objectifs principaux en conception sont les coûts d'investissement et les coûts opérationnels mais ces objectifs sont secondaires par rapport à la capacité. Le

stockage des produits semi-finis a d'autres conditions, puisque la demande est, la plupart du temps, inconnue à l'avance et la récupération de l'entrepôt doit être rapide, afin d'éviter les retards dans la production. Ceci peut mener à une conception qui prend en compte le temps ou le délais entre une demande et son accomplissement par rapport au temps de réponse.

Des critères d'exécution peuvent être manipulés comme des objectifs ou des contraintes de conception. En formulant un critère comme une contrainte, il faut chercher à atteindre une valeur pré-spécifiée. En plus des contraintes liées à des notions organisationnelles, un certain nombre de contraintes techniques et/ou physiques sont formulées. Un exemple de contrainte est la hauteur maximum d'un système de stockage afin de s'adapter à un bâtiment spécifique. Des charges de placement sont souvent traitées comme contrainte. Une limitation stricte sur les coûts d'investissement et leur niveau possible peut mener à une conception conventionnelle et basique d'entrepôt (sans optimisation fine).

Finalement, d'autres critères d'évaluation de performances sont difficilement quantifiables comme les conditions environnementales et ergonomiques et pourtant elles restent importantes.

### **6.3 Problèmes classiques de conception et de gestion des entrepôts.**

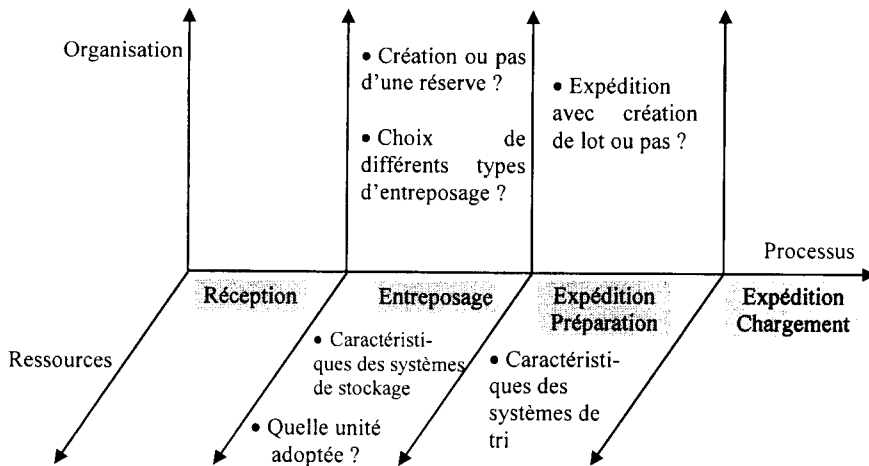
#### **Niveau stratégique (Long terme : 5 ans)**

Ce niveau concerne les décisions avec un impact à long terme, et traitant souvent de gros investissements. Les deux principaux groupes sont les décisions sur la conception du flux de processus et les décisions concernant la sélection des types de systèmes d'entreposage.

La conception du flux de processus (*process flow design*) définit les processus nécessaires pour l'entreposage. Un flux basique d'entreposage est constitué de phases de réception, de stockage, de prélèvement et d'expédition. Des processus ou des étapes additionnelles peuvent être inclus et n'ont pas forcément d'impact immédiat sur la sélection des moyens techniques et des équipements.

Les sélections des types de système d'entreposage au niveau stratégique concernent tous les systèmes nécessitant un haut niveau d'investissement. Le choix du processus exige la disponibilité des systèmes spécifiques mais le raisonnement inverse est également vrai. Par exemple, un processus de tri peut seulement être choisi si un système de trieurs existe et qu'il est capable de manipuler les produits. Par conséquent les deux groupes de décisions sont liés. Le procédé de choix complet peut être décomposé en deux problèmes séquentiels de décisions : un premier basé sur les possibilités techniques (capabilité) et un deuxième sur des considérations économiques.

Le premier problème concerne les possibilités techniques (capabilité). Les équipements de stockage doivent être appropriés aux produits et ne doivent pas rentrer en conflit entre eux. Ce problème de conception d'entrepôt concerne l'ensemble de la réalisation du flux du processus et la sélection des principaux types de systèmes d'entreposage. Les entrées pour ce problème sont les caractéristiques des produits et les commandes clients. L'issue de cette problématique de conception spécifie quelle combinaison de systèmes est techniquement capable de manipuler les produits et satisfont les contraintes de performances. Désormais, le résultat n'est pas un système spécifique ou même un petit nombre d'alternatives, mais un nombre limité de possibilités de combinaisons de systèmes de l'entreposage.



**Figure 25:** Niveau stratégique [34]

Le second problème concerne la conception du flux des processus et la sélection des systèmes basés sur des considérations économiques. Cela conduit à une optimisation sur une gamme de combinaisons de systèmes possibles, c'est-à-dire la résolution du problème de capacité technique, avec bien entendu la minimisation des investissements et des coûts opérationnels.

Les remarques à suivre permettent d'établir les liens entre différents niveaux de décisions :

- Les coûts d'investissement sont principalement déterminés par le nombre de ressources.
- La capacité de stockage de l'entrepôt est principalement déterminée par le type et les dimensions du système de stockage. La politique de stockage (stockage dédié, basé sur des classes ou aléatoire) est de moindre importance.
- Le taux de sortie maximum de l'entrepôt est partiellement déterminé par le type et les dimensions des ressources. Un grand nombre d'autres facteurs peuvent également influencer le taux de sortie comme la décision de faire un espace séparé de réserve, la politique de stockage, de regroupement, d'acheminement et d'affectation (personnel, équipement et quais).
- Le temps de réponse de l'entrepôt est partiellement déterminé par les facteurs relatifs au taux de sortie maximum. Cependant, il est aussi influencé par les autres décisions organisationnelles, telles que la politique de décomposition en zones des entrepôts (*zoning*), de politique de tri, de politique d'angle de saturation (*dwell point*).

Ces observations soulignent encore une fois les fortes relations entre les différents problèmes de décision au niveau stratégique. D'une manière idéale, ces problèmes devraient être groupés en un seul problème de décision simultanée. Pour des raisons pratiques, une décomposition semble inévitable mais cela reste extrêmement important de modéliser explicitement les relations dans chaque décomposition possible. La Figure 25 liste un nombre de problèmes de conception au niveau stratégique en fonction de la décomposition de l'entreposage en processus.



### Niveau tactique (moyen terme : 2 ans)

A ce stade, les décisions sont basées sur les sorties des décisions du niveau stratégique. Les décisions tactiques ont un plus petit impact que les décisions stratégiques mais nécessitent quand même quelques investissements et ne devraient pas être remises en cause trop souvent.

Ces décisions concernent typiquement les dimensions des ressources (tailles des systèmes de stockage et nombre d'employés), la détermination de la mise en place (agencement) et le nombre d'issues ou de solutions organisationnelles.

Les problèmes qui se posent au niveau tactique et qui devraient être traités simultanément sont :

- Les problèmes organisationnels incluant le dimensionnement des zones de prélèvement et de réception et les zones de stockage élémentaires (ABC), la détermination des politiques de réapprovisionnement et de regroupement en lots, et le choix du concept de stockage à suivre (aléatoire, fixe, dédié ou basé sur des classes).
- La détermination des dimensions du système de stockage, incluant les espaces du magasin et de la réserve.
- La détermination des dimensions des espaces de quais (lieux d'enlèvement et de chargement).
- La détermination du nombre d'équipement manutention (*material handling equipment*).
- L'établissement de l'agencement de tout le système.
- La détermination du nombre de personnel.

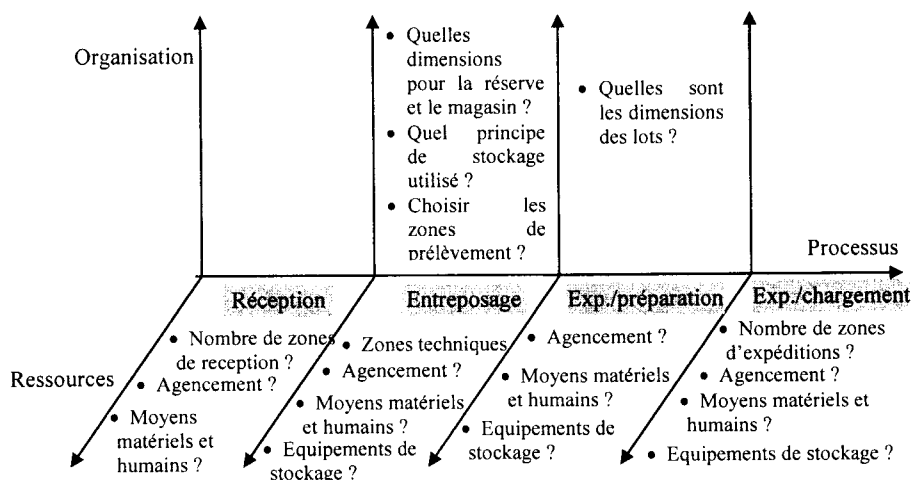


Figure 26 : Niveau tactique [34]

La Figure 26 donne une répartition des différentes décisions liées au niveau tactique.

Les relations entre les différents problèmes sont moins fortes et strictes que pour le niveau stratégique. Cependant, les différentes règles de stockage qui constituent la politique de stockage sont fortement reliées et dépendantes.

Les politiques de stockage sont intimement liées aux politiques organisationnelles du fait qu'elles influencent le taux de rendement (sortie) de l'entrepôt et donc ne peuvent donc pas être dissociées.

Tous ces problèmes de conception ont pour but d'optimiser les critères de performance tels que la sortie (taux de rendement de l'entrepôt), les temps de réponse, les capacités de stockage, en minimisant les coûts d'investissement additionnels et organisationnels. La minimisation des coûts opérationnels revient à réduire les coûts liés à la gestion du matériel et de la main d'œuvre. Évidemment, les décisions prises à ce niveau ont un impact fort sur des problèmes restants à résoudre au niveau opérationnel.

### Niveau opérationnel (Court terme : 1 an)

À ce niveau, les processus doivent être traités et analysés selon les contraintes imposées par les décisions stratégiques et tactiques prises antérieurement. Partant du fait que les interactions entre les différents processus sont typiquement abordées et traitées dans les problèmes de conception au niveau stratégique et tactique, alors le niveau opérationnel aborde les différents processus indépendamment. Les décisions principales, prises à ce niveau, concernent les problèmes de transfert, d'affectation, d'allocation, de contrôle et de gestion du personnel et des équipements. Ces décisions sont représentées par la Figure 13.

Les décisions au sujet du processus de stockage au niveau opérationnel sont :

- L'affectation des tâches de réapprovisionnement au personnel.
- L'allocation des produits rentrant aux places de stockage libres, en accord avec le concept de stockage décidé au niveau tactique.

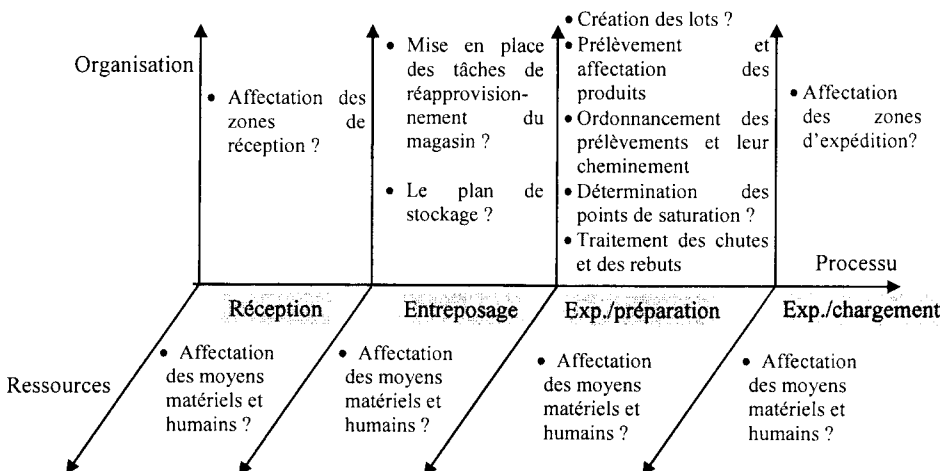


Figure 27 : Niveau opérationnel [34]

Les décisions qui concernent le processus de prélèvement sont :

- La formation de lots ou le séquençement des ordres, en ligne, avec les tailles des lots déterminées au niveau tactique
- L'affectation des tâches de prélèvement aux personnes chargées de commandes (*oderpicker*).
- Le séquençement et l'ordonnancement des tâches par commande (*routing, scheduling*).
- La sélection d'un point de stagnation (saturation, parcage) (*dwell point*) pour l'équipement de prélèvement au repos.
- L'affectation des produits à des lignes ou des travées de tri.
- L'affectation des camions arrivant et partant des quais de chargement/déchargement est aussi une décision de contrôle.

### **Indicateurs de performances d'un entrepôt**

De manière générale, la gestion opérationnelle d'un système d'entreposage est fortement dépendante de la connaissance et de la maîtrise d'une série d'indicateurs. Ces indicateurs correspondent à l'évaluation des performances en productivité, en qualité, en sécurité, etc. On retrouve en particulier le taux de remplissage, le degré d'automatisation, le taux de rotation des stocks, les coûts de stockage

### **Commentaires et analyses**

Des relations hiérarchiques fortes existent entre les décisions faites au niveau stratégique, tactique et opérationnel. Les interactions sont également nombreuses entre les problèmes abordés au niveau stratégique. Avec une moindre importance, ce type d'interactions concerne également le niveau tactique, alors qu'au niveau opérationnel les décisions peuvent être prises indépendamment les unes des autres.

La partie suivante est une présentation d'une série de concepts, de méthodes et de techniques pour traiter des problèmes spécifiques d'entreposage aux différents niveaux de décision.

## Chapitre II

# Le management de l'entreposage

Les résultats typiques de la planification pour les entrepôts sont la gestion des stocks et l'affectation des espaces de stockage. Une gestion des stocks intelligente peut avoir comme conséquence une réduction des coûts d'entreposage. En appliquant des politiques de commande sophistiquées, de planification de la production rigoureuse, on peut réduire les coûts des stocks, tout en garantissant un niveau de service satisfaisant.

Le niveau de service est le ratio entre le nombre de commandes livrées à temps sur le nombre de commande totale. Les niveaux bas des stocks réduisent non seulement les coûts de stock, mais améliorent l'efficacité des opérations de gestion des commandes et de stockage. Bien entendu, plus l'entrepôt est de petite dimension plus les temps de déplacement pour le chargé de commande sont petits. Une politique efficace d'affectation des lieux de stockage peut également réduire les temps de déplacement du chargé de commande pour les opérations de stockage/prélèvement (S/R : *storage/retrieval*) et de gestion des commandes. La congestion des mouvements peut être réduite en répartissant les activités par zone. Cette organisation augmente alors la capacité de sortie et de gestion des commandes.

Les politiques de planification définissent un cadre pour la gestion des entrepôts. Les politiques de stockage et d'affectation des emplacements d'entreposage déterminent quels produits arrivent ainsi que sont leurs emplacements dans le stock.

Les problèmes de gestion et d'ordonnancement traitent typiquement du séquençement, de l'organisation des commandes et des opérations de stockage/prélèvement. Ils traitent également de la détermination des parcours du personnel de commandes, des stratégies pour les machines de S/R, de l'attribution des produits dans des positions de stockage (localisation aléatoire ou basée sur les classes). Ils prennent enfin en compte le mouvement entre les opérations utiles (mouvement inutile) des articles à une position plus attrayante de récupération, du point d'angle de saturation (*dwell point*) de machines de S/R, etc.

### 1 État de l'art sur les problèmes d'entreposage

En 1983, McGinnis et al. [30] ont réalisé des documents récapitulatifs, très intéressants, sur l'état des travaux en entreposage. Ils concluent qu'un important gouffre existe entre la recherche sur l'entreposage et d'autres disciplines telles que la manutention, la gestion des stocks, l'ordonnancement. En 1992, Goetschalckx a créé un site internet ([http://www.isye.gatech.edu/poeple/faculty/Marc\\_Goetschalckx/research.html](http://www.isye.gatech.edu/poeple/faculty/Marc_Goetschalckx/research.html)) avec une liste étendue de publications. En 1996, Van den Berg [39] a fait un état de l'art de la littérature spécialisée sur la planification et l'organisation des systèmes d'entreposage. Il existe actuellement une multitude de sites internet, de publications scientifiques ou pour grand public traitant du sujet mais on relève un manque flagrant d'ouvrages.

### 1.1 Méthodes de conception d'entrepôts

Les travaux sur la conception des entrepôts se décomposent en deux familles. La première traite de cas appliqués et spécifiques et la deuxième s'intéresse à développer de nouvelles méthodes ou à améliorer des méthodes existantes.

Ashayeri et Gelders [2] ont analysé la littérature concernant la conception des entrepôts et concluent qu'une approche purement analytique aussi bien qu'une approche utilisant seulement la simulation ne conduit pas en général à une méthode pratique et globale de conception. Cependant, ils suggèrent la combinaison de deux approches permettant alors l'obtention de bons résultats pour les problèmes de conception. Ashayeri et Goetschalckx [3] ont développé une procédure de conception générale par étapes. Duve et Böcker [14] ont proposé une méthode de conception par étape pour les entrepôts et la gestion des commandes et ils donnent plusieurs exemples.

### 1.2 Problèmes au niveau stratégique

Globalement, deux grandes familles ou catégories de problèmes au niveau stratégique ont été identifiées :

- La sélection des systèmes et des équipements en se basant sur les possibilités techniques (capabilité).
- La conception des flux de processus et la sélection des systèmes d'entreposage en prenant en compte essentiellement des considérations économiques.

Il n'existe aucune publication traitant spécifiquement du premier point. Alors qu'un nombre limité de publications traite de problèmes relatifs au second point.

Pour le second point les thématiques et les méthodes proposées sont :

- Une procédure dite systématique pour la détermination des conteneurs des entrepôts.
- Une analyse basée sur l'approximation des systèmes de performances de stockage/prélèvement avec des moyens de transfert automatisés.
- Une étude de coût sur les différents équipements de stockage et de prélèvement pour la gestion de commande.
- Une évaluation d'un système automatisé de stockage en satellite (*Automated satellite storage system*) basée sur des critères physiques et technologiques et également organisationnels avec une incidence sur l'entreposage.

Le nombre de publications sur les problèmes de conception au niveau stratégique paraît limité, en dépit du fait que c'est le niveau où les décisions prises ont un grand impact. La plupart des publications analysent les performances de l'entrepôt pour être capable de comparer les systèmes avec d'autres alternatives.

### 1.3 Problèmes au niveau tactique

Au niveau tactique, la majorité des décisions concernent la détermination des dimensions, des ressources et l'organisation de la conception. Les publications sur ce sujet sont classées selon le type de système de stockage.

Certaines méthodes proposées et problèmes abordés sont présentés ci-dessous :

- Une analyse de l'agencement d'entrepôt et ce en utilisant un modèle optimal pour le dimensionnement et l'agencement d'entrepôt en minimisant les coûts, les durées, les distances et les espaces d'utilisation des moyens de manutention.
- Une procédure combinant en même temps des modèles de simulations et des modèles mathématiques pour déterminer les dimensions et l'agencement d'entrepôt en optimisant les capacités de stockage. Une représentation et un ajustement sont faits pour établir les liens entre les capacités de stockage et d'autres caractéristiques d'entrepôt.
- Une étude sur les impacts des choix d'agencements sur les temps de réponses des entrepôts en utilisant un modèle analytique et de la simulation.
- Une méthode d'analyse et de modélisation d'un système de prélèvement de type (*pick-to-belt*) en passant par une approximation analytique pour estimer le taux de rendement et de sortie de l'entrepôt.
- Une évaluation de différentes configurations de systèmes d'entreposage de type carrousel.
- Une détermination du taux de rendement d'un entrepôt et des temps de réponse d'un système de carrousel en exploitant un modèle stochastique.

En conclusion, énormément de travaux au niveau tactique concernent les performances.

#### 1.4 Problèmes au niveau opérationnel

La majorité des problèmes à ce niveau de décision concerne les affectations de tâches, l'ordonnancement, la gestion et le contrôle du personnel et les équipements en entreposage.

De la multitude des problèmes abordés, analysés et traités, on peut citer :

- La création et le dimensionnement des lots de tâches à effectuer (*batching*).
- Les politiques d'entreposage (*storage policies*).
- Le séquençement, le tri et l'acheminement (*routing and sequencing*).
- La sélection des points de saturation ou d'accumulation (*dwell point selection*).
- Le séquençement, l'acheminement et l'entreposage (*storing and sequencing*).

Une présentation plus détaillée et explicite avec un approfondissement de certains problèmes est faite au paragraphe suivant.

## 2 Modèles spécifiques de gestion d'entreposage

Des modèles de gestion d'entrepôts sont publiés dans les magazines spécialisés et beaucoup de techniques de recherche opérationnelle sont utilisées pour résoudre les problèmes d'entreposage. Les problèmes traités relèvent indifféremment de tous les types de niveau de décision à savoir stratégique, tactique ou opérationnel.

La gestion des stocks et/ou la gestion de la production décident quels produits sont à stocker dans l'entrepôt et dans quelles quantités. L'entreposage dicte des modes d'affectation physiques des lieux de stockage et donne l'endroit où les produits doivent être entreposés. Ici il faut distinguer entre le magasin (secteur dit en avant) et la réserve. L'entreposage dicte également les politiques de stockage, préétablies dans le cas de système avec S/R (Stockage réservé ou dédié, consacré, stockage par classes dit fixe ou stockage aléatoire).

## 2.1 Nombre et localisation des entrepôts

Dans un entrepôt, les produits sont transportés, réceptionnés suivant une procédure bien établie, déplacés pour être entreposés, stockés pour ensuite quitter l'entrepôt par expédition en destination du client. Des questions se posent automatiquement aux entreprises à savoir : Combien doit-on prévoir d'entrepôts pour pouvoir stocker les différents produits ? De quelles capacités doivent être dotées ces lieux ? Où doit-on les implanter ? Avec quel mode doivent communiquer les entrepôts entre eux ?

Les premières réponses sont données durant la phase de conception et de construction des entreprises. Face à leur évolution, les entreprises sont soumises à de nouvelles contraintes, à des exigences accrues, et même à la nécessité de changement de stratégie. Les entreprises s'adaptent alors en construisant de nouveaux lieux d'entreposage à l'intérieur ou à l'extérieur de l'entreprise. Ceci permet en adoptant une nouvelle politique de stockage, en partageant la charge avec les fournisseurs, les clients ou toutes autres solutions d'apporter des réponses efficaces aux problèmes. Bien entendu des schémas types sont reproduits d'une entreprise à l'autre.

Les modèles d'entrepôts sont les suivants :

- L'entrepôt central où tout est coordonné. Les produits et les marchandises passent directement de cet entrepôt à l'utilisateur final.
- L'entrepôt par lieu physique, usine ou magasin, où sont dirigés les produits et les marchandises.
- Les entrepôts spécifiques, à l'intérieur d'une usine ou d'un magasin et à proximité des utilisateurs.
- Un entrepôt central, des entrepôts intermédiaires dits centres de distribution, des entrepôts locaux ou spécifiques.

Il existe un ensemble d'outils mathématiques et informatiques pour répondre aux questions posées précédemment. Rappelons que des travaux de recherches sont réalisés en permanence sur cette problématique. Les caractéristiques, les contraintes et même les objectifs en terme d'optimisation évoluent dans le temps en fonction des nouveautés organisationnelles, législatives et surtout techniques. Les systèmes informatiques de traitements et d'échanges de données ont permis d'apporter de nouvelles possibilités inimaginables par le passé.

Parmi les grandes variantes en terme d'objectif pour le dénombrement et la localisation, on peut citer :

- La stratégie et la politique d'entreposage avec la centralisation/décentralisation de base des activités d'entreposage.
- La mise en place et la réalisation de la politique d'entreposage avec la résolution optimale du problème posé et la prise en compte de différents scénarios.

### Principales politiques de localisation

Il faut distinguer entre les lieux de stockages et les lieux de décisions. Un ensemble de partenaires distants géographiquement peuvent coopérer pour centraliser leurs produits à l'achat ou à la vente. Il se peut également qu'une centrale d'achat entrepose ses produits acquis au même moment à des endroits distants géographiquement.

Il existe essentiellement pour le monde économique deux schémas de localisation, à savoir la centralisation ou la décentralisation des activités d'entreposage.

Pour les stockages en entrepôts centraux ou en décentralisés, les caractéristiques sont :

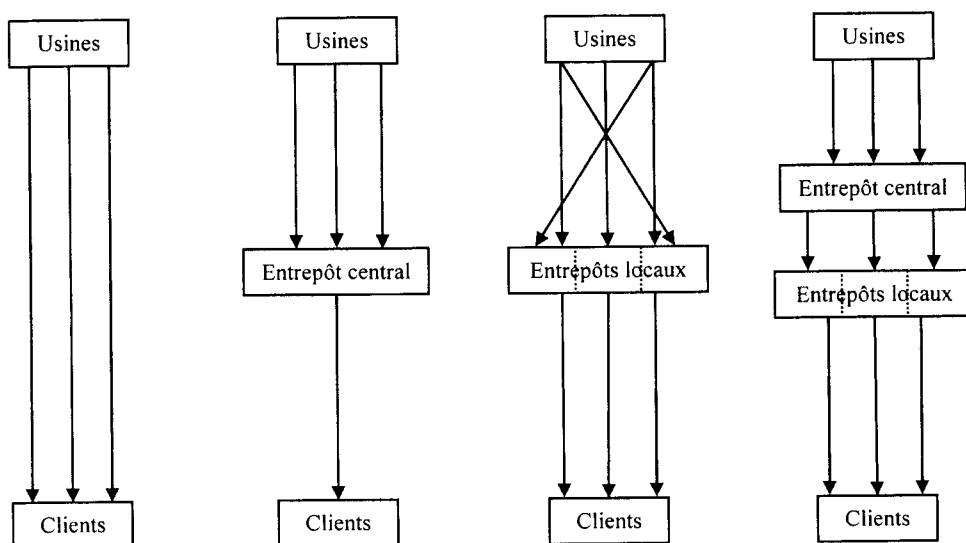
- Pour la centralisation :
  - Le contrôle est plus facile, tant pour le dénombrement physique des stocks que pour la sécurité.
  - Pour les articles similaires, l'espace d'entreposage nécessaire est moindre que si ces derniers sont répartis en plusieurs entrepôts.
  - Il est plus simple d'établir des sections spéciales pour les produits nécessitant un environnement particulier.
  - En évitant les doublons ou la multiplication des réserves, la quantité totale en stock central est nécessairement moindre que celle qui serait répartie entre les usines, les magasins et les entrepôts.
- Pour la décentralisation :
  - Le rapprochement de la source des utilisateurs
  - La réduction des délais pour la satisfaction des demandes
  - Le repérage rapide de points critiques et des goulets d'étranglement du système.

### **Cas des activités de distribution**

Pour les distributeurs non producteurs, il faut distinguer quatre organisations possibles :

- Le système direct appelé également livraison directe. Il consiste à alimenter les clients directement des usines. Il n'existe pas de rupture de charge dans la distribution, cette stratégie est adoptée dans le cas où les lots transférés sont importants pour remplir des moyens de transport de grande contenance (gros camions, wagons, ...) à destination d'un même client.
- Le système à un étage avec entrepôt central est le système central présenté ci-dessus.
- Le système à un étage avec réseaux d'entrepôts locaux est le système décentralisé présenté ci-dessus. Ce type de système pose le problème de l'affectation des productions des usines aux différents entrepôts.
- Le système à deux étages est un niveau supérieur aux deux systèmes à un étage cités ci-dessus. Le schéma global est un entrepôt central avec des d'entrepôts locaux. Il existe deux variantes : l'entrepôt central avec un réseau de dépôts locaux. Les usines alimentent en l'entrepôt central et ce dernier fournit les dépôts locaux qui conservent les stocks pour les livrés aux clients. L'entrepôt central avec un réseau de plates-formes de distribution, est une variante qui est basée sur la préparation des commandes clients directement à l'entrepôt central. Les marchandises sont ensuite acheminées par camions gros porteurs jusqu'à des plates-formes régionales où, après déchargement sur un quai puis rechargement dans des petits véhicules, elles parviennent aux destinataires par des tournées locales de livraison. En général, ces plates-formes ne disposent pas de moyens de stockage des produits (voir la Figure 28).





*Figure 28 : Différentes structures de réseaux de distribution [5]*

### Techniques pour l'optimisation de la localisation des entrepôts

L'optimisation de la localisation est classique et largement étudié en littérature spécialisée. Il existe des formalisations mathématiques et également des représentations informatiques de ce problème. Ce problème est similaire d'autres problèmes classiques tel que le problème de recouvrement, largement posé aux opérateurs téléphoniques et à leurs réseaux.

La connaissance des différentes méthodes et techniques existantes est un plus incontestable dans la maîtrise du monde de la logistique en général.

Le problème de localisation, dans sa version de base, consiste à trouver le nombre, la localisation, la capacité, le type de transport, la fréquence, etc., à mettre en place dans le cadre d'un contrat de stockage/livraison. Il prend en compte un certain nombre de paramètres dont :

- Le nombre de centres de distribution et d'alimentation.
- Le mode et la politique d'alimentation, d'évacuation ou d'exploitation des entrepôts.
- Les coûts unitaires de transport pour alimenter les centres de distributions. Il faut généralement des transporteurs de grande capacité. De ces centres aux différentes destinations en coût de ligne, il est souvent plus profitable d'utiliser des transporteurs de moindre capacité (des camionnettes par exemple). Les coûts unitaires de ces différents transporteurs peuvent varier beaucoup.
- Les itinéraires d'acheminement à respecter.
- Le nombre d'entrepôts locaux alimentés par les centres de distribution.
- La quantité totale de marchandises, sa répartition, le nombre de voyages par période de temps.
- La structure administrative pour assurer le contrôle et l'acheminement des stocks à leurs lieux d'utilisation.

La résolution de ce type de problème fait appel à des méthodes plus ou moins sophistiquées. La difficulté de résolution est proportionnelle au nombre de contraintes prises en compte mais également au type et à la qualité de la solution souhaitée.

### Étude de cas : Entrepôt unique

Dans ce qui suit, un exemple et une méthode (voir [5] et [2]) d'étude pour la localisation d'un entrepôt de distribution sont présentés. Le problème posé est la localisation d'un entrepôt central en minimisant une liste de coûts et en tenant compte d'un ensemble de contraintes telle que la satisfaction d'un niveau de service clients (fixé à priori indépendamment de l'emplacement de l'entrepôt).

La fonction coût total de distribution se décompose en trois termes : la partie transport (du ou des lieux de production à l'entrepôt et également l'acheminement terminal vers le client final), l'entrepotage proprement dit (stockage, manutention, gestion, amortissement, sécurité, ...), l'immobilisation financière correspondant à la valeur des stocks et le coût de réalisation (plans, construction, terrain, ...) des bâtiments de stockage.

Afin de pouvoir donner une première solution, des simplifications du problème posé sont adoptées grâce à des relaxations de contraintes ou bien l'élimination de certains critères de la fonction objective (dans le cas multicritères). Les solutions, ainsi obtenues, représentent des limites ou des bornes (des minorants ou des majorants dans le cas d'un problème de minimisation ou de maximisation).

Pour le problème posé de minimisation des coûts, le minorant est obtenu en relâchant les contraintes et les termes liés aux coûts de possession (frais financiers de stockage) et aux coûts de réalisation dans la fonction objective. D'un point de vue pratique ceci s'explique par le fait que les frais financiers et les coûts de réalisation sont indépendants, à priori, de la localisation des locaux.

Sur un plan national, la localisation de l'entrepôt central dépend essentiellement des coûts de transport. Une analyse des deux types de transports à savoir T1 pour l'usine-entrepôt ou bien T2 pour l'entrepôt-clients montre qu'à priori les coûts de T2 sont plus élevés car ils concernent de petites quantités, fréquentes et faisant appel à des moyens d'acheminement avec des coûts au poids et à la distance parcourue plus chers. La détermination des parcours optimaux a d'ailleurs suscité de nombreuses études depuis plusieurs années car elle intéresse énormément de personnes dans des domaines très variés. A titre d'exemple, le problème d'optimisation du parcours d'un voyageur de commerce devant effectué sa tournée en satisfaisant un ensemble de contraintes a même donné lieu à des concours et récompenses déjà au début du siècle [41]. Les coûts dus au type T1 sont certes importants mais plus gérables car ils restent en partie internes au système vis-à-vis du client. Ceci permet d'alimenter les stocks suivants des politiques et des stratégies internes minimisant les coûts, avec des quantités importantes et à des dates bien établies. Les responsables cherchent, dans le cadre du possible, de gérer les transports de type T2 comme des problèmes de type T1.

Pour le problème de localisation, les coûts de type T2 sont pris en compte. Partant de là, le coût de transport peut être modélisé par la fonction linéaire suivante  $CT = F + B \times d$  avec  $CT$ ,  $F$ ,  $B$ ,  $d$  respectivement, le coût de transport relatif à l'unité de poids (la tonne par exemple), le coût fixe de transport indépendant du trajet, le prix relatif au poids et à l'unité de distance (le kilomètre par exemple) et la distance dans la même unité de mesure (le kilomètre par exemple). Alors la fonction objective  $Z$  est :

$$Z = \text{Min} (\sum_i [CT_i \times Q_i])$$

avec  $i$  l'indice du client et  $Q_i$  la quantité livrée au client  $i$  par période. La livraison des clients se fait périodiquement en fonction d'un programme et d'un accord préalablement établi.  $Z$  devient :

$$Z = \text{Min} (\sum_i [CT_i \times Q_i]) = \text{Min} (\sum_i [A + B \times d_i] \times Q_i) = \text{Min} (A[\sum_i Q_i] + B[\sum_i Q_i \times d_i])$$

De cette dernière expression, toute une partie représente une constante par rapport au problème posé à savoir  $A[\sum_i Q_i]$ . Cette constante correspond à la quantité totale à livrer. La seconde partie est composée d'une constante  $B$  et d'un terme variable à optimiser  $B[\sum_i Q_i \times d_i]$ . La minimisation peut s'obtenir en réduisant la somme des quantités par la distance transportée de l'entrepôt vers les clients.

Il existe de nombreuses méthodes de résolution. Parmi celles-ci, une méthode classique appelée méthode du centre de gravité (méthode du barycentre).

### Méthode du centre de gravité

Cette méthode consiste à déterminer le centre de gravité d'un ensemble de clients et ce en repérant, sur une carte ou suivant un repère établi, les différentes distances entre les clients et les points de livraisons. Ce repérage se solde par l'identification de chaque client par des coordonnées  $(x, y)$  sur un plan par exemple). Pour chaque client ou point de livraison, un coefficient de pondération est établi représentant l'importance de la livraison. Les pondérations les plus souvent utilisées sont les tonnages, le volume ou le nombre d'unités livrées à chaque client (le chiffre d'affaires n'est pas pris en compte à cause des disparités des gammes de produits livrés d'une région à l'autre).

La solution ou plutôt l'emplacement de l'entrepôt central est donné par les coordonnées

$$\text{suyvantes : } X_c \text{ et } Y_c \text{ avec } X_c = \frac{\sum_i Q_i \times x_i}{\sum_i Q_i} \text{ et } Y_c = \frac{\sum_i Q_i \times y_i}{\sum_i Q_i}.$$

Cette méthode simple d'utilisation présente quelques inconvénients. Parmi ceux-là, l'évaluation des distances, la distance entre deux points est déterminée en considérant une droite entre eux. Il est évident que ces distances ne sont pas toujours vraies et ne représentent pas la réalité sur le terrain. Il faut savoir qu'il existe d'autres techniques d'évaluation des distances telle que les distances dites de Manhattan (rectilignes) par exemple.

Pour la méthode directe, la distance entre deux points, par exemple le point  $A(x, y)$  et le point central  $G(X_c, Y_c)$  (solution du problème), est donnée dans un repère orthonormé par :

$$\sqrt{(x - X_c)^2 + (y - Y_c)^2}$$

Cette méthode reste très intéressante, car elle fournit une bonne solution en minimisant le critère (poids - distance)<sup>2</sup> et non pas poids - distance.

### Méthode du centre de gravité version 2

La première méthode est largement et facilement utilisable mais elle souffre de certaines difficultés liées par exemple à la taille et à l'importance des données exploitables. Pour pouvoir prendre en compte plus d'informations, en ne se limitant plus qu'aux distances directes, une méthode itérative (récursive) basée sur le même principe que la méthode du centre de gravité a été développée.

Pour cette méthode version 2, les coordonnées des points de livraisons sont pondérées par le tonnage livré mais également par l'inverse de la distance au dépôt en utilisant les formules suivantes :

$$X = \frac{\sum_i \frac{Q_i \times x_i}{d_i}}{\sum_i \frac{x_i}{d_i}} \quad \text{et} \quad Y = \frac{\sum_i \frac{Q_i \times y_i}{d_i}}{\sum_i \frac{y_i}{d_i}}$$

L'algorithme de cette méthode est le suivant :

- Etape 1 : Choisir une localisation de départ, la plus centrale possible (afin de limiter le nombre d'itérations : ceci est possible pour un exemple avec un nombre de ville raisonnable). Pour ce faire, il est possible d'utiliser la méthode de centration qui consiste à calculer les distances de chaque point aux  $n-1$  autres et à retenir celui qui conduit à la somme minimum (voir toujours la complexité du temps de calcul de la méthode face à des cas avec de nombreuses villes).
- Etape 2 : Calculer les distances de chaque point au dépôt.
- Etape 3 : Déterminer une nouvelle localisation à l'aide des formules précédentes.
- Etape 4 : Retourner à l'étape 2 jusqu'à la convergence des résultats ou bien choisir un certain nombre d'itérations.

Au travers des différentes utilisations de cette dernière méthode, il s'est avéré que les résultats fournis par celle-ci, diffèrent légèrement de ceux obtenus par le barycentre classique.

### Analyse et commentaires

Les méthodes précédemment présentées apportent une aide ou une première idée sur une solution à un problème de localisation. Ces méthodes doivent être complétées et affinées par d'autres. La prise en compte d'un maximum de contraintes, de préférences réelles, permet d'avoir une bonne solution et d'éviter d'avoir d'excellente localisation théorique mais avec aucune existence réelle (correspondance).

La première indication sur l'emplacement possible de l'entrepôt doit être affinée en tenant compte :

- Du prix du terrain.
- De la fiscalité.
- Du marché du travail.
- Des structures d'accueils.

### Étude de cas : Réseaux à entrepôts multiples

La problématique posée ici est nettement plus complexe que la précédente (voir [4]). Il faut définir, en plus de la localisation, le nombre des différents entrepôts. Il est facile de voir que la complexité du problème devient plus importante. Pour résoudre le problème, il faut également identifier toutes les fonctions de coûts concernées et connaître leur évolution par rapport au nombre de dépôts.

**Exemple** : pour 10 dépôts sur 20 sites, il faut analyser presque 200 000 solutions possibles. (Combinaison de 10 cas sur 20,  $C_{10}^{20}$ ). La solution optimale en terme de satisfaction de commandes et de critères à optimiser peut comporter des solutions avec 9, 8, ... ou plus que 10 dépôts. Le nombre de combinaisons possibles est alors de  $2^{20}$ .

### Critères à optimiser : les fonctions coûts

Généralement, ils existent cinq grandes familles de coûts que sont :

- Le coût de transports des dépôts vers les clients.
- Le coût de transports des usines vers les dépôts.
- Les valeurs des immobilisations en stocks (frais financiers en stock).
- Le coût d'entreposage.
- Le coût global.

Un réseau d'entrepôts peut être modélisé sous forme d'un programme linéaire. La fonction objective à optimiser consiste à minimiser les cinq familles de fonctions coûts (citées ci-dessus). Les contraintes concernent la satisfaction de la demande et la conservation des flux dans les dépôts. Dans chacun d'entre eux, la somme des entrées doit être égale à la somme des sorties. Cependant, certaines de ces fonctions ne sont pas linéaires et, par ailleurs, la constitution d'un réseau ne constitue pas un continuum (un dépôt est ouvert ou fermé). Pour toutes ces raisons, il faut avoir recours à une méthode de programmation linéaire en nombres entiers qui est très lourde. C'est la raison pour laquelle on lui préfère de beaucoup des méthodes heuristiques, c'est-à-dire fournissant beaucoup plus rapidement une bonne solution mais pas nécessairement la meilleure. Parmi celle-ci, la méthode dite de soustraction progressive est la plus utilisée.

### L'algorithme de soustraction progressive [4]

Etape 1 : Retenir un certain nombre  $j$  de villes candidates  $n : j = n$ .

Etape 2 : Partir d'abord (initialement) avec comme hypothèse, la possibilité d'effectuer la distribution avec un dépôt dans chacune de ces villes.

Le réseau alors se compose donc de  $j$  dépôts (une valeur du coût total de distribution est estimée en utilisant les fonctions précédemment citées).

Etape 3 : Tant que  $j \neq 0$  (non nul) Faire

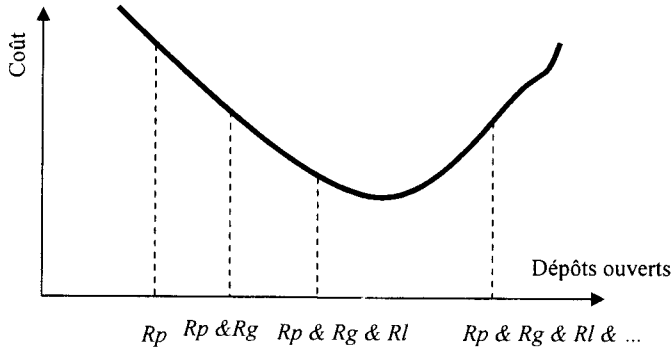
{  
 Un dépôt est fermé parmi les  $j$  villes retenues a priori.  
 Chacun des dépôts est fermé à son tour et le coût engendré est calculé.  
 La ville choisie sera celle dont la fermeture permettra d'obtenir l'économie la plus importante par rapport à la solution précédente.  
 Par la suite, on ne reviendra plus sur ce choix : ce dépôt sera définitivement fermé ;  
 On obtient ainsi un réseau à  $j-1$  dépôts.  
 }

Etape 4 : FIN

Le principal avantage de cette méthode est le nombre de solutions à étudier, bien inférieur à celui analysé dans un programme linéaire. Par contre, on n'est pas certain de trouver l'optimum global.

De plus, cette méthode s'applique bien avec des contraintes supplémentaires au départ. Ces contraintes sont l'obligation de disposer d'un ou de deux dépôts dans certaines villes

pour des raisons commerciales, ce qui diminue encore fortement le champ des solutions possibles.



**Figure 29** : Exemple de variation Coûts/dépôts [4]

L'intérêt majeur de cette heuristique réside dans la présentation des résultats : le décideur visualise l'évolution du coût global de la distribution en fonction des implantations réelles, par exemple une implantation en région  $R_g$ , ou des implantations dans deux régions ( $R_g$  et  $R_p$ ), ou trois, etc. Ceci est plus clair dans le cas d'utilisation de programmes informatiques avec interface graphique et simulateur (voir l'exemple représenté sur la Figure 29). Cette Figure 29 n'est qu'une simple représentation de l'évaluation des coûts en fonction des décisions prises et des étapes de résolution.

## 2.2 Réduction des niveaux de stock

Le but est de réduire les niveaux de stocks et par la même les coûts d'opérations et de stockage/enlèvement (prélèvement). La réduction des stocks se fait en établissant de petites quantités à délivrer plus fréquemment. Cependant, l'espace total de stockage nécessaire peut être considérable dans le cas où toutes les livraisons se font au même moment. Le besoin en espace de stockage peut être réduit significativement si les livraisons sont ordonnancées correctement. Il se peut aussi, pour remédier au problème d'espace, que des produits arrivants, déchargés des camions, soient directement transférés et chargés dans d'autres camions, c'est ce que l'on appelle le transbordement (*cross-docking*).

Les modèles classiques de planification de la production et de stockage déterminent les politiques de production et de lancement des ordres pour un seul produit. Hadley et Whitin [20] ont considéré le cas de plusieurs produits avec une contrainte sur la capacité totale de stockage. Ils déterminent les politiques de gestion de commandes pour tous les produits qui minimisent les coûts de lancement de commande et de possession par unité sur une longue durée.

La démarche de ces auteurs est basée sur la résolution du problème formalisé ci-dessous.

$$\text{Min} \sum_j \left( f_j Q_j + \frac{A_j D_j}{Q_j} + r \frac{C_j Q_j}{2} \right)$$

sous contraintes :

$$\sum_j f_j Q_j = F$$

où

$D_j$  : Le taux de demande en unités par année pour le produit  $j$ .

$A_j$  : Le coût fixe de lancement d'ordre pour le produit  $j$ .

$C_j$  : Le coût d'achat unitaire du produit  $j$ .

$r$  : Le taux annuel de possession des stocks.

$Q_j$  : La quantité de la commande pour le produit  $j$ .

$f_j$  : La quantité d'espace occupée par une unité du produit  $j$ .

$F$  : L'espace de stockage total disponible.

Si la solution du problème sans contrainte dépasse la capacité disponible, la technique des multiplicateurs de Lagrange [41] est utilisée pour trouver les politiques optimales. Ici, l'estimation de l'espace de stockage est basée sur la possibilité de recevoir toutes les livraisons au même moment. Cependant, en décalant correctement les livraisons, il est possible de modérer (minimiser) la place maximale nécessaire dans l'entrepôt.

Le problème de décision de la taille des ordres, combiné à celui des livraisons, est connu comme étant le problème de dimensionnement économique d'entrepôt avec l'ordonnancement de commandes (*economic warehouse lot scheduling problem - EWLSP*) [22].

Tous les modèles présentés supposent que les paramètres de coûts sont fixes, le taux de demande est constant, sans délais de livraison et de pénuries. Le problème de lot-sizing et d'étalage des livraisons devient plus compliqué dans le cas stochastique.

Les auteurs (Van der Berg et Zijm, [41]) donnent certains cas pratiques en citant quelques travaux et méthodes proposées dans la littérature.

### 2.3 Attribution et allocation du stockage

Une approche courante pour réduire la quantité de travail associée aux prélèvements est de diviser l'entrepôt en deux : un premier secteur à l'avant dit magasin et un secteur en amont dit réserve. Le magasin est utilisé pour un prélèvement efficace. La réserve est dédiée au remplissage du secteur avant (magasin) avec des produits fréquemment prélevés ainsi qu'au prélèvement de produits livrés occasionnellement et non disposés en magasin. Les deux parties peuvent être distinctes dans le local ou être localisées sur le même support de palette. Dans certaines entreprises, la réserve est elle-même divisée en deux parties : une pour le prélèvement et l'autre pour faire le remplissage des magasins.

Le problème de gestion de réserve appelé également *forward reserve problem (FRP)* consiste à décider quel produit doit être stocké dans le magasin et en quelle quantité ? Si un produit n'est pas stocké dans le magasin, alors il l'est dans la réserve. Pour satisfaire les commandes, ces produits sont récupérés de la réserve. Des méthodes ont été développées (heuristique) par Hackman et Rosenblatt 1990 [21]. Elles consistent à minimiser les coûts de prélèvement et de remplissage à partir de la réserve. Frazelle et al. 1994 [16] ont incorporé l'heuristique dans un cadre pour déterminer la taille du magasin avec l'allocation des produits. Les coûts de prélèvement et de réapprovisionnement dépendent de la taille du modèle.

La suite présente une méthode développée par Van den Berg et Sharp (1998) [40]. Les auteurs se sont intéressés aux opérations qui permettent de suivre les périodes pleines (suractivité) et les périodes creuses (sous activité). Avec ces dites opérations, il est

possible de réduire le nombre de réapprovisionnement en périodes d'intense activité tout en améliorant en contre partie les approvisionnements dans les périodes creuses précédentes. Cela ne fait pas seulement augmenter la durée de sortie des périodes de suractivité, mais réduit aussi de possible étranglement ou étouffement de l'entrepôt, du système de gestion (forte activité difficile à gérer) et des accidents.

Un exemple typique est un centre de distribution dans lequel des camions sont chargés pendant l'après midi. Le personnel est alors disponible le matin pour remplir et réapprovisionner le magasin. Les auteurs, dans leur technique de gestion de ce problème, considèrent une période durant laquelle les opérations de prélèvement ont lieu. Avant la période de prélèvement, le magasin est rempli en avance.

L'objectif est de trouver une allocation des quantités de produits dans le magasin qui minimise le temps de travail attendu pendant la période de prélèvement.

Les auteurs considèrent une situation observée dans beaucoup d'opérations (empilage de palettes) où les unités de charges sont remplies une à la fois. Un modèle mathématique présente les notations suivantes :

$S$  : Ensemble des produits affectés au magasin ( $card(S)=N$ ).

$P_i$  : Variable aléatoire qui représente le nombre de sélections ou de prélèvement du produit  $i$  pendant la période de prélèvement,  $i = 1, \dots, N$ .

$R_{ij}$  : Variable aléatoire qui représente le nombre de réapprovisionnement courant du produit  $i$ , si le magasin ne contient que  $j$  unité de charge du produit  $i$  au début de la période de prélèvement,  $i = 1, \dots, N$  et  $j = 1, \dots, m_i$ .

$U_i$  : Variable aléatoire qui représente le nombre d'unités de charge du produit  $i$  nécessaires pour satisfaire la demande pendant la période de prélèvement.

Le nombre attendu ou moyen de prélèvements respectivement dans le magasin et dans la réserve est :  $\sum_{i \in S} E(P_i)$  et  $\sum_{i \notin S} E(P_i)$ .

Soit  $z_i$  le nombre d'unités de charge du produit  $i$  qui est stocké dans le magasin au début de la période de prélèvement. Le nombre attendu ou moyen de réapprovisionnements est  $\sum_{i \in S} E(R_{iz_i})$ . On obtient alors :

$$\begin{aligned} E(R_{iz}) &= \sum_{k=z+1}^{\infty} [(k-z) \times P(U_i = k)] \\ &= \sum_{k=z+1}^{\infty} [P(U_i \geq k)] \\ &= E(U_i) - \sum_{k=1}^z [P(U_i \geq k)] \end{aligned}$$

Le problème *FRP* est ensuite modélisé comme un problème de programmation binaire (0-1) (*B-FRP*) en utilisant les notations suivantes :

$m_i$  : Nombre d'unités de charge disponible de produits  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ).

$p_i$  :  $E(P_i)$ .

$u_i$  :  $E(U_i) - P(U_i \geq 1)$ .



$u_{ij} : P(U_i \geq j), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, m_i.$

$V$  : Espace de stockage disponible dans le magasin.

$T^{pf}$  : Temps moyen pour réaliser un prélèvement dans le magasin.

$T^{pr}$  : Temps moyen pour réaliser un prélèvement dans la réserve ( $T^{pr} > T^{pf}$ ).

$T^{cr}$  : Temps moyen pour réaliser un approvisionnement.

Les variables de décision sont  $x_i$  pour  $i = 1, \dots, N$  et  $y_{ij}$  pour  $i = 1, \dots, N$  et  $j = 1, \dots, m_i$  avec :

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si le produit } i \text{ est affecté au magasin} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la } j^{\text{ème}} \text{ unité de charge du produit } i \text{ est réapprovisionnée à l'avance} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

L'écriture complète de problème (B-FRP) est :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \left\{ T^{pf} p_i x_i + T^{pr} p_i (1 - x_i) + T^{cr} \left( u_i x_i - \sum_{j=2}^{m_i} u_{ij} y_{ij} \right) \right\}$$

sous contraintes :

$$\sum_{i=1}^N v_i \left( x_i + \sum_{j=2}^{m_i} y_{ij} \right) \leq V$$

$$y_{i2} \leq x_i \quad i = 1, \dots, N$$

$$y_{ij} \leq y_{i(j-1)} \quad i = 1, \dots, N, j = 3, \dots, m_i$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, N$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, N, j = 2, \dots, m_i$$

La fonction objective est obtenue à partir des expressions  $(\sum_{i \in S} E(P_i)$  et  $\sum_{i \notin S} E(P_i))$  vues

précédemment après substitution et le remplacement des termes définis au début par :  $u_i$ ,  $p_i$ ,  $u_{ij}$  et en multipliant chaque terme avec le temps moyen de travail correspondant.

La contrainte  $\sum_{i=1}^N v_i \left( x_i + \sum_{j=2}^{m_i} y_{ij} \right) \leq V$  impose que l'espace occupé par l'unité de charge

affectée au magasin ne peut excéder l'espace total disponible  $V$ . L'ensemble restant de contraintes permet la  $j^{\text{ème}}$  charge d'unité de produit  $i$  à être stockée à l'avance, seulement si l'unité de charges  $1, \dots, (j-1)$  du produit  $i$  est déjà affectée au magasin et quelque soit le produit  $i = 1, \dots, N$ .

La politique basée sur le principe de magasin/réserve (*forward/reserve*) a permis, pour un problème réel, une réduction de la période de préparation de commande (*orderpick*) de plus de 40% pour un entrepôt avec 200 produits et 800 endroits de stockage.

#### 2.4 Allocation de place de stockage (*storage location assignment*)

Le problème d'allocation de place de stockage (*storage location assignment problem*) (*SLAP*) concerne l'affectation pour stockage des quantités de produits entrants

en entrepôt. Pour les systèmes de stockage et prélèvement (*storage/retrieval*) automatique, Hausman et al. (1976) [23] ont présenté 3 politiques d'affectation d'emplacements de stockage.

La politique de stockage basée sur les classes (*class-based storage policy*) consiste à distribuer les produits en se basant sur leurs taux de commande par exemple. Un certain nombre de classes est établi et des régions dans la zone de stockage sont réservées pour les différentes classes. En conséquence, une charge (ou produit) entrante est stockée arbitrairement à un endroit ouvert dans la région dédiée à sa classe. La politique de stockage basée sur les classes tente de réduire les temps moyens de déplacement pour le stockage/déstockage (prélèvement) en plaçant les produits avec une demande élevée aux endroits qui sont facilement accessibles.

Une des méthodes traitant de ce problème est proposée par Van den Berg (1996) [39]. Il a présenté un algorithme polynomial de programmation dynamique qui répartit les produits et les locations en classes tel que le cycle moyen d'une commande soit minimisé. L'algorithme fonctionne pour tout type de demande (fonction), toutes unités de mesure des déplacements, tout type d'agencement d'atelier et tout type d'organisation des points d'entrée et de sortie d'entrepôt. Le modèle utilise les notations suivantes :

$Q_i$  : Variable aléatoire indépendante qui représente le nombre d'unités disponibles d'un produit  $i$  à une époque ou période donnée (arbitraire).

$P_k$  : Ensemble de produits dans la classe  $k = 1, \dots, K$ .

A cause de la demande et du processus d'approvisionnement, les niveaux de stock fluctuent. Pour la méthode, l'espace de stockage nécessaire est défini de telle sorte que l'espace de stockage dans toutes les classes suffit pour au moins une fraction  $0 < \alpha < 1$  du temps. En d'autres termes, la probabilité qu'un stock déborde est inférieure à  $1 - \alpha$ .

Soit  $Q^k$  une variable aléatoire représentant le niveau de stock d'une classe  $k$  à une période donnée, c'est-à-dire :  $Q^k = \sum_{i \in P_k} Q_i$ .

La méthode consiste à trouver la plus petite taille  $S^k$  pour la région d'une classe  $k$  tel que  $P(Q^k \leq S^k) \geq \alpha$ . Soit  $t_j^{in}$  le temps de trajet entre l'entrée de la station et la localisation  $j$ . Soit  $t_j^{out}$  le temps de trajet entre la sortie de la station et la localisation  $j$ . Chaque unité stockée est recherchée quelques temps après.

Globalement, l'autre méthode fait l'hypothèse que sur une longue période, la moitié du temps d'un cycle de commande simple est consacrée au stockage alors que l'autre moitié est dédiée au prélèvement. Le temps moyen de cycle d'une commande simple à localiser

en  $j \in L$  est  $\frac{1}{2}(2t_j^{in} + 2t_j^{out}) = (t_j^{in} + t_j^{out})$ .

Le temps de cycle d'une seule commande  $E(SC)$  est défini ainsi :

$$E(SC) = \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i \in P_k} E(Q_i)}{\sum_{i \in P} E(Q_i)} \sum_{j \in L_k} \frac{(t_j^{in} + t_j^{out})}{|L_k|}$$

où  $L_k$  représente l'ensemble des localisations de stockage. Le premier terme représente la probabilité qu'une requête concerne la classe  $k$ . Le second terme représente le temps moyen de trajet jusqu'à la localisation  $k$ .

Afin de réduire au minimum la durée de cycle prévue d'une commande simple, le produit  $i$ , représentant la plus grande demande par espace de réservation, est assigné à l'emplacement  $j$  avec le plus petit temps ( $t_j^m + t_j^{out}$ ) à la première classe. Il affecte les produits  $i$ , représentant la plus grande demande suivante par espace réservé, aux emplacements  $j$  avec le prochain plus petit ( $t_j^m + t_j^{out}$ ) à la deuxième classe, et ainsi de suite.

En conséquence, les endroits sont rangés selon l'ordre non décroissant ( $t_j^m + t_j^{out}$ ) et les produits sont rangés selon une demande non croissante par espace réservé. Il définit le terme  $g_k(p, l)$  comme la contribution des classes  $1, \dots, k$  à l'équation de  $E(SC)$ , quand les produits  $1, \dots, p$  et les emplacements de stockage  $1, \dots, l$  sont distribués parmi des classes tels que  $g_k(p, l)$  est minimal.

Ainsi,  $g_k(p, l)$  satisfait l'équation suivante :

$$g_k(p, l) = \min_{1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq l} \{h_{i+1, p}^{j+1, l} + g_{k-1}(i, j)\}$$

où  $h_{i+1, p}^{j+1, l}$  dénote la contribution à l'équation de  $E(SC)$  si les produits  $i+1, \dots, p$  et les emplacements  $j+1, \dots, l$  d'une classe  $k$ . Le nombre d'emplacements exigés dans chaque classe est déterminé par l'équation  $P(Q^k \leq S^k) \geq \alpha$ , les valeurs de  $g_k(p, l)$  sont déterminées itérativement en résolvant l'équation de programmation dynamique  $g_k(p, l) = \min_{1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq l} \{h_{i+1, p}^{j+1, l} + g_{k-1}(i, j)\}$ . Chaque  $g_k(p, l)$  correspond à une solution optimale de sous-problème avec  $k$  classes, les premiers  $p$  produits et les premiers  $l$  emplacements de stockage une fois rangés comme il est indiqué auparavant.

L'algorithme présenté ci-dessus peut être employé pour déterminer la répartition optimale des classes pour  $1, \dots, K$  classes. Ainsi, le nombre de classes choisi parmi  $1, \dots, K$  constitue une solution avec un temps de déplacement moyen et un dimensionnement de l'espace d'entreposage acceptable.

Dans une étude de cas particulier effectuée sur un centre de distribution de la compagnie Yamaha Motor Co. installée à l'aéroport d'Amsterdam, la méthode dite de (*based-class strategy*) présentée ici a permis une réduction de temps de déplacement dans le centre d'entreposage de plus de 10%, en se plaçant, en terme de performances, devant de nombreux autres.

### 3 Problème de lot-sizing : approvisionnement, dimensionnement et regroupement

Le regroupement de produits en lots et la détermination de leur date de disponibilité dans un système donné, sont appelés problèmes de regroupement des besoins ou problèmes de *lot-sizing*. Ces problèmes se posent généralement lors du développement de politiques d'approvisionnement ou de production. L'objectif principal de la résolution de ces problèmes pour une entreprise est la minimisation des coûts de transport dans le cas des livraisons ou des coûts de lancement pour la fabrication. D'un autre côté, celle-ci se

préoccupe de la minimisation des coûts induits par ses stocks. Elle cherche alors à déterminer les quantités à livrer ou à produire pour minimiser les coûts de lancement tout en assurant une disponibilité minimum d'articles en stock.

#### 4 Entrepôt et informatique

Une étude a montré en 1997 que moins de 4% des entrepôts disposaient d'un logiciel de gestion d'entrepôt avec un seuil au maximum de 15% actuellement [35]. Ce constat alarmant sur le WMS (*Warehouse Management System*) est dû en grande partie à la complexité des problèmes de gestion d'entrepôts. Pour remédier à cette situation, des recherches et des développements de logiciels ou de Prologiciels sont en pleine expansion.

Pour bien répondre aux besoins de l'entrepôt, il est nécessaire de tracer les frontières entre la gestion des stocks et l'entrepôt. Les travaux de Roux [35] et de Bourgeois [7] donnent un aperçu très intéressant sur la représentation de l'entrepôt et de ses limites.

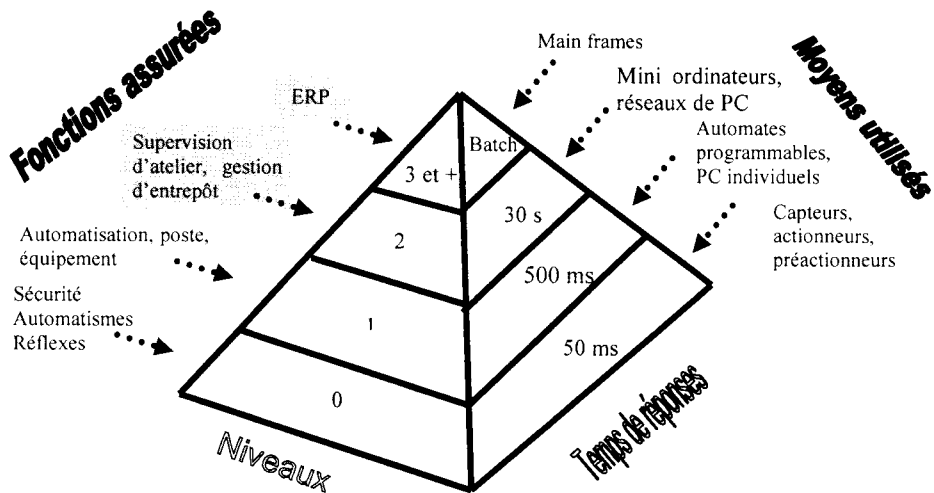


Figure 30 : Pyramide CIM [35]

La pyramide du CIM (Computer Integrated Manufacturing) est un concept de la fin des années 80 qui permet de hiérarchiser les différentes fonctions informatiques ou d'automatismes en les classant par niveau donc une analyse fonctionnelle du processus. Le niveau 0 correspond à tous les capteurs et actionneurs installés sur une machine ou un équipement. Le niveau 1 correspond à l'automatisme d'une machine ou d'un poste de travail. Le niveau 2 correspond au pilotage et à la supervision d'un atelier ou d'un magasin et ainsi de suite jusqu'au niveau 7 qui fédère plusieurs usines. Au-delà du niveau 3, on retrouve des approches et des représentations en ERP (*Enterprise Requirement Planning*) avec intégration totale des différentes composantes du système. Une partie de cette pyramide est représentée dans la Figure 30.

Selon les différentes présentations, il faut distinguer la gestion des stocks et la gestion des entrepôts. On peut affirmer que la gestion des stocks est responsable du quoi, combien, quand et de quel prix. La gestion d'un entrepôt est responsable du où, comment et quand sur un horizon de temps à très court terme quasi temps réel. La gestion des stocks se situe au niveau 3 (pilotage) alors que la gestion des entrepôts est au niveau 2 (automatisme et gestion temps réelle).

L'outil informatique à mettre en place doit prendre en compte les différents paramètres entrant dans la représentation, la matérialisation et la gestion de l'entrepôt. Les différents points, présentés tout au long de ce document, doivent être pris en compte que se soit : les modes d'identification, de contrôle, de vérification, de niveau d'intégration d'automatisation, etc.

Sur le marché, il existe énormément de logiciels et d'offres commerciales dédiées. Chez quelques éditeurs de logiciels intégrés de niveau 3 (ERP, GPAO (Gestion de Production Assistée par Ordinateur)), les produits sont des modules pour l'entrepôt libellés WMS. Généralement quelques fonctions élémentaires extrêmement basiques y sont développées. Mais, les évolutions sont permanentes et très rapides.

Concernant l'implantation du logiciel, trois solutions sont possibles :

- Un ordinateur central unique ou station (*main frame*) qui regroupe toutes les informations et les applications de la société. Le système d'exploitation est de type Unix ou Linux ou toute autre système d'exploitation de gros calculateurs.
- Un réseau multiposte de type PC. C'est la première voie proposée par les fournisseurs car elle est facile à installer et à entretenir. Le système d'exploitation des PC est de type Windows.
- Un schéma hybride station et PC. C'est une forme intermédiaire qui est la plus largement utilisée actuellement mais elle nécessite un besoin en expertise, pour la gestion et l'entretien.

## 5 Analyses et commentaires

L'entrepôt est un lieu stratégique de tout système de production (fabrication, service, distribution,...). Que les produits entreposés soient de la matière première, des produits semi-finis ou finis, des règles doivent être rigoureusement dictées et respectées. Il faut également prendre en compte les règles de réception, de placement et de cheminement interne. Il est important de pouvoir accéder rapidement aux produits en un minimum de temps et de mouvements. Le dimensionnement, le dénombrement et la localisation optimale des entrepôts sont des problèmes difficiles et nécessitant l'utilisation de méthodes parfois extrêmement sophistiquées. Les solutions obtenues sont souvent un compromis entre les coûts, les politiques et la satisfaction des besoins.

La réduction des coûts voir même l'élimination de cette activité ou du moins son remplacement par des solutions externes avec des coûts plus avantageux (une proportionnalité entre la quantité traitée et le coût) sont des solutions largement envisagées.

Une allocation sophistiquée, basée sur les classes (*class-allocation*), mène à un niveau de service global plus élevé, car l'espace d'entrepôt est mieux employé.

Un niveau de service élevé de l'entrepôt et un temps de réponse plus rapide permettent une optimisation (épargne additionnelle) de flux en aval de la chaîne logistique. Par exemple, dans le cas de l'entrepôt de production fournissant une chaîne de montage à deux casiers, des temps de réponse plus courts peuvent de manière significative réduire le montant total des actions placées suivant la ligne. Dans l'industrie alimentaire et le secteur au détail, où beaucoup de magasins ont été transférés vers la livraison en juste à temps, il y a une pression constante pour améliorer des temps de réponse des entrepôts. Rappelons

l'exemple de la firme *WALL MART*, une chaîne de distribution au Etats-Unis d'Amérique qui a adopté le *cross-docking* (recevoir, trier, regrouper, et charger) comme principe de base dans leur chaîne d'approvisionnements, par opposition au stockage conventionnel dans des entrepôts de distribution.

Par conséquence, l'intérêt pour de nouvelles techniques sophistiquées de tri se développe rapidement. ICA, la principale chaîne de supermarchés en Suède fonctionne avec des robots pour la gestion de leurs entrepôts et de leur stockage/déstockage. Ces robots peuvent manipuler une grande variété de produits et de conditionnements (boîtes,...). ICA essaye de se positionner vers la livraison en juste à temps.

Cela n'est qu'un début. L'introduction des achats électroniques et de la commande par Internet changera radicalement la chaîne d'approvisionnements de logistique et mènera au changement fondamental de la gestion des stocks.

Une commande pour les meilleurs produits de consommation a une durée moyenne de livraison de 2,5 jours hormis les 24 heures pour la fabrication, l'assemblage, l'expédition et l'entreposage des étagères du magasin de détail, ainsi que le temps moyen de manutention en production, en entreposage et de transport. Une telle importance, dans le futur, met une pression énorme sur l'organisation de la planification, le contrôle de l'entrepôt, la manipulation des matériaux, la fabrication et l'assemblage. En effet, certaines compagnies sont en complète réorganisation (*re-engineering*) de leurs systèmes de fabrication en introduisant le principe de point directeur d'utilisation (*use point manager concept*) dans lequel l'entreposage, la manutention, l'assemblage et l'emballage sont complètement intégrés en cellules indépendantes. Ces tendances telles que le transbordement (*cross-docking*) et les achats électroniques enlèvent des étapes intermédiaires dans la chaîne d'approvisionnements et mènent à remplacer les entrepôts de production par des entrepôts de distribution.

# Chapitre III

## La manutention

### 1 Généralités

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu technique des différents équipements de manutention avec leur particularité technique, leur domaine d'application et les lieux d'utilisation. Ce chapitre est organisé de la façon suivante. La première partie traite des généralités en donnant des définitions et en précisant le positionnement de la manutention dans l'ensemble du système industriel. Les aspects technologiques sont abordés dans les parties suivantes. Des critères de choix ainsi que des éléments de normalisation sont indiqués. L'ensemble du chapitre est illustré de nombreux exemples concrets et intègre une bibliographie complète. Parmi les ouvrages référencés dans le domaine, qui ont d'ailleurs été pris comme support principal de ce chapitre, on peut citer l'ensemble des articles sur la manutention publiés dans les Techniques de l'Ingénieurs [38]. Les photographies des équipements sont obtenues à partir d'un site internet sur la manutention (<http://www.directindustry.com>).

#### 1.1 Définitions

La priorité des entreprises a été axée pendant longtemps sur les moyens de production, mais elle se concentre de plus en plus sur les fonctions logistiques qui se situent en amont et en aval de ces moyens. Cette logistique assure en effet le flux de produits traversant l'entreprise et pour remplir des objectifs de productivité, elle doit disposer bien entendu de ressources humaines et pécuniaires mais également de ressources matérielles tel que du matériel de manutention, de transport, de stockage et de conditionnement. On peut admettre que la logistique, c'est prévoir, posséder, gérer, et mettre à disposition des moyens pour amener un produit en un lieu précis, dans les temps prévus, et tout ceci avec un coût optimal.

Les coûts logistiques représentent entre 20 et 30% de la valeur d'un produit dans l'industrie manufacturière et l'industrie alimentaire. Ces coûts peuvent dans certains cas atteindre les 40%. On comprend alors très bien les efforts à effectuer dans ce domaine afin de réduire ces coûts.

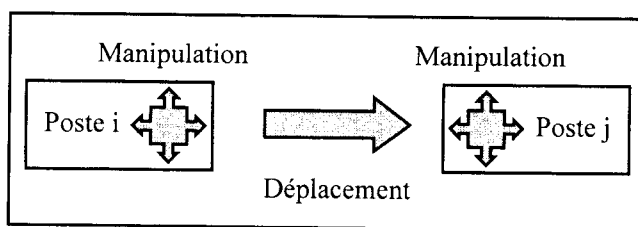
Avant toute description technique, le terme manutention signifie étymologiquement tenir manuellement (du latin *manus*, main et *tenere*, tenir). Voici une définition du dictionnaire :

Définition (*Petit Robert*) : Manutention : Manipulation, déplacement manuel ou mécanique de marchandises, en vue de l'emmagasinage, de l'expédition ou de la vente.

La manutention est donc l'ensemble des activités matérielles et des mouvements qui tout en ne modifiant ni la valeur, ni la nature des produits contribue à leur fabrication dans les meilleures conditions de qualité, rapidité, sécurité et efficacité. Dans ce contexte, une manutention comprend :

- Une manipulation pour prendre l'objet
- Un déplacement de l'objet d'un poste à un autre

- Une manipulation pour déposer l'objet au poste de travail.

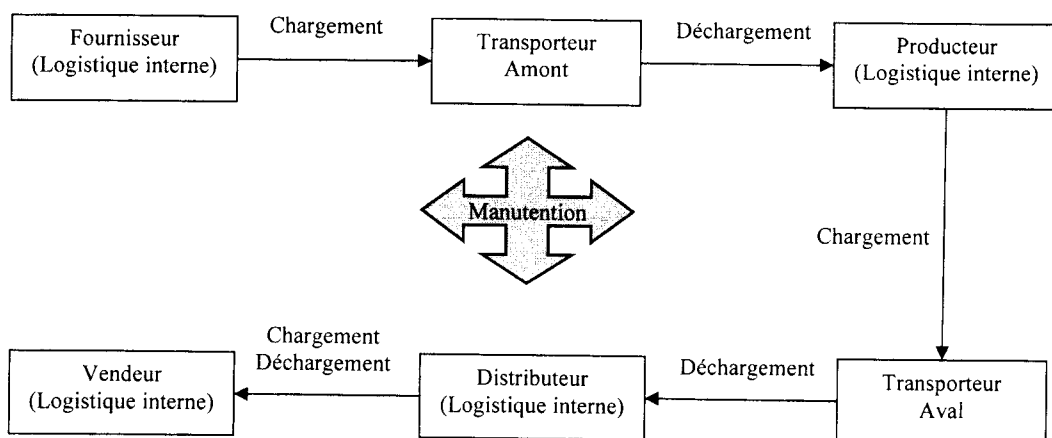


*Figure 31 : Activités de la manutention*

## 1.2 Positionnement de la manutention

### Dans la chaîne logistique globale

Outil indispensable dans un système de production, la manutention intervient dans l'ensemble de la chaîne logistique (*supply chain*) qui s'étend du fournisseur des fournisseurs (*suppliers*) au client des clients (*customers*) en passant par les transporteurs, les producteurs, les distributeurs (*retailers*) et les vendeurs. La Figure 32 montre le positionnement de cette manutention dans l'ensemble de la chaîne logistique.



*Figure 32 : Positionnement de la manutention dans la chaîne logistique*

### Dans le cycle de vie de produit

La manutention intervient également dans l'ensemble du cycle de vie du produit. Comme il est décrit précédemment, la manutention agit physiquement sur le produit en le déplaçant d'un point à un autre. Mais, tout au long du cycle de vie du produit, celui-ci agit sur le choix et le dimensionnement des éléments de manutention.

### Conception du produit (bureau d'études)

Dès la phase de conception, certaines caractéristiques sont fixées et elles auront une grande influence sur le coût des opérations de manutention et de transport. On peut citer comme caractéristiques, le poids, le volume et la fragilité. Ces caractéristiques vont ensuite influencer le type et les moyens de manutention à employer. Dans la grande majorité des cas, on conçoit déjà le produit puis on effectue l'implantation des machines



de fabrication et par conséquent des chemins de manutention. Cette implantation est alors soumise aux contraintes de conception du produit. Il est alors possible d'effectuer une conception intégrée des composants du produit et de l'implantation des machines. On réduit ainsi les coûts de manutention des matières. En effet, à partir de différentes alternatives de conception des composants du produit et donc des gammes de production, il est possible d'évaluer en terme de coût la gamme la plus économique en flux de manutention. On détermine ainsi une implantation optimisée des machines de fabrication.

### **Conception et implantation des moyens de production (Méthodes)**

Lors de la phase de conception et de l'implantation des machines de fabrication, le bureau des méthodes doit tenir compte des contraintes de manutention. Ces contraintes doivent influencer le positionnement des machines, des postes de travail, des zones de stockage et des bâtiments. En effet, on peut se trouver dans une situation où l'espacement entre les machines, les dimensions du poste de travail, le positionnement de la structure du bâtiment (poteaux, murs) peuvent gêner ou même empêcher le déplacement des éléments de manutention. Ce peut être également des bornes incendies, des canalisations d'énergie (gaz, air comprimé, eau, ...), des sorties de secours qui réduisent les espaces libres prévus. Inversement, lors de ces phases d'études, il est nécessaire de réserver des emplacements et des moyens pour l'alimentation en énergie, le stationnement et la maintenance des éléments de manutention.

### **Fabrication**

La manutention est bien entendu fortement liée à la fabrication car c'est elle qui produit le déplacement des produits dans l'atelier, et donc gère le flux de produits entre les postes de travail (i.e. fabrication, assemblage, conditionnement, expédition) et/ou les zones de stockage. La manutention doit parfaitement s'intégrer à la fabrication. Toutes modifications des conditions de production peut avoir des répercussions importantes. Faut-il constituer un stock en prévision de l'arrêt d'une machine ? Faut-il évacuer les lots non conformes et où stocker temporairement ces lots en attendant une évacuation définitive ou une mise en conformité. De même, la manutention devra s'adapter aux changements de cadences, des horaires de travail, de l'implantation, des équipements et des conditions de desserte d'une machine. Dans tous les cas, la manutention doit être réactive afin d'éviter tout incident.

### **Démantèlement/recyclage**

Cette phase finale du produit dans son cycle de vie fait bien entendu intervenir de nombreux moyens de manutention. On se retrouve dans le même contexte que la phase de fabrication, mais dans un processus inverse de production. La manutention reste toujours un acteur majeur tant en terme de coût qu'en terme technique. Le produit ayant perdu une grande partie de sa valeur commerciale, voire toute sa totalité, les coûts de manutention voient leur ratio s'imposer dans les coûts totaux de recyclage. Du côté technique, les opérations de recyclage nécessitent souvent le développement d'outils spécifiques de manutention (outils de préhension, chariots évoluant dans des ambiances agressives, manutention continue, etc.).

## 2 Classification des matériels de maintenance

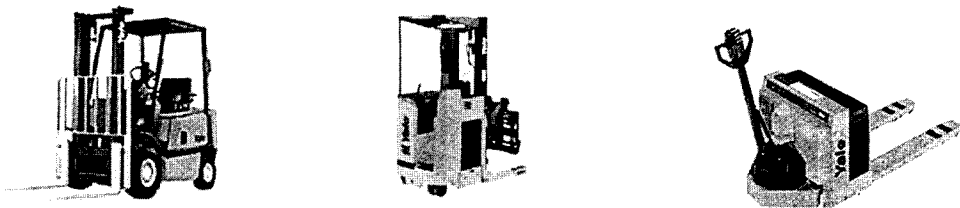
Les matériels de maintenance sont exclusivement utilisés pour le déplacement horizontal ou vertical des matières premières, des produits semi-finis ou des produits finis. On exclut des matériels de maintenance les moyens destinés au déplacement du public tels que les ascenseurs, les escaliers mécaniques, les trottoirs roulants, les téléphériques, les remonte-pentes, etc.

On dénombre cinq grandes familles de matériels :

- Chariots de maintenance.
- Appareils de levage.
- Matériel de stockage.
- Matériel de maintenance continue.
- Matériels de maintenance spécifiques.

## 3 Les chariots de maintenance

Les chariots de maintenance sont les moyens les plus utilisés pour le déplacement de produits. Leur adaptabilité et leur mise en œuvre rapide en font un investissement stratégique pour permettre à l'entreprise de réagir plus rapidement aux fluctuations du marché. La solution d'utiliser des chariots, par rapport à une installation fixe (tapis roulant), permet d'étaler les frais d'investissement et de s'adapter facilement aux nombreuses modifications du système industriel (processus de production, disposition des machines, caractéristiques des produits, disponibilité des ressources). La solution de location peut être facilement envisagée. Elle empêche un investissement et permet de réagir rapidement en cas d'imprévu (production saisonnière ou irrégulière) ou de défaillances de matériel.



*Figure 33 : Exemples de chariots de maintenance [44].*

### 3.1 Critères de sélection

Les chariots de maintenance sont classifiés suivant une directive (C165 du 2/07/79) et selon 6 critères :

- Le mode d'action : porteur, tracteur, élévateur.
- La hauteur d'élévation : sans levée, petite levée (uniquement pour les déplacements et sans gerbage), grande levée.
- Le mode de conduite : sans conducteur, avec conducteur à pied (dirigé par un timon), avec conducteur porté (en position assise ou debout dans le sens de la marche ou transversalement).
- Le mode de déplacement : libre unidirectionnel, libre bidirectionnel, guidé, automatique (sans conducteur).

- La source d'énergie : thermique (moteur à essence, gaz de pétrole liquéfié, diesel), électriques (batteries d'accumulateur).
- La nature du garnissage des roues : bandage pneumatique ou pneus, bandage à section pneumatique (pneus pleins), bandage plein en caoutchouc naturel, synthétique ou en polyuréthane.

Le choix d'un matériel de manutention ne se fait pas uniquement sur la base des caractéristiques techniques mais doit être l'aboutissement d'une étude plus complète qui prenne en compte les aspects organisationnels et les méthodes de travail. Une analyse fonctionnelle de type APTE permet de définir et de quantifier les différentes fonctions que doit accomplir le chariot dans l'entreprise. Ce type d'étude systémique évite d'omettre des fonctions importantes.

Parmi les critères à renseigner pour ce choix, on peut citer :

- Les caractéristiques des charges : le poids, les dimensions, le centre de gravité pour prendre en compte les déports, la fragilité aux secousses.
- L'analyse des tâches : la hauteur de gerbage qui permet avec le poids des charges de calculer les caractéristiques du mat élévateur (double, triple ou quadruple) ou le type de levé (libre, réduite ou totale), la distance à parcourir.
- L'environnement et les contraintes : réduction des nuisances pour l'utilisateur, réduction de la pollution pour l'environnement, qualité des sols (planéité, propreté, adhérence), protection contre les ambiances agressives (corrosion, abrasion, température, ...), les contraintes ergonomiques (minimiser les accidents et les problèmes de posture du conducteur).

Pour information, les hauteurs d'élévation varient de 0 à 14 mètres sur bon sol et de 0 à 10 mètres sur sol difficile.

### 3.2 Réglementation et normalisation

Les chariots de manutention automoteurs sont régis par un nombre important de réglementations et de normes qui sont imposées en national, en communauté européenne et à l'international. Ceci est en grande partie dû au fait de l'interaction très forte avec l'homme qu'il soit conducteur du chariot ou bien spectateur sur le lieu de travail. Ces textes sont différenciés suivant la construction ou l'utilisation.

Pour la construction, les textes sont ceux de la directive européenne n°98/37/CE du 22 juin 1998 et ceux de la loi française n°91/1414 du 31 décembre 1991.

Pour l'utilisation, les textes sont la directive européenne n°89/655/CE du 30 novembre 1989 complétée par la directive n°95/63/CE du 5 novembre 1995. Pour la loi française, les textes sont repris dans le décret n°98/084 du 2 décembre 1998. Les différentes obligations portent sur :

- Le choix des équipements de travail.
- L'aménagement des lieux de travail (sol, allée, pente, recharge des batteries, aération des locaux).
- Conditions de travail particulières (atmosphères explosives, chambre froide, ambiance corrosive ou poussiéreuse, élévation de personnes).
- Lieu d'utilisation spécifique (chantiers du bâtiment public, exploitation agricole, industrie alimentaire, voie publique).

- Règles d'ergonomie et de conditions de travail (protection du cariste, ergonomie, accès au chariot, protection des personnes tiers, ...).
- Information et formation des caristes : nécessité d'avoir le certificat d'aptitude à la conduite en sécurité pour les chariots avec conducteur porté.
- Examens, vérifications : 6 mois pour les chariots élévateurs à conducteur porté ; 12 mois pour les chariots élévateurs à conducteur accompagnant.
- Assurances obligatoires.

Les caristes sont les personnes qui conduisent les chariots de manutention automoteurs.

### 3.3 Technologie

La première caractéristique technologique des chariots automoteurs à prendre en considération est le mode d'énergie. On s'aperçoit en définitive que ce sont le plus souvent les considérations de conditions de travail et de disponibilité plutôt que les facteurs économiques qui emportent la décision.

Le mode d'énergie est de 2 types : thermiques ou électriques. Le premier critère de choix concerne évidemment l'hygiène et les conditions de travail. En effet, les chariots thermiques (GPL ou Diesel) ne peuvent être utilisés que dans des entrepôts aérés.

#### Chariot électrique

Pour les chariots électriques, l'élément essentiel est bien entendu la batterie. Il s'agit pour la plupart du temps de batteries au plomb qui suivant les performances du chariot ont des tensions de 24V à 80V. Les tensions les plus utilisées sont 24V, 48V et 80V. La capacité d'une batterie est la quantité d'électricité qu'elle peut restituer et cela dépend de nombreux paramètres comme la rapidité de décharge (intensité du courant de décharge), la concentration de l'électrolyte et enfin la température (l'élévation de température facilitant le déplacement des ions dans la solution).

L'influence de la température doit être bien prise en compte pour les appareils travaillant en ambiance froide (entrepôts de produits réfrigérés et congelés, période hivernale). Il faut veiller à ne pas laisser un appareil de manutention électrique dans cette ambiance froide surtout si la batterie à un niveau de charge assez faible.

La durée de vie d'une batterie s'exprime en nombre de cycle de charge et décharge et non en années de service. La valeur moyenne de cette durée de vie est de 1500 cycles et la garantie du constructeur est de 1200 cycles.

La recharge des batteries nécessite des postes de charge dont la fonction est de transformer le courant alternatif du secteur en un courant continu de tension appropriée. Il est bien entendu nécessaire d'avoir un local prévu à cet effet, ceci en respectant les conditions de sécurité relatives aux risques d'explosion.

#### Chariot thermique

Il n'existe presque plus de moteur à explosion avec une alimentation de type essence ou diesel. Cette alimentation est exclusivement au gaz et plus particulièrement en France au GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) et pour les engins de très forte capacité au GN (Gaz Naturel). Le GPL est un mélange de propane et de butane, il permet une carburation satisfaisante à toutes les températures. Il est stocké à l'état liquide sous une pression de 3 à 4 bars. Il est approvisionné soit en vrac, soit en bouteille de 13 kg. Le Gaz Naturel est du

méthane quasiment pur, il est stocké dans des réservoirs sous des pressions de 300 à 1000 bars. Cet inconvénient limite son application aux engins de forte puissance.

La très bonne homogénéité du mélange air/carburant améliore la stabilité du ralenti moteur et la nervosité en reprise. Les moteurs sont plus souples et moins bruyants. Cette carburation au gaz offre l'avantage de réduire fortement la pollution (oxyde d'azote, résidus d'hydrocarbure) et de supprimer les composés soufrés. L'entretien du moteur est moins délicat que celui d'un diesel. L'utilisation par temps froid n'est pas soumise aux risques de figeage, ni au risque de givrage du carburant. L'autonomie avec une bouteille est de 10 heures de travail pour un chariot de 1 à 1,5 tonnes et de 8 heures pour un chariot de 2,5 tonnes.

### **Transmission**

La transmission doit permettre d'adapter le couple transmis à la conduite dans les allées, mais également de réaliser un déplacement à vitesse lente tout gardant de la puissance pour élever la charge. C'est une phase un peu paradoxale du chariot de manutention, car il faut, au même instant, beaucoup de puissance pour le levage et beaucoup de souplesse pour le déplacement et le positionnement du chariot.

Les chariots modernes sont à transmission soit hydrodynamique à convertisseur de couple, soit hydrostatique avec une pompe et un moteur à haute pression. On peut toutefois trouver sur des chariots anciens, des boîtes de vitesses avec des embrayages à sec ou dans l'huile. Il suffit de débrayer progressivement tout en accélérant pour l'élévation.

La transmission hydrodynamique comporte un embrayage multidisques dans l'huile avec une commande hydraulique pour chaque rapport de vitesse. Une pédale permet de réduire progressivement la pression de l'huile de commande des embrayages et donc de mettre en glissement les disques et ainsi de réduire la vitesse.

La transmission hydrostatique est composée de pompes et de moteurs à pistons longitudinaux. Cette solution fait appel à des composants de haute technologie qui fonctionnent à des pressions de 500 bars. La variation de la vitesse s'effectue par une variation du débit du fluide. Les composants hydrostatiques nécessitent des précautions particulières pour l'entretien et la maintenance mais gardent une excellente fiabilité et une grande longévité.

### **Allée de circulation et de gerbage**

Les allées de circulation et de gerbage doivent être distinguées. Leur disposition est un facteur important de sécurité. La largeur des allées permanentes de circulation doit être au moins égale à :

- Pour une circulation en sens unique : la largeur d'un chariot ou de son chargement plus 1 mètre.
- Pour une circulation à double sens : la largeur de 2 chariots ou de leurs chargements plus 1,4 mètres.

Les allées réservées aux opérations de stockage et de gerbage ne sont pas considérées comme des allées de circulation.

Pour effectuer une opération de gerbage, les chariots de manutention doivent effectuer une rotation de 90°, sauf bien entendu pour les chariots à prise latérale. Ce virage nécessite une allée qui puisse permettre cette manœuvre sans danger et sans ralentissement excessif.

### 3.4 Dimensionnement de flotte

Le but de ce dimensionnement est de déterminer le nombre de chariots de manutention (appelé flotte) à installer dans une structure industrielle, de type atelier, quai de chargement et de déchargement ou entrepôts de stockage. Deux approches sont possibles : déterministe ou stochastique. L'approche déterministe est basée sur une arrivée des tâches de manutention à réaliser connue à l'avance. On considère comme tâches de manutention, les différentes opérations de manutention demandées à un chariot (chargement – déplacement à charge - déchargement – déplacement à vide). Les temps opératoires sont également connus et déterministes. L'approche stochastique utilise des lois stochastiques pour modéliser l'arrivée des tâches de manutention ainsi que les temps opératoires. Les arrivées de tâches ne sont donc pas connues à l'avance.

#### Approche déterministe

L'approche déterministe peut se résoudre en utilisant un diagramme de Gantt. Pour décrire cette approche, on considère un exemple de quai de chargement et de déchargement de produits. Le planning d'arrivée des camions à charger ou à décharger est donné sur un horizon fixé (quotidien, hebdomadaire, mensuel). Les temps opératoires de chargement et de déchargement des camions sont également connus. Le but est alors de déterminer le nombre de chariots nécessaire pour effectuer ces tâches de manutention.

La résolution de ce dimensionnement s'effectue en déterminant le diagramme de Gantt des arrivées des camions et des opérations de chargement et déchargement. Le processus est le suivant :

- Découper l'horizon d'étude en  $n$  périodes identiques
- Positionner les  $m$  opérations de manutention suivant leur date d'arrivée et leur durée d'exécution.
- Effectuer la somme  $x_i$  des opérations pour chaque période  $i$  de l'horizon.

Le nombre de chariots optimum à utiliser sur le quai si on veut éviter une attente des camions est donné par la relation :

$$\text{Nombre optimum de chariots} = \max (x_i), \quad i = 1 \text{ à } n$$

Avec  $n$  le nombre de périodes.

Le Tableau 10 donne un exemple de chronogramme des activités de manutention sur un quai de chargement/déchargement.

Camion	Période 1	Période 2	---	Période $n-1$	Période $n$
$C_1$					
$C_2$					
...					
$C_i$					
...					
$C_m$					
Nb. de camions au quai par période	$x_1$	$x_2$		$x_{n-1}$	$x_n$

**Tableau 10 :** Chronogramme des opérations de manutention sur un quai

A partir de ce premier calcul, on peut optimiser les dates d'arrivée des camions afin de minimiser le nombre maximum de chariots. Dans ce cas, le quai doit imposer aux transporteurs des plannings d'arrivée. L'approche déterministe proposée ici est volontairement simple et facile à mettre en oeuvre mais le problème de dimensionnement de flotte peut générer des modèles et des méthodes de résolution beaucoup plus complexes.

### Approche stochastique

Dans l'approche stochastique, les dates d'arrivée des tâches ainsi que les temps opératoires de manutention ne sont pas connus à l'avance. Cette approche stochastique peut utiliser les réseaux de files d'attente car ils permettent de modéliser aisément des processus d'arrivée et de traitement stochastiques. Les dates d'arrivée des tâches et les durées des opérations de manutention sont des variables aléatoires distribués suivant des lois stochastiques (processus de Poisson, loi exponentielle, loi uniforme, loi normale, ...). Le modèle donne en résultat, le nombre moyen de tâches en attente, le nombre moyen de chariots de manutention en activité et le temps moyen d'attente d'une tâche avant traitement. Suivant le nombre de chariots mis à disposition, ces résultats varient et on peut aisément déterminer le nombre optimum de chariots à utiliser. Attention, les résultats sont obtenus pour un régime permanent du système, c'est-à-dire sur un fonctionnement à long terme.

Reprenons l'exemple décrit au paragraphe précédent. On considère que les arrivées des camions sont des variables aléatoires distribuées suivant un processus de Poisson. Les temps de déchargement et de chargement des camions sont également des variables aléatoires distribuées suivant une loi exponentielle. Le but est alors de trouver le nombre optimum de chariots sous une contrainte de temps d'attente fixé. On utilise alors une file d'attente de type M/M/S (notation simplifiée de Kendall).

- M : signifie que le temps entre les arrivées des camions suit un processus de Poisson (M signifiant Markov).
- M : signifie que le temps de service suit une loi exponentielle. Le temps de service correspond ici au temps de traitement du camion c'est-à-dire l'opération de chargement ou de déchargement.
- S : signifie que le nombre de serveurs est borné et est égal à S. La file d'attente est composée de plusieurs serveurs qui correspondent ici aux chariots de manutention.

Pour simplifier la résolution, on prend l'hypothèse que la capacité des serveurs est illimitée. Concrètement, on ne limite pas le nombre admissible de camions sur le quai.

La première étape est de calculer le nombre minimum de chariots afin d'éviter l'engorgement dans la file d'attente :

Pour éviter l'engorgement, il faut avoir :  $\frac{\lambda}{S \cdot \mu} < 1$ .

- $\lambda$  = taux d'arrivée des tâches (nombre de camions arrivant par unité de temps).
- $\mu$  = taux de service (nombre de tâches (chargement et déchargement) par unité de temps).
- S : nombre de chariots de manutention.

Le calcul de la longueur de la file d'attente et du temps de séjour sont obtenus à l'aide des relations suivantes :

La longueur moyenne  $Q$  de la file d'attente est de :

$$Q = \frac{\frac{\lambda}{\mu \cdot S} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^S}{S! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu \cdot S}\right)^2} \cdot P_0 + \frac{\lambda}{\mu}$$

avec  $P_0$ , la probabilité de n'avoir aucun camion au quai de chargement :

$$P_0 = \frac{1}{\frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^S}{S! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu \cdot S}\right)} + \sum_{i=0}^{S-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}$$

Le temps moyen de séjour  $T$  dans la file est de :

$$T = \frac{Q}{\lambda}$$

Ce temps comprend le temps d'attente plus le temps de traitement.

Pour obtenir le nombre de chariots optimum à installer, il suffit de faire varier le nombre  $S$  de chariots ;

Les critères de choix peuvent être multiples comme :

- Le nombre optimal de chariots afin d'éviter les chariots inactifs
- Le nombre optimal de chariots afin que le temps d'attente soit inférieur à  $X$  minutes.

A ces critères peuvent être ajoutés des contraintes de coûts.

### Exemple

- $\lambda = 4$  (4 camions arrivent en moyenne par heures).
- $\mu = 1,5$  (Il faut 40 minutes en moyenne pour décharger un camion donc 1,5 camions sont déchargés à l'heure).

A partir de ces données, on obtient le nombre minimum de chariots à installer pour éviter l'engorgement :  $S_{\min} = 3$ .

Le Tableau 11 donne les différentes valeurs de  $P_0$ , de la longueur de la file et du temps de séjour en fonction du nombre  $S$  de chariots sur le quai. Le calcul peut se faire avec une macro sous Microsoft Excel avec Visual Basic (Chapitre VIII).

Nb de chariots	$P_0$	$Q$	$T$	Attente
$S = 3$	0,0280	9,0467	2,262 (2h16)	96 min
$S = 4$	0,0599	3,4235	0,856 (0h52)	12 min
$S = 5$	0,0671	2,8514	0,713 (0h43)	3 min
$S = 6$	0,0689	2,7162	0,679 (0h41)	1 min

**Tableau 11** : Résultats de la file d'attente M/M/S

A partir de ces résultats, le dimensionnement de la flotte est facilité.



Il faut en effet prendre 4 chariots si on veut éviter les chariots inactifs, car avec 4 chariots, on a en moyenne 3,42 camions dans la file. Si on prend 5 chariots, on aura 2 chariots inactifs (2,85 camions en moyenne dans la file). Par contre, il faudra prendre 5 chariots si on veut avoir une durée d'attente (en moyenne) inférieure à 10 minutes. Attention, ces résultats sont obtenus sur un régime permanent du système.

### 3.5 Réception par lot

Les unités de production comme les unités de stockage reçoivent et libèrent des produits par lots. Ces lots sont regroupés sur des supports (palettes, bacs, ...) pour faciliter leur transport et leur manutention. Souvent les lots arrivent en même temps et des phénomènes de goulet d'étranglement apparaissent. Pour des raisons économiques, il est nécessaire de calculer le nombre de lots en attente ainsi que le temps d'attente des lots avant d'être transportés par les chariots de manutention. Ce problème peut être résolu par les files d'attente en considérant que les lots arrivent suivant un processus de Poisson (le temps entre chaque arrivée de lot est distribué exponentiellement) et que le temps de transport des lots est une variable aléatoire distribuée par une loi exponentielle. Si on ne dispose que d'un seul chariot de manutention, la file d'attente décrite par la notation de Kendall est la suivante [4] :

$$M^b / M / 1 / \infty$$

On note  $b$  le nombre de produits qui arrivent dans chaque lot. C'est une variable aléatoire. On considère que  $b$  est indépendant du temps entre les arrivées et du temps de service.  $\lambda$  est le taux d'arrivée des lots et  $\mu$  le taux de service. Les nombres moyens de lots et le temps moyen d'attente sont donnés par les relations suivantes.

- Le nombre moyen  $Q$  de lots dans la station :

$$Q = \frac{\lambda \cdot [v(b) + m^2(b) + m(b)]}{2 \cdot [\mu - \lambda \cdot m(b)]}$$

- Le temps moyen d'attente  $T$  des lots dans la station :

$$T = \frac{v(b) + m^2(b) + m(b)}{2 \cdot m(b) \cdot [\mu - \lambda \cdot m(b)]}$$

- Le nombre moyen  $Q_q$  de lots dans la file d'attente (hors service) :

$$Q_q = Q - \frac{\lambda \cdot m(b)}{\mu}$$

- Le temps moyen d'attente  $T_q$  des lots dans la file d'attente (hors temps de service) :

$$T_q = T - \frac{1}{\mu}$$

où  $m(b)$  est le nombre moyen de produits dans chaque lot et  $v(b)$  est la variance.

#### Exemple

Un entrepôt de stockage reçoit régulièrement des produits par lots sur des palettes. Le nombre de palettes par lots est aléatoire mais l'entrepôt connaît d'après une étude statistique que la moyenne est de 5 palettes par lot avec une variance de 4. Le processus d'arrivée des lots suit une loi de Poisson dont le taux d'arrivée est en moyenne de 10 lots par jour. Un seul chariot de manutention est disponible pour le stockage de ces palettes. Le temps moyen de rangement d'un lot de palettes est une variable aléatoire distribuée avec

une loi exponentielle de paramètre 0,01 jour. L'entrepôt désire connaître le nombre moyen de lots en attente ainsi que leur temps moyen d'attente avant manutention.

On utilise une file d'attente de type  $M^b/M/1/\infty$  avec  $\lambda = 10$ ,  $\mu = 100$  (1/0,01),  $m(b) = 5$  et  $v(b) = 4$ .

- Le nombre moyen de lots en attente est de :

$$Q = \frac{\lambda * [v(b) + m^2(b) + m(b)]}{2 * [\mu - \lambda * m(b)]} = \frac{10 * [4 + 25 + 5]}{2 * [100 - 10 * 5]} = 3,4 \text{ lots}$$

- Le nombre moyen de lots en attente d'être manutentionnés est de :

$$Q_q = Q - \frac{\lambda * m(b)}{\mu} = 3,4 - \frac{10 * 5}{100} = 2,9 \text{ lots}$$

- Le temps moyen d'attente d'un lot est de :

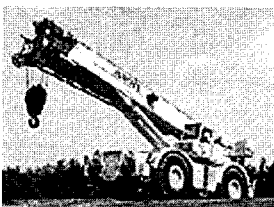
$$T = \frac{v(b) + m^2(b) + m(b)}{2 * m(b) * [\mu - \lambda * m(b)]} = \frac{4 + 25 + 5}{2 * 5 * [100 - 10 * 5]} = 0,068 \text{ jour} = 1,63 \text{ h} = 1 \text{ h } 37 \text{ min}$$

- Le temps moyen d'attente d'un lot avant d'être manutentionné est de :

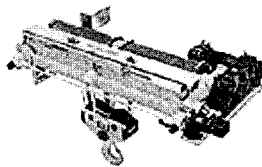
$$T_q = T - \frac{1}{\mu} = 0,068 - \frac{1}{100} = 0,058 \text{ jour} = 1,39 \text{ h} = 1 \text{ h } 23 \text{ min}$$

#### 4 Les appareils de levage

La fonction levage, d'après la directive européenne n°89/392 du 14 janvier 1989 correspond au changement de niveaux de charges ou de personnes, sans se limiter en hauteur de levage, minimale ou maximale. Les hauteurs de levage peuvent varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, voire exceptionnellement quelques centaines de mètres. Toutefois, les convoyeurs, transporteurs ou transpalettes ne sont pas intégrés dans les appareils de levage car la hauteur de levage est faible. La charge est levée uniquement pour faciliter le transport. Différents exemples d'appareils de levage sont représentés sur la Figure 34.



Grues motorisé



Treuil



Plate-forme

**Figure 34** : Exemples d'appareils de levage [44].

Les appareils de levage sont classifiés suivant le mode de levage de la charge. Cette charge peut être soit suspendue par un crochet ou un outil de préhension (pince, spreaders), soit soutenue par des fourches, des plates-formes, des plateaux.

#### 4.1 Levage suspendu

La charge levée est maintenue au moyen d'un crochet ou d'un outil de préhension. Ces outils sont accrochés à des câbles ou à des équipements. Ce type de levage soumet la charge à des mouvements parasites de balancement ou de rotation par rapport à son point ou son axe de suspension. Les différents appareils de levage à charges suspendues sont les suivants :

- Appareils légers : A bras (palans à engrenage, palan à levier, moufles, treuils, grues, portiques d'atelier, potence, chèvre) ou motorisés (palans électriques à câble ou chaîne, palans pneumatiques, treuils électriques, hydrauliques ou thermiques, monorails).
- Ponts roulants et portiques : ponts roulants mono ou bipoutres, poutres roulantes, portiques, semi portiques.
- Grues : grues à tour, grues repliables, grues sur chenilles, grues automotrices, grues sur camion, grues auxiliaires, grues de port, monte matériaux.
- Equipements de prise de charge : Élingues et accessoires d'élinguage, pince, grappins, cés de levage, fourches suspendues, palonnier, spreaders, électroaimants, ventouses.

#### 4.2 Levage soutenue

La charge levée repose sur un ou des supports standards ou spéciaux. Elle est maintenue de façon rigide et suivant une orientation fixe par rapport à l'équipement de l'appareil de levage. La charge est prise par-dessous et est reposée à l'endroit souhaité de la même manière. Les différents appareils de levage à charges soutenues sont les suivants :

- Chariots élévateurs à mat ou à flèche télescopique
- Transstockeurs, palettiseurs
- Plates-formes pour levage de personne : plates-formes et nacelles automotrices, plates-formes suspendues, plates-formes élévatrices mobiles, échafaudages mobiles.
- Matériel de mise à niveau : tables élévatrices, plates-formes fixes déplaçables, hayons élévateurs, rampes ajustables pour quais.

#### 4.3 Levage de personnes

Le levage de personne est classé dans le levage de charges soutenues. Ce type d'opération concerne les personnels de chantier et d'atelier, à l'exclusion de tout public. Ce levage est soumis à des règles de sécurité spécifiques. Les appareils de levage de personnes sont par exemple des nacelles sur bras télescopique ou repliable, nacelles mobiles sur plate-forme élévatrice, échafaudages suspendus. On exclut les ascenseurs, les monte-charges et les téléphériques.

#### 4.4 Caractéristiques

Les appareils de levage se caractérisent par leur mobilité. Ils peuvent être fixes, démontables, déplaçables ou mobiles, avec à chaque fois un degré relatif de mobilité.

- Les appareils fixes sont installés de façon définitive dans des structures stables et fixes (tables, plates-formes élévatrices de quai, échafaudage).

- Les appareils déplaçables travaillent à poste fixe. Ils sont équipés d'éléments permettant leur déplacement d'un point de travail à un autre, soit avec un autre moyen de manutention, soit avec des systèmes de roulement qui lui sont propres.
- Les appareils démontables travaillent à poste fixe. Ils sont transportés par éléments modulaires séparés d'un point de travail à un autre.
- Les appareils mobiles peuvent se déplacer en charge par leurs propres moyens ou avec une source d'énergie extérieure.

Les appareils de levage se caractérisent également par le type d'énergie utilisée. Cette énergie peut être soit humaine, électrique, thermique ou pneumatique.

- L'énergie humaine est bien entendu réservée pour les petits appareils qui disposent d'un système amplifiant les efforts (pompe, réducteur).
- L'énergie électrique peut se faire avec une alimentation secteur en moyenne tension (jusqu'à 5000V), une alimentation secteur basse tension (jusqu'à 500V) ou par une alimentation par batterie.
- L'énergie thermique est choisie pour son autonomie. Elle permet le plus souvent de produire une énergie hydraulique qui est plus adaptée aux mouvements des treuils et des vérins.

#### 4.5 Classification

Les appareils de manutention sont classifiés suivant un système rationnel permettant aux constructeurs de concevoir les structures et les mécanismes et pour les clients utilisateurs de sélectionner les matériels en fonction des conditions de service supposées. La classification des appareils de levage définie par la communauté européenne est l'ISO 4301. On retrouve la classification des appareils complets en groupes et la classification des mécanismes complets en groupes.

- La classification des appareils complets en groupes donne des classes d'utilisation de A1 à A8. Elle tient compte du nombre de cycles effectués pendant la durée de service totale prévue, calculée à partir d'un nombre moyen de cycles de service durant une période de référence (nombre moyen de cycles quotidien) et du nombre de périodes de références prévues pour la durée de vie.
- La classification des mécanismes complets en groupe donne des classes de M1 à M8. Elle tient compte de la durée de service totale prévue, en heures, calculée à partir d'une durée de service pendant une période de référence, en heures, et du nombre de périodes de références prévues pour la durée de vie du mécanisme.

Pour plus d'informations sur cette classification, il faut se reporter à la référence [38].

### 5 La manutention continue (*conveyor*)

La manutention continue assure le transport des charges sur des parcours fixes avec un mouvement continu. Il permet de traiter des flux sur un trajet prédéterminé. Les fonctions remplies par cette manutention sont diverses : réception, stockage, production, préparation de commandes, expédition. On retrouve cette manutention continue dans les entrepôts, les usines, les centres de recyclage, les aéroports ou bien les carrières. La manutention continue est caractérisée par la nature des flux transportés, la matérialisation des circuits et le déplacement des charges. Le fonctionnement de ces systèmes est réalisé soit par glissement en utilisant la gravité des produits transportés, soit par roulement à

l'aide de galets ou de rouleaux ou bien alors par adhérence avec des bandes roulantes. Les charges transportées sont de deux types : en vrac ou isolés. Suivant le type de charges, les appareils de manutention continue (ou convoyeur) se différencient.

### 5.1 Manutention continue pour charges isolées

Les charges isolées constituent la plus grande variété de produits rencontrés en manutention continue et on peut citer par exemple l'ensemble des produits conditionnés sous carton ou emballages plastiques avec les colis des centres de distribution (vente par correspondance) ou les chaînes de conditionnement. On retrouve également les valises dans les aéroports, les circuits imprimés dans l'industrie électronique ou les bouteilles dans l'industrie alimentaire. Les charges ont en général des dimensions plus importantes que les charges en vrac (quelques centimètres). Les équipements utilisés pour la manutention continue sont l'ensemble des convoyeurs (à bande, à rouleau libre ou motorisé, à galet, à chaîne), les carrousels et les transporteurs. La nature de la bande (tissu, synthétique) varie suivant le type de produits à transporter. La Figure 35 donne des exemples de convoyeurs à bande, à rouleaux, à bandes inclinées avec taquet et un système de tri de colis sur rouleau.

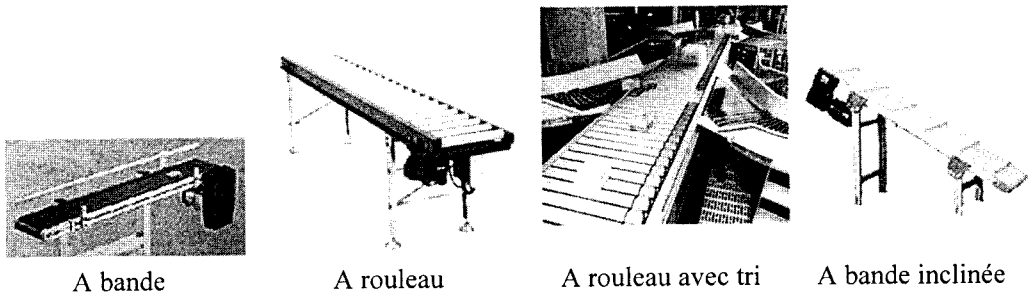


Figure 35 : Exemples de convoyeurs [44].

### 5.2 Manutention continue pour charges en vrac

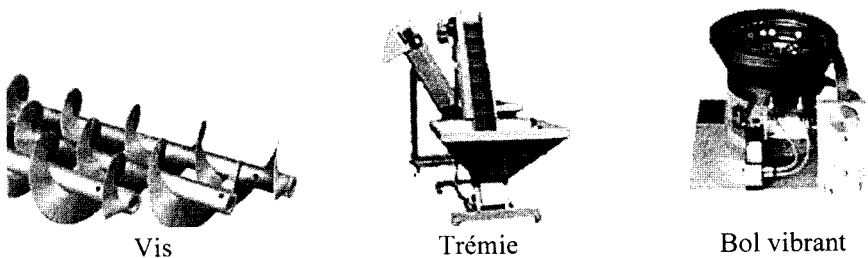


Figure 36 : Exemples de convoyeurs pour charges en vrac [44].

Les charges en vrac sont caractérisées par un flux de produits souvent indénombrables. Les dimensions des produits sont petites (de quelques millimètres à quelques centimètres). Ces charges sont en grande partie les produits alimentaires (granulés), les produits pharmaceutiques (gélules), les produits de carrières (cailloux, gravier, sable) mais également les produits de déchetterie ou de centre de traitement des déchets. Parmi les convoyeurs utilisés pour les charges en vrac, on retrouve les

convoyeurs à bande, les vis d'alimentation, les bols vibrants, les trémies et les silos. Des exemples de ces convoyeurs sont donnés sur la Figure 36.

Le bol vibrant offre l'avantage de passer de produits en vrac en produits isolés. Les produits sont déposés en vrac au milieu du bol et par vibration du bol, ils montent sur la rampe de la paroi extérieure et arrivent séparés à la sortie du bol. Des chicanes fixées sur la rampe permettent de positionner correctement les produits en sortie de bol. Les bols vibrants sont fréquemment utilisés dans les unités flexibles d'assemblage pour le montage des vis, des écrous ou d'éléments de fixation. La taille des produits est généralement petite.

### 5.3 Aspect économique

La manutention continue permet d'augmenter le nombre et la vitesse des produits transportés et ainsi d'améliorer la productivité du système de production. Elle permet de minimiser les taux d'erreur d'identification, en intégrant une identification automatique (code à barres, étiquettes électroniques) directement aux équipements de manutention. Elle diminue le taux de produits détériorés et c'est une manutention qui est parfaitement adaptée à la fragilité des produits car l'intervention manuelle est absente. Elle permet également d'intégrer des modules de contrôle dimensionnel et de pesage. Toutes ces caractéristiques et possibilités augmentent le taux de qualité du transport. Enfin, la manutention continue permet une régularisation et une maîtrise des flux (réduction des temps d'attente, réduction des ruptures de charge, gestion des files d'attente). En résumé, les critères d'évaluation permettant de choisir et de justifier l'investissement de tels équipements sont les suivants :

- Amélioration de la productivité.
- Rationalisation des opérations.
- Gain de surface.
- Amélioration de la qualité.
- Disponibilité et réduction des stocks.
- Amélioration de la qualité

Face à ces avantages, on peut lui opposer sa structure fixe qui engendre un manque important de flexibilité au niveau des flux et au niveau du type de produits transportés.

### 5.4 Convoyeurs aériens

Les convoyeurs aériens font partie de la manutention continue de charges isolées. Les charges sont déposées sur des supports appelés porteurs (paniers, chariot) et les supports sont entraînés sur un circuit prédéfini. Les charges transportées sont généralement accrochées ou posées sur les porteurs. Le déplacement de ces charges peut être soit continu, soit pas à pas. Un espacement de quelques centimètres à quelques mètres est appliqué entre chaque porteur.

Les différents types de convoyeurs aériens sont les suivants :

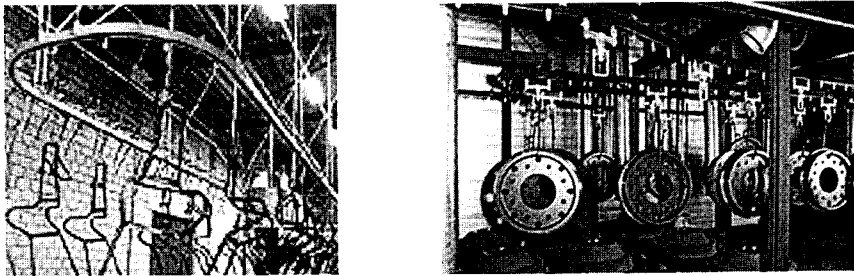
- Convoyeurs aériens à simple voie
- Convoyeurs aériens à double voie
- Convoyeurs aériens entraînant des charges au sol
- Convoyeurs monorail à chariots électrifiés.

Les domaines d'utilisation de ces équipements sont l'industrie automobiles (ensemble mécanique, châssis, carrosserie, ...), les exploitations minières, le tri postal, la

blanchisserie et la teinturerie mais également la fonderie et la sidérurgie. Comme tout équipement de la manutention continue, les convoyeurs aériens augmentent la productivité du système, la qualité et la sécurité du transport.

### Les convoyeurs aériens à simple voie

Il s'agit des premiers systèmes de manutention aériens installés dans les entreprises. La structure supportant les porteurs est fixe ce qui entraîne des modifications difficiles. Il s'agit d'un circuit fermé de rails.



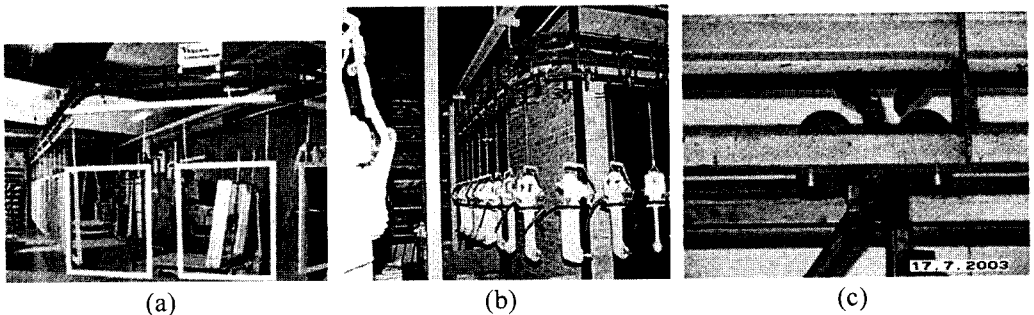
*Figure 37 : Exemples de convoyeurs aériens à simple voie [44].*

Les caractéristiques techniques sont les suivantes :

- La longueur des circuits varie de quelques mètres à quelques kilomètres.
- Le poids des charges de quelques kilos à quelques tonnes. La moyenne est une centaine de kilos.
- La vitesse d'entraînement des porteurs est de quelques centimètres par minutes à un maximum de 35 m/min.

Des exemples de convoyeurs aériens à simple voie sont représentés sur la Figure 37.

### Les convoyeurs aériens à double voie



*Figure 38 : Exemples de convoyeurs aériens à double voie [44].*

Ce type de convoyeurs est beaucoup plus récent. La première voie sert à l'entraînement continu de la chaîne et la deuxième voie sert à l'entraînement de la charge mais elle n'est pas solidaire de la première. L'entraînement des porteurs est débrayable à l'aide d'un système de taquets (Figure 38 (c)). Les circuits comportent des aiguillages convergents et divergents et des butées automatiques permettent d'arrêter les porteurs. Il est également possible d'avoir des zones de stockage sélectif. Ces différentes caractéristiques

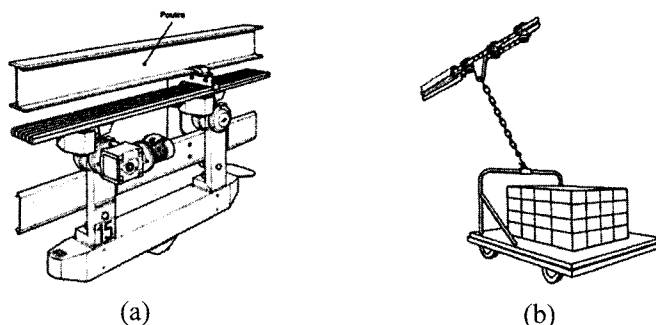
mécaniques permettent aux convoyeurs à double voie d'être beaucoup plus flexibles. Les caractéristiques techniques en terme de longueur, de poids et de vitesse sont similaires aux convoyeurs à simple voie. Des exemples de convoyeurs aériens à double voie sont représentés sur la Figure 38.

### Les monorails électriques

Pour ce type de convoyeur, le système d'entraînement est positionné à l'avant et/ou à l'arrière du porteur qui est suspendu à une poutre. La poutre ou rail est suspendue à une superstructure et des conducteurs électriques y sont fixés afin d'alimenter en énergie les moteurs d'entraînement des porteurs. Les moteurs sont bien entendu équipés de freins incorporés. Les circuits sont composés d'aiguillages, de courbes, de plaques tournantes, de transferts latéraux et de pentes. La flexibilité est dans les circuits est assez importante. Ce système offre plusieurs avantages :

- Il n'est pas polluant (usage fréquent dans les hôpitaux).
- Il permet d'avoir une grande vitesse de déplacement des charges (jusqu'à 200m/min).
- Il permet l'ajout d'équipements auxiliaires électriques aux porteurs (palan).
- Les charges maximales supportées par la structure sont de 500 kg/m.
- L'aptitude à une automatisation est très importante.

Les inconvénients majeurs sont l'inaptitude aux implantations sinueuses dans le plan vertical et une utilisation déconseillée dans des milieux agressifs, poussiéreux, corrosifs ou explosifs. On retrouve très souvent cet équipement mais dans une version de manutention discontinue (garage, atelier). Le monorail est alors équipé d'un palan électrique. Un exemple de monorail électrique est présenté sur la Figure 39 (a).



*Figure 39 : Exemple de monorail électrique et de tracteur de chariot au sol [38]*

### Tracteur de chariots au sol

Ce système est composé d'une voie aérienne qui entraîne à l'aide d'une chaîne un chariot au sol. L'avantage est de pouvoir transporter des charges importantes (jusqu'à 250 kg) et d'avoir la possibilité de dételer les chariots. La vitesse de déplacement du chariot est de 25 m/min. L'inconvénient important est l'encombrement au sol. Un exemple de tracteur de chariots au sol est représenté sur la Figure 39 (b).



## 6 Les chariots guidés automatiquement

Les chariots guidés automatiquement ou véhicules autoguidés (VAG) sont des chariots de manutention sans conducteur alimentés par des batteries et présentant une grande polyvalence d'utilisation. Ils existent depuis les années 50 mais le développement de la technologie en informatique et en électronique depuis les 10 dernières années ont accru leur fiabilité et leur rentabilité. Ils sont désormais des équipements de manutention souvent demandés par les industriels. Les secteurs d'application sont bien entendu l'industrie automobile, l'industrie alimentaire (embouteillage), l'industrie pharmaceutique mais également les hôpitaux, les aéroports et la papeterie. L'avantage majeur de ces équipements est leur degré d'automatisation totale ou aucune intervention humaine n'est nécessaire dans un fonctionnement normal. Le sigle VAG est remplacé par le sigle AGV (*Automated Guided Vehicle*) dans la littérature anglo-saxonne.

### 6.1 Description générale

Les charges transportées par les VAG varient de quelques kilos à plusieurs tonnes. Le niveau de prise ou de dépose des charges varie du sol à environ 10 mètres. La vitesse standard de déplacement est de 1 m/s à 1,5 m/s. Les fonctions assurées dans ces secteurs sont de trois types :

- Le transport entre les unités de production. Le chariot n'intervient pas dans le processus de production.
- Le stockage des produits au sol (dépose), sur des palettes (gerbage) ou dans des racks.
- La production. Le chariot intervient directement dans le processus de production.

Les particularités générales des VAG sont en résumé :

- La possibilité de réaliser des circuits complexes et enchevêtrés avec des carrefours.
- La possibilité de traverser les circuits pour le personnel ou les chariots traditionnels.
- La possibilité d'accéder à des zones interdites aux opérateurs.
- Des vitesses de déplacement de quelques kilomètres par heure.
- La nécessité de personnel de maintenance qualifié (technologie avancée et complexe).

Ces différentes caractéristiques engendrent des coûts d'acquisition élevés mais ont une influence non négligeable sur l'augmentation de la productivité.

### 6.2 Caractéristiques techniques

Outre les caractéristiques propres aux chariots de manutention, les véhicules autoguidés ont des caractéristiques techniques propres à leurs modes de fonctionnement. Les VAG sont classifiés suivant trois paramètres principaux : le système de guidage, l'équipement de préhension et la cinématique de déplacement. En ce qui concerne l'équipement de préhension, on retrouve les différents éléments cités dans les paragraphes précédents avec :

- Les chariots à convoyeurs motorisés.
- Les transpalettes et gerbeurs.
- Les chariots à fourche et à porte à faux.

- Les chariots à prise latérale.
- Les chariots à plateau élévateur.
- Les chariots à plate-forme fixe.

La cinématique de déplacement dépend du ratio largeur sur longueur, du simple ou double sens de circulation et des mouvements complexes à effectuer sur les trajets. On retrouve ainsi en majorité des chariots tri ou quadricycles avec une ou plusieurs roues motrices complétées par une ou plusieurs roues fixes ou folles.

Le système de guidage est un peu plus complexe et de plus amples détails sont donnés dans le paragraphe suivant. A ces principales caractéristiques techniques, il ne faut omettre le système de sécurité indispensable à tout équipement en mouvement. Outre un dispositif d'arrêt d'urgence de type coup de poing, il faut ajouter un dispositif d'arrêt sur détection d'obstacle ou de personne. Deux principes existent, le premier appelé bouclier de sécurité est le plus couramment utilisé. Il est formé d'une feuille déformable associée à des capteurs. La déformation de la feuille provoque l'arrêt immédiat du véhicule. Le deuxième principe utilise un balayage laser qui détecte dans un plan horizontal les obstacles ou personne éventuels. L'arrêt du véhicule ne s'effectue que si l'obstacle est à une distance minimum et s'il se situe dans un certain secteur de balayage (les deux paramètres distance et secteur angulaire sont bien entendu liés et paramétrables).

Le mode d'énergie est également un point technique important. Actuellement la totalité des chariots autoguidés fonctionne avec une énergie électrique distribuée par des batteries (au plomb ou au cadmium-nickel). Les chariots ayant un fonctionnement autonome, il est nécessaire de prévoir dans leur cycle de déplacement des périodes de recharge des batteries. Plusieurs possibilités existent suivant la durée journalière de fonctionnement. Si les chariots fonctionnent en 1/8, la recharge des batteries se fait pendant les 16 heures d'inactivité dans un local prévu à cet effet, manuellement ou automatiquement. Si les chariots fonctionnent en 2 ou 3/8, la recharge des batteries est intégrée aux cycles de déplacement. Les batteries peuvent être directement rechargées sur le chariot ou bien on effectue un changement de batteries ce qui évite l'indisponibilité du chariot. On aboutit alors aux différentes possibilités :

- Rechargement manuel de la batterie.
- Rechargement automatique sur des bornes de chargement disposées au sol.
- Changement manuel des batteries.
- Changement automatique des batteries.

Les différentes caractéristiques citées précédemment font partie des principaux critères de choix d'acquisition de chariots autoguidés. Ce choix est bien entendu lié aux travaux à réaliser et au type de charge à transporter.

L'utilisation des VAG est soumise à la directive 95/63/CE du 5 décembre 1995, ainsi que par la norme NF EN 1525 de décembre 1997 et la norme NF EN 1725-1 d'avril 1998.

### **Le système de guidage**

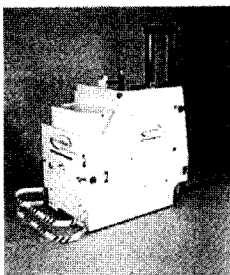
Le système de guidage est l'élément essentiel des véhicules autoguidés, et leur développement technique a beaucoup progressé durant les 10 dernières années. Plusieurs modes de guidage sont utilisés. Le plus ancien est le filoguidage. Ce système est fiable et robuste et le principe est le suivant. Un fil électrique est positionné au fond d'une saignée et est relié à un générateur. Le fil émet un champ magnétique qui est détecté par le chariot à l'aide de deux capteurs positionnés de part et d'autre du fil. La direction du chariot est

donc asservie pour rester au dessus du fil. Les changements de direction s'effectuent à l'aide d'aiguillages, de commutation de fréquences ou alors par programmation de la trajectoire. Ce principe impose des travaux de génie civil dans la zone de déplacement du chariot (réalisation des saigniers).

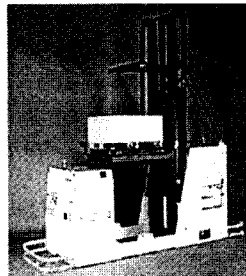
Le deuxième principe, appelé optoguidage, s'appuie sur une bande contrastée marquée au sol. Le chariot est muni de capteurs optiques qui détectent la bande et le guident sur le circuit. L'avantage de ce système est qu'il est moins coûteux en installation par rapport au fil et il n'y a pas de risque de rupture du fil. Par contre, il doit être utilisé dans un environnement propre afin d'éviter les problèmes de disparition du contraste par salissure. Ces deux principes s'appuient sur un guidage permanent du chariot mais des guidages non permanents existent.

Dans le cas d'un guidage non permanent, le chariot est programmé pour effectuer des trajectoires plus importantes et il est alors nécessaire de prévoir des recalages ponctuels de trajectoires. Plusieurs technologies sont présentes sur le marché : aimants au sol, balises optiques et cartographie. Les aimants sont cloutés localement au sol et suivant la position du chariot par rapport à la série d'aimants, celui-ci corrige sa trajectoire. Les balises optiques ont le même principe. Elles sont positionnées sur le parcours du chariot et un balayage laser émis sur les 3 bandes composant chaque balise permet de donner la position du chariot. La balise est donc composée d'une bande pour la position latérale, une bande pour la position longitudinale et une bande pour le cap. La cartographie a un principe identique mais elle utilise un recalage permanent du chariot. Des cibles sont positionnées tout le long du parcours et un balayage laser sur 360° du chariot permet de calculer sa position par rapport aux différentes cibles. Il doit théoriquement voir simultanément au moins trois cibles pour se situer. L'inconvénient de ce principe est que le balayage sur 360° n'est pas toujours possible si les produits manutentionnés ont une hauteur élevée.

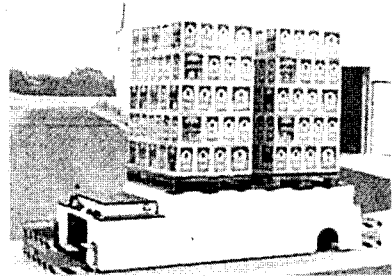
Des exemples de véhicules autoguidés sont présentés sur la Figure 40.



Gerbeur à fourche  
frontale



Gerbeur à fourche  
latérale



Plateau élévateur

*Figure 40 : Exemples de véhicules autoguidés [44].*

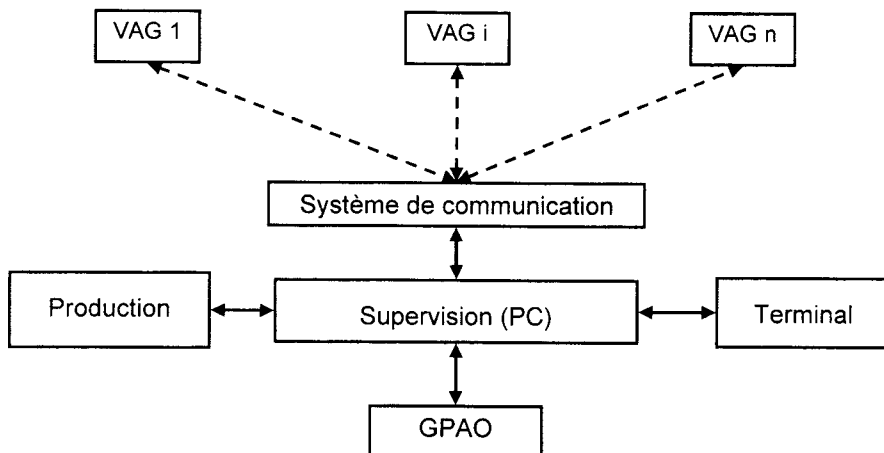
### 6.3 Gestion de la flotte

Le système de gestion de la flotte est un équipement important et ses capacités de gestion vont influencer fortement la fluidité du trafic et par conséquent la productivité du système de production. Ses missions sont nombreuses :

- Collecter les demandes de transfert de produits.

- Gérer les attributions en fonction des priorités et des VAG disponibles.
- Gérer les zones d'attente.
- Gérer les périodes de recharge ou de changement de batterie.
- Gérer les carrefours de circulation.
- Gérer les emplacements de stockage (emplacements, références, inventaire).
- Effectuer une traçabilité des transferts.
- Avoir une interface efficace avec le système de GPAO.
- Visualiser le déplacement des VAG (synoptique animé).

La Figure 41 donne la structure générale d'un système de pilotage d'une flotte de VAG. Le système de supervision (ordinateur) communique avec la production pour traiter les appels des machines, le système de GPAO pour traiter les différentes tâches à effectuer (impératif de production), le terminal pour dialoguer avec les techniciens et le système de communication pour envoyer des messages aux VAG (déplacement ou arrêt). La communication entre le système de communication et les  $n$  véhicules autoguidés (représentée par des flèches en pointillé) est réalisée soit par radio avec un débit de 19200 bauds, soit par infrarouge avec un débit plus faible de 9600 bauds. Le pilotage est assuré par l'informatique embarquée qui gère les fonctions internes telles que la communication, le guidage, le contrôle des outils et la sécurité.



*Figure 41 : Système de pilotage de la flotte*

#### 6.4 Données économiques

A titre indicatif, on donne un exemple de devis pour l'achat d'un chariot autoguidé destiné à la manutention de produits d'imprimerie (Devis au 1 décembre 2003). Le devis comprend 1 chariot autoguidé avec :

- Guidage laser (scanner) avec réflecteurs installés sur les circuits du chariot.
- Liaison radio entre le chariot et le PC.
- Charge maxi : 1000 kg
- Hauteur de gerbage de 2,5 m.
- Batterie au plomb avec une autonomie de 8 heures.
- Changement manuel de la batterie.
- Automatisme de conduite comprenant un PC de supervision, un automate et un logiciel de gestion).

Prix : de 170 000€ à 200 000€ suivant le degré d'automatisation des stations d'arrêts (Appel du chariot par les opérateurs ou trajets décidés par le PC).

## **7 Les chariots de manutention spéciaux**

La diversité des chariots de manutention est très importante et dans certaines applications, il est nécessaire de développer des chariots avec des caractéristiques très particulières. Ces particularités conduisent à des équipements produits en petit série voire en série unitaire. Le besoin de spécialiser les chariots peut naître du milieu ambiant (corrosif, explosif), des charges à transporter (conteneur maritime, produits sidérurgiques) ou de l'environnement de travail (allée à largeur restreinte, fixation à l'arrière des véhicules routiers). Différents exemples de chariots spéciaux sont donnés dans la suite de ce paragraphe. Toutefois, cette liste n'est pas exhaustive.

### **7.1 Ambiances spéciales**

#### **Ambiance froide**

Il s'agit des chariots qui évoluent dans des ambiances avec des températures comprises entre 5°C et -40°C. Ces chariots sont généralement utilisés pour le transport des produits frigorifiques. Ces chariots sont motorisés exclusivement avec une énergie électrique. Le stationnement des chariots en dehors des heures de travail doit se faire dans des locaux tempérés afin de préserver l'autonomie de la batterie. En cas de changement brutal de températures comme le passage d'une chambre froide à un local tempéré), des protections particulières sont nécessaires pour éviter le ruissellement et la condensation. Voici quelques exemples de protections particulières :

- Peinture antirouille
- Revêtement en Cadmium de la boulonnerie
- Carter et protection en matière plastique
- Huile et graisse spéciales
- Protection et étanchéité des éléments électriques

#### **Ambiance marine**

Les chariots doivent supporter l'agression du sel et tous les éléments métalliques (carters, réservoir) sont protégés contre la corrosion avec des peintures anticorrosion.

#### **Ambiance poussiéreuse**

L'ambiance poussiéreuse comme les poudres alimentaires ou les particules métalliques crée des phénomènes d'abrasion avec une usure rapide des pièces en mouvement. Elle crée également un colmatage et une obstruction des filtres ce qui occasionne une surchauffe des moteurs. On utilise alors des filtres spéciaux (5 µm) et les éléments électriques doivent respecter la norme NF EN 60529.

#### **Ambiance explosive**

Cette ambiance se caractérise par la présence de gaz ou de poussières inflammables. Ces chariots sont soumis au décret 96 1010 traduisant la directive européenne ATEX 94/4/CE dont l'application est obligatoire depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2003. Il faut en effet éviter que les éléments constituant le chariot créent des étincelles, des surchauffes ou des

explosions internes. Ces éléments sont essentiellement les moteurs, les batteries, l'éclairage, les pneumatiques, les circuits électriques et les avertisseurs. Les constructeurs utilisent alors des enveloppes anti-déflagrantes et encapsulent l'appareillage électrique. La protection se fait également en définissant des zones d'intervention bien délimitées afin d'éviter l'accès de chariots non autorisés.

## 7.2 Architectures spéciales

On entend par architecture spéciale, des zones d'intervention qui ne permettent pas l'accès des chariots normaux aux charges à transporter.

### Chariot élévateur latéral

Ces chariots sont couramment utilisés dans les zones de stockages car ils possèdent une largeur réduite et augmente ainsi la capacité de stockage. La largeur des allées peut être alors réduite de 30% car le chariot n'a pas à effectuer une rotation de 90° pour accéder aux charges. La Figure 42 donne des exemples de chariot élévateur latéral.

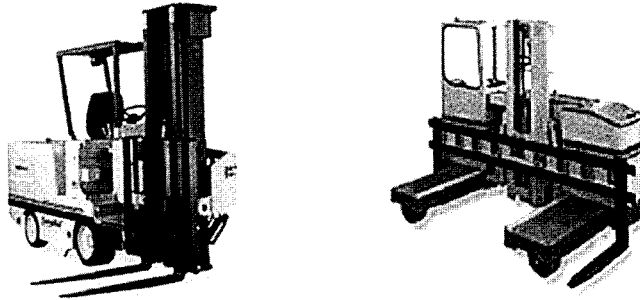


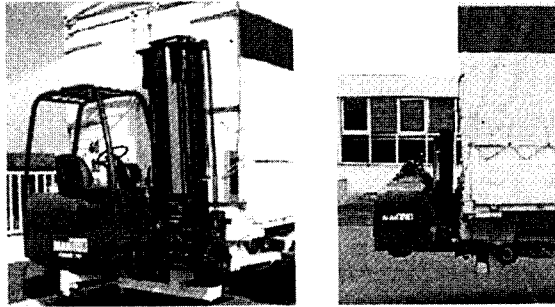
Figure 42 : Exemples de chariot élévateur latéral [44].

### Chariot embarqué

Les chariots embarqués sont des chariots élévateurs à fourche destinés à être embarqués facilement à l'arrière d'un véhicule routier. Les opérations de chargement et de déchargement sont alors directement effectuées par le conducteur sans aucune aide extérieure et sans perte de temps. Ce système fait partie de la manutention embarquée avec les grues auxiliaires et les hayons élévateurs.

D'un point de vue réglementaire, le chariot embarqué fait partie de la charge utile du véhicule et non du véhicule lui-même. Il ne passe pas au contrôle technique du véhicule et ne rentre pas en compte dans la mesure de la longueur utile du véhicule. Toutefois, une longueur maximale de saillie est fixée à 1,5 m. Il faut également déduire le poids du chariot lors du chargement du véhicule pour ne pas dépasser la charge utile. La capacité des chariots embarqués est de 1 à 4 tonnes (Figure 43). Les avantages de cette solution embarquée sont les suivants :

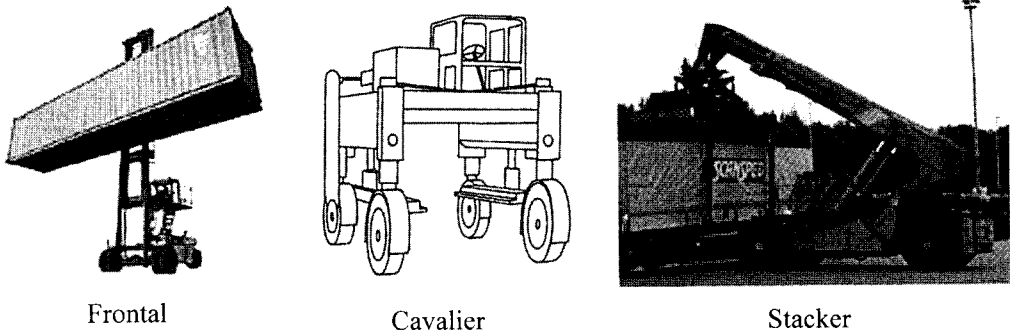
- Autonomie des manutentions
- Possibilité de livraison ou de saisie de marchandises aux horaires non ouvrables (nuits, périodes fériées), par une seule personne, impliquant des coûts de main d'œuvre réduits.
- Service à valeur ajoutée (argument commercial)
- Dépose de la marchandise en n'importe quel lieu de livraisons.



*Figure 43 : Exemples de chariot embarqué [44].*

### Chariot pour conteneur

Ce type de chariot est destiné à la manutention des conteneurs utilisés principalement dans le transport maritime. Les longueurs des conteneurs sont égales ou supérieures à 6 mètres. On distingue les chariots élévateurs frontaux à forte capacité, les stackers et les chariots cavaliers à châssis en portique (voir Figure 44).



Frontal

Cavalier

Stacker

*Figure 44: Exemples de chariot pour conteneur [44].*

Les chariots élévateurs frontaux ont une architecture directement dérivée de celle des chariots élévateurs à fourche en porte-à-faux classique mais les capacités de levage sont beaucoup plus élevées. Elles sont en moyenne de 12 à 45 tonnes mais peuvent aller jusqu'à 90 tonnes. Ils sont dotés de palonnier muni de vérins tournants qui facilitent la prise des éléments de levage des quatre coins supérieurs du conteneur.

Les stackers ont un principe analogue aux chariots à flèche télescopique utilisés en tous terrains. Ils ont une très forte capacité et l'extrémité de la flèche est munie d'un palonnier monté sur une tourelle pivotante. Ils possèdent l'avantage d'avoir un déport important de la charge permettant des prises et des déposes éloignées du stacker.

Les chariots cavaliers ont une structure du châssis en portique qui permet d'enjamber les charges. Ils ont une hauteur importante permettant de passer au dessus de 3 à 4 conteneurs gerbés. Il faut toutefois prévoir des allées de passage des roues entre chaque rangée de conteneurs.

# Chapitre IV

## Conception et gestion d'un système de manutention

Cette partie traite des aspects plus théoriques de la manutention et porte essentiellement sur la conception et la gestion opérationnelle des systèmes de manutention. Tout d'abord, une méthode de sélection d'équipement de manutention sur un ensemble de mouvements à effectuer est donnée. Ensuite, les problèmes complexes liés à la conception et à la gestion opérationnelle des véhicules autoguidés sont abordés. La conception du réseau comprend la détermination des différents chemins ainsi que le dimensionnement du nombre de véhicules. La gestion opérationnelle comprend l'ordonnancement des différentes tâches de manutention à réaliser par les véhicules autoguidés, la répartition des véhicules sur le réseau et la gestion des conflits dans les trajets. Enfin, un cas concret d'ordonnancement cyclique de robots de manutention est étudié. Ces différentes études se positionnent à la fois en amont et en aval du choix de matériel de manutention défini au Chapitre III2.

### 1 Sélection d'équipements

Dans la phase de conception d'un système de manutention, il est souvent préférable, en partie pour des raisons économiques, de spécifier un type d'équipement pour chaque déplacement de matériels ou de produits. Cette spécification permet également de prendre en compte tous les déplacements effectués dans le système par les moyens de manutention. Le principe de cette sélection est de déterminer plusieurs alternatives et de choisir celle qui offre un coût minimum.

La formulation de ce problème de sélection est donné par Askin et al [4]. On considère que l'on a  $M$  types d'équipements disponibles et  $N$  produits à transporter sur un horizon fini. La taille des lots unitaires à transporter pour chaque type d'équipement est supposée connue ainsi que l'implantation des allées. Les distances et les fréquences de chaque déplacement  $j$  ( $j = 1$  à  $N$ ) sont également connues. Les variables de décision sont les suivantes :

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'équipement de type } i \text{ est utilisé pour le déplacement } j \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

Le but est alors de déterminer le nombre nécessaire  $Y_i$  d'équipements de type  $i$ . Les différents coûts intervenants dans cette décision sont les suivants :

- $c_{ij}$  = coût variable par période unitaire de l'équipement  $i$  pour effectuer le déplacement  $j$ .
- $c_{ij} = (\text{nombre de mouvement / période}) * (\text{distance/mouvement}) * (\text{coût/distance})$ .
- $C_i$  : coût fixe par période unitaire de l'équipement  $i$ .
- $t_{ij}$  : temps mis par l'équipement  $i$  pour effectuer le déplacement  $j$ .
- $T_i$  : temps ouvrable par période unitaire de l'équipement  $i$ .



Si l'équipement de type  $i$  ne peut pas effectuer un déplacement  $j$  alors les coûts  $c_{ij}$  et  $C_i$  et le temps  $t_{ij}$  doivent être instancier avec un nombre important.

Le modèle de décision a comme fonction objective :

$$\text{minimiser (coût / période)} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot X_{ij} + \sum_{i=1}^M C_i \cdot Y_i \quad (5.1.a)$$

soumise aux contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^M X_{ij} = 1, \forall j \quad (5.1.b)$$

$$\sum_{j=1}^N t_{ij} \cdot X_{ij} \leq T_i \cdot Y_i, \forall i \quad (5.1.c)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1, Y_i \text{ entier} \quad (5.1.d)$$

La contrainte (5.1.b) impose que tous les déplacements sont assignés et la contrainte (5.1.c) garantit qu'il y a suffisamment de matériel de manutention (unité) dans chaque type d'équipement.

#### Exemple [4]

Une entreprise dispose de trois types d'équipements de manutention : (1) des gerbeurs, (2) des chariots élévateurs et (3) des convoyeurs. Elle désire affecter ses équipements au transport de matériel dans 6 zones (départements) de production ou de stockage. Le Tableau 12 et le Tableau 13 donnent les valeurs des temps et les coûts mensuels de déplacement par équipement dans les différentes zones. Les temps de déplacement du convoyeur ( $t_{3j}$ ) sont volontairement fixés à 1 pour indiquer que le déplacement est fixe et n'est réalisé que point par point. Pour des raisons techniques d'accès, l'utilisation du convoyeur dans la zone 6 est difficile. Le coût de déplacement dans cette zone est ainsi fixé à une valeur importante ( $c_{36} = 10000$ ).

$t_{ij}$	Equipement		
Zone	1	2	3
1	0,77	0,33	1
2	1,45	0,48	1
3	0,16	0,15	1
4	0,31	0,08	1
5	0,17	0,04	1
6	0,29	0,17	1

**Tableau 12** : Valeurs des temps  $t_{ij}$  de déplacement

$c_{ij}$	Equipement		
Zone	1	2	3
1	1300	635	750
2	2630	1298	3852
3	280	315	341
4	402	195	1198
5	255	128	1114
6	595	333	10000

**Tableau 13** : Valeurs des coûts  $c_{ij}$  des trajets par équipement

L'entreprise considère que les taux d'utilisation des équipements sont de 100%, ainsi  $\forall i \in (1, 2, 3), T_i = 1$ . Les coûts fixes d'utilisation des équipements sont respectivement de  $C_1 = 80, C_2 = 400$  et  $C_3 = 0$ .

Le modèle associé à ce problème de sélection d'équipement est le suivant :

$$\text{Minimiser } (1300 X_{11} + 2630 X_{12} + 280 X_{13} + 402 X_{14} + 255 X_{15} + 595 X_{16} + 635 X_{21} + 1298 X_{22} + 315 X_{23} + 195 X_{24} + 128 X_{25} + 333 X_{26} + 750 X_{31} + 3852 X_{32} + 341 X_{33} + 1198 X_{34} + 1114 X_{35} + 10000 X_{36} + 80 Y_1 + 400 Y_2 + 0 Y_3)$$

soumis à :

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{21} + X_{31} &= 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} &= 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} &= 1 \\ X_{14} + X_{24} + X_{34} &= 1 \\ X_{15} + X_{25} + X_{35} &= 1 \\ X_{16} + X_{26} + X_{36} &= 1 \\ t_{11} X_{11} + \dots + t_{16} X_{16} &\leq 1 * Y_1 \\ t_{21} X_{21} + \dots + t_{26} X_{26} &\leq 1 * Y_2 \\ t_{31} X_{31} + \dots + t_{36} X_{36} &\leq 1 * Y_3 \end{aligned}$$

Par résolution avec un solveur (de type Microsoft Excel, XPRESS ou CPLEX), on obtient un coût minimum de 3419 € avec comme affectation :

$$X_{11} = X_{12} = X_{13} = X_{14} = X_{15} = X_{16} = X_{21} = X_{32} = X_{33} = X_{34} = X_{35} = X_{36} = Y_1 = Y_3 = 0$$

et

$$X_{22} = X_{24} = X_{25} = X_{26} = X_{31} = Y_2 = 1.$$

On obtient un taux d'utilisation des chariots élévateurs (2) de 92%.

En imposant un taux d'utilisation de 90% pour les chariots élévateurs, on modifie la contrainte sur  $Y_2$  :

$$t_{21} X_{21} + \dots + t_{26} X_{26} \leq 0.9 * Y_2$$

Par résolution avec un solveur, on obtient un coût minimum de 3445 € avec comme affectation :

$$X_{11} = X_{12} = X_{13} = X_{14} = X_{15} = X_{16} = X_{21} = X_{23} = X_{32} = X_{34} = X_{35} = X_{36} = Y_1 = Y_3 = 0$$

et

$$X_{22} = X_{24} = X_{25} = X_{26} = X_{31} = X_{33} = Y_2 = 1.$$

On obtient un taux d'utilisation des chariots élévateurs de 77%.

La procédure de résolution avec le solveur de Microsoft Excel est décrite de manière détaillée dans le Chapitre VII.3.

## 2 Conception et gestion opérationnelle des véhicules autoguidés (AGV)

La conception et la gestion opérationnelle des systèmes de chariots autoguidés (AGV) sont des problèmes très importants. Ces systèmes ont un usage très répandu et leur importance croît considérablement pour les opérations de manutention. L'avantage de ces systèmes est l'augmentation de la flexibilité, la meilleure utilisation de l'espace de production, la sécurité dans le transport, la réduction des coûts opératoires et l'interfaçage facile avec d'autres systèmes automatisés. Ils comportent en plus un degré maximum d'automatisation par rapport à l'ensemble des autres chariots de manutention.

Les étapes principales de cette conception et de cette gestion comprennent :

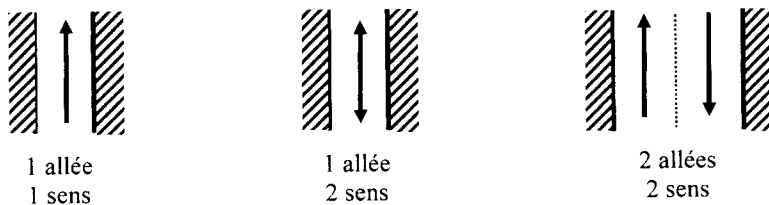
- La conception du réseau de manutention avec les différents chemins; les sens et les stations d'arrêt (*flowpath design*).
- La détermination du nombre de véhicules sur le réseau de manutention (*fleet sizing*).
- La gestion opérationnelle des véhicules avec les problèmes d'ordonnancement des tâches et des véhicules de manutention (*operational issues*), les problèmes de répartition des véhicules (*dispatching policies*) et les problèmes de conflits dans le trafic (*conflict-free routing*).

Les articles et les ouvrages qui traitent de ces différents problèmes sont extrêmement abondants et certaines références principales sont données dans la bibliographie (en outre [37] et [17]). Les mots clés principaux dans ce domaine sont les suivants : *AGV, Flow, path, network, unidirectional or bidirectional loop, pick-up and delivery station, fleet sizing, layout, scheduling, transfer buffer*.

On constate qu'il existe de nombreux modèles analytiques mais qui ne traitent que de structures simples comme les lignes ou les boucles simples. Pour les autres cas plus complexes et souvent plus proches de la réalité, qui prennent en compte d'autres types de boucles, la répartition des AGV et les possibilités de conflits entre AGV, il faut utiliser des outils de simulation de flux ou une simulation basée sur les réseaux de Petri.

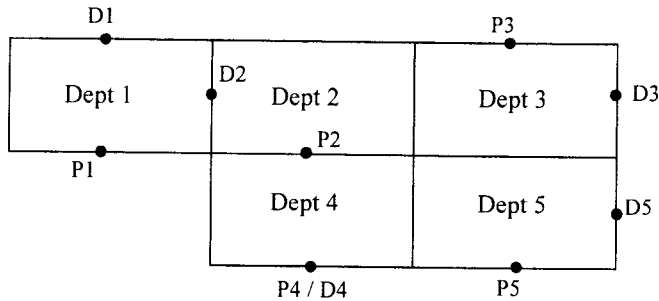
### 2.1 Conception du réseau de manutention

Cette étape de conception considère souvent que le site où l'on veut implanter un système AGV est décomposé en départements. Dans le cas contraire, la détermination du nombre de départements se base sur le volume de matière à transporter entre les différents départements. L'objectif est alors de minimiser le flux total de matière à transporter. Ce flux de matière transporté entre les départements sur un horizon fixé est souvent représenté par un diagramme de flux (quantité de flux transporté entre département) et ce problème est souvent traité comme un problème d'affectation quadratique.



**Figure 45 :** Allée et sens de circulation

Les départements se caractérisent par une ou plusieurs unités de production ou de stockage. Ainsi, un département peut être constitué d'un ensemble de machines spécifiques (usinage, assemblage, emballage...), de cellules flexibles ou de zones de stockages. Lors de la phase de conception, les départements sont généralement représentés par des rectangles dont les côtés sont des allées de passage pour les véhicules.



**Figure 46 :** Exemple d'implantation de départements et de points P et D

Sur chaque allée, le trafic peut s'effectuer sur une ou deux voies, avec un ou deux sens de circulation comme le décrit la Figure 45. Dans le cas d'implantation d'un réseau d'AGV sur un système de production existant, les allées de circulation des AGV reprennent les allées déjà utilisées. Un exemple d'implantation en département est représenté sur la Figure 46.

A partir du découpage en départements, la conception du réseau de manutention se décompose en deux phases distinctes comprenant :

- La localisation des points de prise P (*Pickup point*) et de dépose D (*Delivery, Drop off point*).
- La détermination des chemins connectant les différents points P et D.

Dans de nombreuses études, les points de prise et de dépose sont donnés. Ils correspondent le plus souvent aux points d'entrée et de sortie des unités de production ou de stockage. On considère alors que la structure peut être représentée par un graphe  $G$  non orienté dont l'ensemble des nœuds, noté  $N$ , sont les points P ou D, les intersections entre allées et les coins de l'implantation donnée. La Figure 47 donne un exemple de graphe associé à un département. Les arcs du graphe représentent les allées de circulation. Le problème de conception des chemins consiste à trouver un sous graphe  $G'$  orienté et fortement connecté qui minimise la distance totale des trajets à charge des véhicules. Soit  $N'$ , l'ensemble des sommets de  $G'$  ( $N' \subseteq N$ ). La formulation mathématique succincte de ce problème est la suivante :

$$\text{Minimiser } \sum_{\forall (P,D)} L_{PD} * S_{PD} \quad (6.2.a)$$

soumis à :

$$e_{ij} + e_{ji} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in N \quad (6.2.b)$$

$$G' \text{ est fortement connecté} \quad (6.2.c)$$

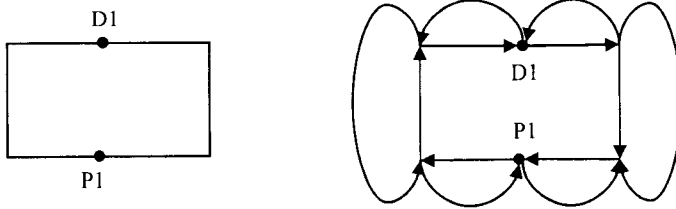
$$N' \text{ doit inclure tous les points P et D} \quad (6.2.d)$$

où :

$L_{PD}$  : nombre de chargements (lot) transportés par unité de temps d'un point de prise  $P$  vers un point de dépose  $D$ .

$S_{PD}$  : chemin le plus court du point  $P$  au point  $D$ , pour des valeurs fixées des  $e_{ij}$ .

$$e_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'arc } (i, j) \text{ est direct de } i \text{ à } j \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$



**Figure 47 :** Exemple de département et son graphe associé

Dans cette formulation, les contraintes (6.2 b) assurent que le trajet entre deux sommets adjacents est unidirectionnel. Les contraintes (6.2 c) et (6.2 d) garantissent qu'un véhicule qui part d'un point de prise  $i$ , visite un point de dépose  $j$  et revient au point  $i$ .

D'autres études traitent ce problème de localisation en même temps que la conception des chemins de manutention. En effet la localisation des points  $P$  et  $D$  influent fortement sur l'intensité du trafic dans les allées, sur les distances à effectuer entre les départements et sur le control du trafic. Le fait de combiner simultanément ces deux problèmes peut augmenter l'efficacité des opérations mais également diminuer les coûts du système. Certains modèles de résolution utilisent une programmation linéaire en nombres entiers.

Enfin, pour éviter les problèmes de conflits aux intersections et dans les allées mais également pour simplifier le problème de conception des chemins, certaines études proposent de travailler avec une boucle simple unidirectionnelle (*single loop*) qui passe par tous les départements. Ce problème de conception de boucle simple nécessite de premièrement trouver la boucle qui passe par toutes les unités de production et de stockage et deuxièmement de positionner les points de prise et de dépose de chaque unité. Les modèles proposés sont basés sur une programmation en nombres entiers, en zéro-un ou en programmation mixte (nombres entiers et binaires). La taille des problèmes traités est d'une dizaine de départements.

Le problème de conception des chemins de manutention est de choisir parmi les allées existantes, celles qui vont être utilisées pour la circulation des AGV. Mais il faut également déterminer la direction des trajets sur ces allées, ceci dans le but de minimiser la distance totale des trajets sur un horizon fixé. Normalement, la distance totale parcourue par les véhicules comprend la distance totale effectuée à charge et la distance totale effectuée à vide.

Voici en résumé, quelques règles de conception des chemins [4] :

- Le trajet des AGV doit être de préférence unidirectionnel à moins que le trafic soit peu dense (ceci minimise les blocages de chariots dans les allées).
- Les stations de prise  $P$  doivent se situer en aval des stations de dépose  $D$ . Le véhicule est ainsi capable de déposer son chargement et de reprendre immédiatement un nouveau chargement.
- Pour chaque point de prise  $P$  sur un segment, le nombre total de point de dépose  $D$  du départ du segment jusqu'au point de prise  $P$ , doit être au moins aussi grand que le nombre total de point de prise  $P$ . Un segment est toute portion d'un chemin de manutention d'un point d'intersection à un autre. Tout véhicule qui entre dans un

segment doit le traverser entièrement. La portion (a, b) représentée sur la Figure 46 est un exemple de segment.

- Placer les points P et D sur des segments de faible trafic (ceci évite les blocages de véhicules qui attendent de passer aux points P et D).
- Sur un segment, les opérations de chargement et de déchargement doivent être combinées. Un véhicule qui arrive chargé sur un segment doit sortir chargé de ce segment. Inversement, un véhicule qui arrive déchargé doit sortir déchargé du segment.
- Les contournements et les raccourcis peuvent être envisagés pour réduire les distances des trajets et les blocages des véhicules. Cependant, cette flexibilité et les performances obtenues font accroître la complexité de la commande des véhicules.

## 2.2 Dimensionnement de la flotte de manutention

Le dimensionnement de la flotte de manutention consiste à déterminer le nombre minimum de chariots nécessaire au système pour garder un taux de productivité donné. Cette étude s'effectue après l'étape de conception. L'agencement du réseau est donc totalement connu. Un premier calcul permet d'estimer un nombre minimum de véhicules qui constitue une borne inférieure.

$$\text{Nombre d' AGV} = \frac{\text{Temps total des opérations de transport}}{\text{Horizon d'étude}} = \frac{T_T}{T_H}$$

avec :

$$T_T = T_v + T_c + T_{ch} + T_{de}$$

$T_v$  = Temps total de transport à vide.

$T_c$  = Temps total de transport à charge.

$T_{ch}$  = Temps total de chargement.

$T_v$  = Temps total de déchargement.

Le temps total de transport à charge peut être estimé en prenant le plus court chemin de déplacement et en excluant les problèmes de conflit de passage entre AGV qui provoquent des modifications d'itinéraires. Ceci constitue une première approche de calcul.

Le temps de transport à vide est difficile à estimer. Il faut en effet connaître la politique de répartition des AGV libres (dispatching) sur le réseau.

Le temps total de déchargement est donné par la relation :

$$T_{ch} = \frac{\text{Horizon d'étude}}{\text{Nombre total de chargement}}$$

De la même manière, le temps total de déchargement est donné par la relation :

$$T_{de} = \frac{\text{Horizon d'étude}}{\text{Nombre total de déchargement}}$$

Généralement, la taille de la flotte est déterminée avec un modèle analytique plus ou moins complexe et cette première étape constitue un bon point de départ pour une étape de simulation. Les modèles analytiques sont classés suivant le type de demande de transport à effectuer (job). La demande est soit déterministe, soit stochastique. Dans le cas déterministe, on connaît à l'avance les dates d'arrivée des demandes de transport à effectuer par les AGV. Dans le cas stochastique, les dates d'arrivée des transports à effectuer suivent une loi stochastique qui est généralement une loi de Poisson. Les demandes sont ensuite traitées suivant différentes politiques comme FCFS (*First Come, First Served*).

L'étape de simulation est réalisée à partir de systèmes experts, de logiciels de simulation de flux (ARENA, SLAM) ou de logiciels de simulation basés sur les réseaux de Petri.

### 2.3 Gestion opérationnelle des véhicules

La gestion opérationnelle des AGV comprend un ensemble de problèmes très complexes étudiés souvent de façon autonome. On retrouve l'ordonnement des tâches de manutention, la répartition des AGV sur le réseau et la résolution des conflits dans les trajets. Dans tous ces types de problème, on considère que le réseau de manutention est agencé. On connaît donc les différents chemins avec leur sens, la position des carrefours et des stations d'arrêt ainsi que le nombre de chariots disponibles. Pour les problèmes d'ordonnement, le but est alors d'ordonner les opérations de manutention et de déterminer les dates de prise et de dépose des AGV. Les méthodes utilisées sont celles de la recherche opérationnelle avec la programmation mathématique, les heuristiques et les méta-heuristiques. On trouve également des méthodes basées sur la simulation avec des outils spécifiques de simulation (ARENA, WITNESS) ou des méthodes basées sur un modèle réseau de Petri.

#### Règles de répartition (*dispatching rules*)

Lorsque le système manufacturier comporte un nombre importants d'AGV sur un nombre conséquent de chemins, la commande de ces véhicules est une tâche très complexe. Le cas très fréquent se présente, lorsque plusieurs machines de production demandent au même instant un AGV pour effectuer une mission d'alimentation ou d'évacuation de produits. Il est alors nécessaire de décider laquelle des machines va être servie en premier. De manière similaire, on retrouve le cas où une machine a le choix entre plusieurs AGV pour effectuer la tâche de manutention et un seul AGV doit être choisi. Dans la littérature scientifique, il s'agit d'un problème de répartition des AGV (*AGV dispatching problem*). Afin de résoudre ce problème de conflit, de nombreuses politiques de répartition sont utilisées dont la plupart sont résumé dans le Tableau 14. La première colonne donne les règles de répartition initiées par l'AGV pour le choix d'une machine tandis que la deuxième colonne donne les règles initiées par la machine ou la station de production pour le choix d'un véhicule.

Règle initiée par l'AGV	Règle initiée par la station (machine)
Première arrivée – Première servie	Véhicule le plus rapide
Première prise en compte – première servie	Véhicule disponible le premier
Plus longue file d'attente	Plus petit temps libre cumulé
Plus long temps d'inter arrivés	Véhicule le moins utilisé
Plus long temps de trajet	Véhicule avec le plus grand temps libre
Plus long temps d'attente	Le plus grand temps libre cumulé
Demande maximum	Véhicule le plus proche
Plus petit temps de trajet / distance	Choix aléatoire de véhicule
Choix aléatoire de machine	
Travail en cours minimum	
Taille maximum de la file de sortie	
Le véhicule cherche une tâche à effectuer	

**Tableau 14** : Politiques de répartition des AGV [17]

Il est possible de donner une autre classification des politiques de répartition en utilisant une approche inspirée des flux de production : règles poussées (*push rules*) ou règles tirées

(*pull rules*). Une politique basée sur le flux poussé sélectionne tout d'abord une tâche à effectuer, c'est-à-dire le point source du trajet et détermine le point de destination. Ensuite, un véhicule est choisi pour effectuer l'opération de manutention. Dans ce cas, on privilégie le départ des produits à la sortie des machines (point source du trajet), ce qui correspond bien à un flux poussé de la production. Une politique basée sur le flux tiré utilise d'abord une règle spécifique pour choisir une machine qui peut recevoir une tâche (point de destination). Ensuite une liste de tâches que peut remplir la machine est établie. La liste de tâches donne les différents points sources possibles des trajets. Finalement, une règle de sélection des tâches est appliquée dans la liste et donne de ce fait le point source du trajet. Dans ce cas, on privilégie l'arrivée des produits pour alimenter les machines (point d'arrivée du trajet) et on se retrouve bien en flux tiré de production.

Dans la plupart des politiques de répartition appliquées, un seul attribut de choix est pris en compte. Par exemple, pour les règles : *Plus long temps de trajet*, ou : *taille de la file d'attente*, seul le temps ou la taille ne sont pris en compte pour le choix. Il est alors possible d'utiliser une politique multi attribut avec des facteurs de pondération entre les attributs choisis. Si on reprend le temps et la taille, on peut obtenir l'attribut de répartition suivant :

$$0,15 * (\text{temps de trajet}) + 0,85 * (\text{taille de la file})$$

Les différentes études menées montrent que les politiques multi attributs donnent de meilleurs résultats que les politiques mono attribut.

Les critères de performances qui permettent de valider la bonne politique de répartition sont en général le nombre de chargements unitaires sortis, le taux moyen de sortie, l'efficacité du transport, c'est-à-dire la capacité à atteindre un certain niveau de production, ou l'efficacité de la logistique (capacité à imposer un faible niveau de stocks aux points de prise et de dépose). On peut également utiliser d'autres critères de performances comme le taux d'utilisation des AGV, le taux d'utilisation des machines, la taille maximum des files d'attente aux points de prise et de dépose ou le retard moyen des tâches.

### 3 Etude de cas : Ordonnancement cyclique des robots de manutention

Dans cette étude de cas, on veut expliquer les bases des problèmes d'ordonnancement cyclique des robots de manutention (*cyclic robot scheduling problem*) ([9] et [26]). On parle ici de robot mais on peut facilement remplacer le robot par tout autre moyen de manutention (chariot, portique, pont roulant) du moment que l'on respecte les données et contraintes initiales du problème.

L'ordonnancement s'effectue sur des lignes de production automatisées ou le robot est utilisé pour déplacer les pièces d'une station de production à une autre. Le but est de trouver un ordonnancement optimal qui minimise le temps de cycle du robot.

Ce type de problème est souvent utilisé pour l'ordonnancement des processus électrolytiques (*hoist scheduling problem*) où les pièces passent successivement dans différents bacs chimiques afin d'effectuer des opérations de surface (traitement, nettoyage, dépose). Dans la plupart des cas de processus électrolytique, le temps de trempage des pièces dans les bacs doit être strictement contrôlé. Un manque ou un dépassement de quelques secondes peut entraîner une détérioration et un rebut de la pièce.



### 3.1 Définition et notation

La ligne de production est composée de  $m$  stations (ou machine)  $M_1, \dots, M_m$ . Les stations  $M_0$  et  $M_{m+1}$  sont respectivement les stations de chargement et de déchargement des produits.

Les pièces considérées comme identiques passent successivement dans les différentes stations suivant la même séquence  $S$  de production (gamme) qui est connue à l'avance. Il est possible de renuméroter les stations sachant que la  $k^{\text{ieme}}$  opération de la séquence  $S$  ( $S = 1, \dots, m$ ) est effectuée sur la station  $k$ .

Un seul robot est utilisé pour déplacer les pièces de stations en stations. Les stations et le robot ne peuvent traiter qu'une seule pièce à la fois. Leur capacité est donc limitée à l'unité. Dans cette étude, on considère qu'il n'y a pas d'attente avant et après les opérations sur les stations. Concrètement l'opération débute dès que la pièce est déposée sur la station et doit être immédiatement transférée par le robot dès que l'opération sur la station est terminée. Il s'agit d'une contrainte de non attente (*no-wait*) sur les opérations. Si cette contrainte n'est pas respectée, la pièce est considérée comme défectueuse.

Donnons maintenant la notation utilisée pour ce type de problème.

- $T$  : longueur du cycle.
- $P$  : séquence des mouvements du robot.  $P = (i_0, i_1, i_2, \dots, i_m)$ . La première composante de  $P$  indique que le robot commence son cycle de mouvement par transférer une pièce du poste de chargement à la station 1 et va ensuite à la station  $i_1$ . La composante  $i_k$  ( $k = 1, \dots, m-1$ ) indique que le robot transfère une pièce de la station  $i_k$  vers la station  $i_k + 1$  et va ensuite vers la station  $i_{k+1}$ . La dernière composante  $i_m$  indique que le robot transfère une pièce de la station  $i_m$  vers la station  $i_m + 1$  et retourne ensuite vers le poste de chargement 0 et le cycle se répète. Si  $i_k = m$  alors  $i_k + 1$  est le poste de déchargement.

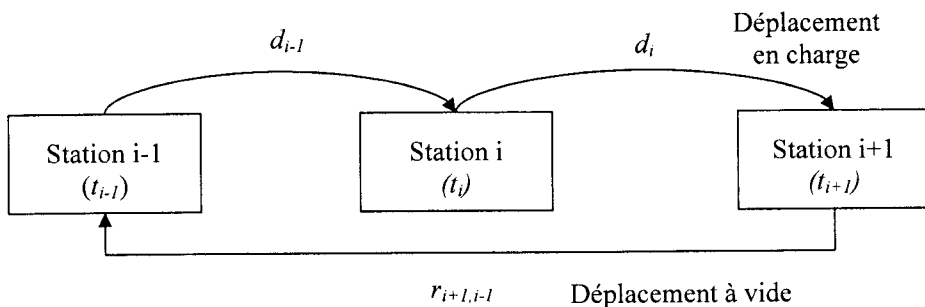


Figure 48 : Mouvement du robot

Chaque opération  $k$  de la séquence du processus est caractérisée par les paramètres suivants :

- $t_k$  : temps opératoire (*processing time*) ( $k = 1, \dots, m$ ). Le temps de chargement est considéré comme négligeable ( $t_0 = 0$ ).
- $d_k$  : temps requis par le robot pour transférer une pièce de la station  $k$  vers la station  $k+1$  ( $k = 0, 1, \dots, m$ ). Il s'agit uniquement de mouvement en charge.
- $r_{ij}$  : temps requis par le robot pour effectuer un déplacement à vide de la station  $i$  vers la station  $j$  ( $i = 1, \dots, m+1$ ), ( $j = 0, 1, \dots, m$ ).  $i$  varie de  $1$  à  $m+1$  car on n'a pas

de déplacement à vide de la station de chargement 0 vers une station quelconque  $j$ .  $j$  varie de 0 à  $m$  car on n'a pas de déplacement à vide d'une station quelconque  $i$  vers la station de déchargement  $m+1$ .

### 3.2 Analyse du problème

Soit  $Z_k$  le temps d'achèvement (*completion time*) de la  $k^{eme}$  opération de la séquence opératoire  $S$  (pour une pièce entrant à l'instant 0).

$$Z_k = \sum_{i=1}^k (d_{i-1} + t_i), k = 1, \dots, m.$$

Connaissant  $T$ , on note :

$$Y_0 = 0, Y_k = Z_k \text{ mod } T, k = 1, \dots, m.$$

La période minimale du cycle  $T$  n'excède pas la longueur du cycle trivial  $T^0$ , qui est égale à la durée totale des opérations de  $S$ , plus le temps de déplacement du robot de la station  $m+1$  vers la station 0.

$$T^0 = Z_K + d_K + r_{m+1,0} = \left( \sum_{i=1}^K (d_{i-1} + t_i) \right) + d_K + r_{m+1,0}$$

Autrement dit,  $T^0$  est égale au temps d'achèvement  $Z_K$  de la dernière opération  $K$  de  $S$ , plus le dernier temps de déplacement à charge  $d_k$ , plus le déplacement à vide du robot de la station de déchargement à la station de chargement.  $T^0$  constitue une borne supérieure pour la période minimale du temps de cycle du robot.

Puisque chaque station ne peut traiter qu'une seule pièce à la fois, on a  $T \geq t_k$ , ( $\forall k, k = 1, \dots, K$ ). Si on prend en compte les temps de déplacement du robot, on obtient une borne inférieure pour le temps de cycle  $T$ .

$$T \geq T_0 = \max_{1 \leq k \leq K} (d_{k-1} + t_k + d_k + r_{k+1,k-1})$$

### 3.3 Algorithme de résolution

Cet algorithme a été proposé par Kats et Levner en 1997 [26] mais d'autres algorithmes existent dans la littérature. Le but est de trouver  $T$ , tel que  $T \geq T_0$  et  $T, 2T, \dots, mT$  ne dépassent pas les intervalles  $I_1 = \left\{ \left( T'_{ij}, T''_{ij} \right) \right\} (i, j = 1, \dots, m) (i > j)$ , avec :

$$T'_{ij} = Z_i - Z_j - d_j - r_{j+1,i}$$

$$T''_{ij} = Z_i - Z_j + d_j - r_{i+1,j}$$

Conditions du problème :

$$T \notin I_1 = \left\{ \left( T'_{ij}, T''_{ij} \right) \right\}, i, j = 1, \dots, m, j > i,$$

$$T \notin I_2 = \left\{ \left( \frac{T'_{ij}}{2}, \frac{T''_{ij}}{2} \right) \right\},$$

⋮

$$T \notin I_m = \left\{ \left( \frac{T'_{ij}}{m}, \frac{T''_{ij}}{m} \right) \right\},$$

ou de manière équivalente :  $T \notin I$  avec  $I = I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_m$ .

L'algorithme suivant permet de trouver la période  $T$  minimale qui satisfait les conditions précédentes.

**Entrées :** La séquence opératoire  $S$  et les nombres réels  $d_k, t_k$  ( $k=0, \dots, K$ ),  $r_{ij}$  ( $i=1, \dots, m+1$  ;  $j=0, \dots, m$ ) ; les bornes  $T^0$  et  $T_0$ .

**Sorties :** La séquence de déplacement du cycle optimale du robot  $P^*$  et la longueur de ce cycle  $T^*$ .

- Etape 1 : Construire l'intervalle  $I_1$ . Adjoindre l'intervalle  $[0, T_0)$  à  $I_1$ , tel que  $I_1 = I_1 \cup [0, T_0)$ , où

$$\bullet \quad T_0 = \max_{1 \leq i \leq m} (d_{i-1} + t_i + d_i + r_{i+1, i-1})$$

- Etape 2 : Ordonner l'ensemble  $I_1$  suivant l'ordre croissant des valeurs de la partie gauche de l'intervalle.
- Etape 3 : Construire les ensembles ordonnés  $I_2, \dots, I_m$  (chacun est ordonné suivant l'ordre croissant des valeurs de la partie gauche de l'intervalle).
- Etape 4 : Construire l'ensemble ordonné  $I = I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_m$ .
- Etape 5 : Choisir la dernière valeur de la partie droite de l'intervalle  $I$ . Cette valeur correspond à la période minimale  $T^*$ .
- Etape 6 : Trouver  $P^*$ , le cycle optimal du robot correspondant à  $T$  : les machines sont servies par le robot dans l'ordre croissant des magnitudes

$$Y_i = Z_i \bmod R : 0 = Y_0 < Y_{i1} < \dots < Y_{im} \text{ (mod} = \text{modulo)}$$

### Exemple

L'entreprise Microcomp est spécialiste dans la fabrication de composants et de cartes électroniques. Elle souhaite automatiser sa ligne de traitement de surface. Pour cela, elle désire acquérir un robot permettant le transfert automatique des produits électroniques entre les différents bacs électrolytiques servant à réaliser les traitements de surface. La ligne comprend 5 bacs chimiques. Un poste en amont et en aval des bacs sont utilisés pour le chargement et le déchargement des produits des porteurs. Le mouvement des porteurs entre les différents bacs chimiques devra être réalisé par le robot.

L'entreprise a déjà réalisé le cahier des charges du robot avec les différentes caractéristiques techniques ; maintenant elle souhaite déterminer l'ordonnancement du robot. Pour cela elle dispose de plusieurs paramètres comme les temps opératoires de traitement de surface dans les bacs et les durées des trajets à charge (Tableau 15) mais également les durées des trajets à vide du robot entre les différents bacs (Tableau 16).

Opération	Poste	$d_k$	$t_k$
0	$M0$	5	
1	$M1$	7	17
2	$M2$	3	11
3	$M3$	3	11
4	$M4$	4	25
5	$M5$	2	27

**Tableau 15 :** Temps de déplacement en charge et temps opératoires

Le processus de traitement de surface interdit le dépassement des temps opératoires. Concrètement, le traitement de surface commence dès que le robot dépose les composants dans les bacs. Le robot doit impérativement remonter les composants dès que le temps

opérateur est écoulé (ni avant, ni après). Le non respect de cette condition (*no-wait*) conduit à des composants défectueux.

<i>j i</i>	0	1	2	3	4	5
1	1	0	3	2	5	7
2	3	2	0	3	6	4
3	4	6	2	0	3	5
4	5	5	3	1	0	3
5	6	3	1	3	2	0
6	8	1	3	4	2	1

**Tableau 16 : temps de déplacement à vide**

Le système est composé de 5 stations ( $m = 5$ ) et la gamme de production comprend 5 opérations ;  $K = 5$  et  $S = (1, 2, 3, 4, 5)$ . Chaque opération  $K_i$  est effectuée dans les postes (bacs)  $M_i$ . Les postes  $M_0$  et  $M_6$  sont destinés au chargement et au déchargement des produits. Les temps de déplacement en charge du robot et les temps opératoires des stations sont donnés dans le Tableau 15. Le Tableau 16 donne les temps de déplacement à vide du robot.

Les bornes inférieures et supérieures sont les suivantes :

$$T^0 = (\sum_{i=1}^5 (d_{i-1} + t_i)) + d_5 + r_{6,0} = 24 + 91 + 8 = 123$$

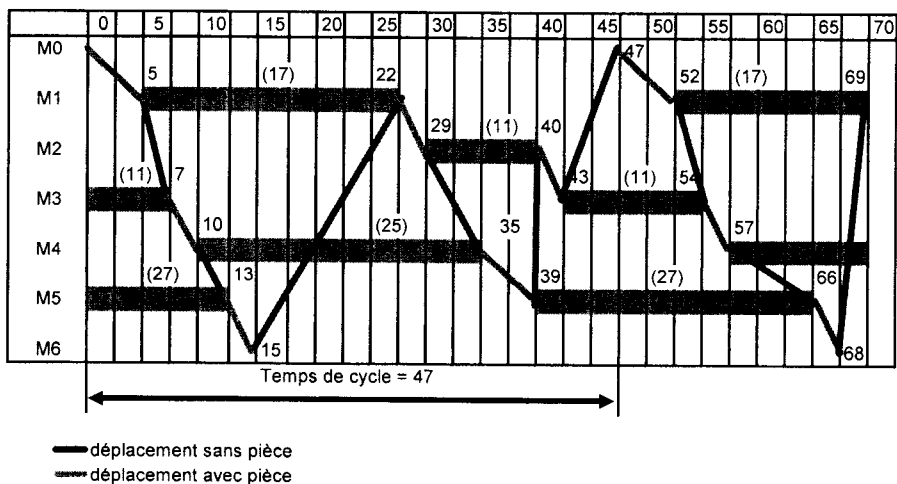
$$T_0 = \max_{1 \leq k \leq 5} (d_{k-1} + t_k + d_k + r_{k+1,k-1}) = 35$$

C'est-à-dire que la durée totale d'exécution des tâches de transfert du robot doit être comprise entre ces deux valeurs.

Les temps d'achèvement sont les suivants :

$Z_0$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$
0	22	40	54	82	113

**Tableau 17 : Valeurs des temps d'achèvement**



**Figure 49 : Chronogramme des mouvements du robot**

L'algorithme de Kats et Levner donne le cycle optimal du robot :

$$P^* = (0, 3, 5, 1, 4, 2)$$

Ceci signifie que le robot sert cycliquement les postes dans l'ordre suivant :

$$M_0 \rightarrow M_1 \Rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \Rightarrow M_5 \rightarrow M_6 \Rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \Rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \Rightarrow M_2 \rightarrow M_3$$

$\rightarrow$  : représente un déplacement du robot avec pièce

$\Rightarrow$  : représente un déplacement du robot à vide (sans pièce)

Le temps de cycle associé à cet ordonnancement des mouvements du robot est égale à :

$$T^* = 47$$

La Figure 49 donne le chronogramme des différents mouvements du robot. On retrouve les déplacements à vide, les déplacements à charge, ainsi que les durées opératoires des tâches effectuées dans les 5 bacs. La durée entre la prise successive de deux pièces sur la poste 0 est de 47 unités de temps. Cette durée correspond au temps de cycle.

Remarque : dans ce type d'étude, il faut bien vérifier que l'ordonnement des mouvements du robot est valide sur plusieurs cycles.

### 3.4 Ordonnement cyclique à plusieurs pièces

Dans le cas précédent, l'ordonnement cyclique d'un robot de manutention a été traité mais pour une seule pièce. C'est-à-dire que pendant un cycle de déplacement du robot, il y a exactement 1 pièce qui rentre et 1 pièce qui sort de la ligne de production. Cet ordonnancement est assez simple à trouver et à mettre en place.

L'ordonnement cyclique d'un robot avec plusieurs pièces est possible mais plus compliqué. Par définition, l'ordonnement cyclique de  $r$  pièces traite de lots composés de  $r$  pièces identiques. Les pièces qui composent les lots entrent successivement dans le système, les unes après les autres, avec un intervalle de temps inégale noté :  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_r$ . Un seul lot entre et un seul lot sort du système durant un cycle.

Le temps de cycle moyen pour plusieurs pièces peut être meilleur que le temps de cycle optimal pour une seule pièce. Certains chercheurs ont observé que le temps de cycle moyen pour 2 pièces est plus petit que le meilleur temps de cycle pour une pièce.

Un algorithme polynomiale de résolution d'un ordonnancement cyclique avec 2 pièces est proposé dans Che et al. [9].

# Chapitre V

## Modélisation et évaluation de performances

### 1 Introduction

L'étude des systèmes de manutention passe inévitablement par des phases de modélisation et d'évaluation de performances. Les chapitres précédents ont déjà montré différents modèles analytiques basés sur la programmation linéaire, la programmation dynamique ou les processus stochastiques. Dans ce chapitre, on désire étudier les systèmes de manutention à l'aide de l'outil : réseau de Petri. Les réseaux de Petri sont incontestablement des outils puissants de modélisation et d'évaluation de performances des systèmes à événements discrets. Parmi ces systèmes à événements discrets, on retrouve naturellement l'ensemble des systèmes industriels avec en autres les systèmes automatisés, les systèmes de production et bien entendu les systèmes de manutention et de logistique. Ces derniers sont en effet caractérisés par des entités dénombrables (chariots, produits, caristes, emplacements, ...), des activités et des évolutions simultanées, partagées et synchronisées. Le choix des réseaux de Petri est guidé par leur potentialité à modéliser, à analyser et dans le cas de modèles complexes avec un nombre important d'entités, à simuler le comportement. Les réseaux de Petri permettent également de prendre en compte des temps d'activités déterministes et stochastiques.

L'objectif de ce chapitre est ici de modéliser et d'évaluer les performances de différents systèmes de manutention. La première partie donne les éléments de base des réseaux de Petri. La deuxième partie décrit les modèles de base des structures élémentaires qui composent un système de manutention. Enfin la dernière partie s'intéresse à des modèles complets, telles que des lignes de production ou les cellules flexibles.

### 2 Formalisme des réseaux de Petri

Un réseau de Petri ou RdP est un outil de modélisation graphique et mathématique qui s'applique à un grand nombre de domaines comme la productique, l'automatique ou bien l'informatique. Historiquement, les réseaux de Petri ont été créés par Carl Adam Petri en 1962 à l'Université de Darmstadt. Actuellement de nombreuses équipes de recherche travaillent avec cet outil et développent des logiciels de simulation pour différentes applications comme les systèmes de production ou les systèmes informatiques. Le milieu industriel s'intéresse de plus en plus aux réseaux de Petri à travers certains logiciels commerciaux comme outil de simulation et d'aide à la décision. Dans ce domaine, les références bibliographiques sont indénombrables. On peut toutefois citer quelques ouvrages et articles qui traitent de généralités sur les réseaux de Petri : David et Alla. [12], Proth et Xie. [33]. Les problématiques de modélisation et d'analyse de chaînes logistiques sont également traitées dans les travaux de Chen et al. ([10], [24]). Ces articles prouvent l'intérêt actuel des réseaux de Petri dans l'étude de la chaîne logistique (interne et externe).

## 2.1 Définitions

Un réseau de Petri est un graphe orienté biparti dont les noeuds sont des places et des transitions. On peut définir un RdP comme un 4-uplets :

$$RdP = (P, T, Pre, Post)$$

Où :

- $P$  est l'ensemble fini des places,  $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ ,
- $T$  est l'ensemble fini des transitions,  $T = (T_1, T_2, \dots, T_m)$ ,
- $Pre : (P \times T) \rightarrow \mathbb{N}$  (entier naturel) est l'application d'incidence avant,
- $Post : (P \times T) \rightarrow \mathbb{N}$  est l'application d'incidence arrière.

Les matrices  $Pre, Post$  sont les matrices de dimension  $n \times m$ .

- $Pre(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc reliant  $P_i$  à  $T_j$ .
- $Post(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc reliant  $T_j$  à  $P_i$ .
- ${}^{\circ}T_j$  (resp.  $T_j^{\circ}$ ) est l'ensemble des places d'entrée (resp. de sortie) de la transition  $T_j$ .
- ${}^{\circ}P_i$  (resp.  $P_i^{\circ}$ ) est l'ensemble des transitions d'entrée (resp. de sortie) de la place  $P_i$ .
- $W = Post - Pre$  : matrice d'incidence.

Du point de vue graphique, les places sont représentées par des cercles, les transitions par des barres ou des rectangles. Les arcs qui relient les places aux transitions et les transitions aux places sont des arcs orientés. Attention, il y a toujours une alternance place - transition (deux places, respectivement deux transitions, ne peuvent pas être liées entre elles). Un exemple de réseau de Petri est représenté sur la Figure 50.

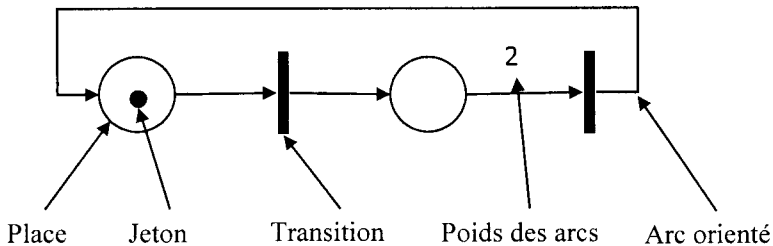


Figure 50 : Exemple de réseau de Petri

Un réseau de Petri marqué est un couple  $(PN, M)$  où :

- $PN = (P, T, Pre, Post)$  est un réseau de Petri.
- $M : P \rightarrow \mathbb{N}$  est une fonction de marquage.

On note  $M_0$  le marquage initial du RdP. Le marquage du réseau de Petri est effectué par des jetons. Graphiquement, les jetons (ou marques) sont représentés par des ronds noirs et sont placés au centre des places.

## 2.2 Dynamique des réseaux de Petri

La dynamique des réseaux de Petri est réalisée en introduisant des jetons ou des marques dans les places. Les jetons vont ainsi circuler de places en places en franchissant les différentes transitions alternées. Toutefois, le franchissement d'une transition doit suivre certaines règles.

Une transition  $T_j$  est franchissable pour un marquage  $M$  si et seulement si :

$$M(P_i) \geq Pre(P_i, T_j), \forall P_i \in {}^oT_j$$

Le franchissement d'une transition  $T_j$  consiste à retirer  $Pre(P_i, T_j)$  jetons de chaque place  $P_i \in {}^oT_j$  et à ajouter  $Post(P_i, T_j)$  jetons dans toutes les places  $P_i \in T_j$ . Ainsi, à partir du marquage  $M$ , le franchissement d'une transition  $T_j$  conduit au nouveau marquage  $M'$  défini comme suit :

$$M'(P_i) = M(P_i) - Pre(P_i, T_j) + Post(P_i, T_j), \forall P_i \in P$$

Une transition franchissable n'est pas forcément immédiatement franchie. Il y a un seul franchissement possible à un instant donné.

La Figure 51 montre le franchissement de la transition  $T_1$ . Sur cet exemple, il n'y a pas conservation du nombre de jetons dans le réseau de Petri. En effet, le nombre total de jetons est de 4 avant franchissement et passe à 5 jetons après franchissement de  $T_1$ .

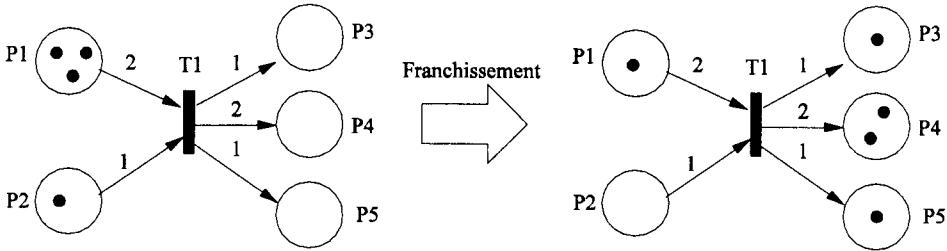


Figure 51 : Franchissement de transition

Le marquage obtenu après le franchissement de  $T_1$  est le suivant :

$$M' = M - Pre + Post$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### 2.3 Structures particulières

#### Réseau de Petri à arc inhibiteur

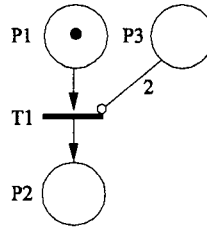
Les arcs inhibiteurs rendent possible le franchissement des transitions quand les places sont vides ou ont un marquage inférieur à une valeur fixée. L'exemple représenté sur la Figure 52 montre que la transition  $T_1$  est franchissable s'il y a au minimum 1 jeton dans  $P_1$  et au maximum 1 jetons dans  $P_3$  (la condition est strictement inférieure à 2). L'arc inhibiteur reliant  $P_3$  à  $T_1$  fonctionne à l'inverse d'un arc normal. Les conditions à remplir pour le franchissement de  $T_1$  sont les suivantes :

$$M(P_3) < Pre(P_3, T_1)$$

et

$$M(P_1) < Pre(P_1, T_1)$$





**Figure 52 :** Réseau de Petri avec arc inhibiteur

Un arc inhibiteur relie toujours une place à une transition et non l'inverse. Les arcs inhibiteurs sont très utilisés dans la modélisation des systèmes industriels. Ils permettent de mettre des priorités lors des conflits de production ou de transport entre différentes entités (machines, chariots, ...).

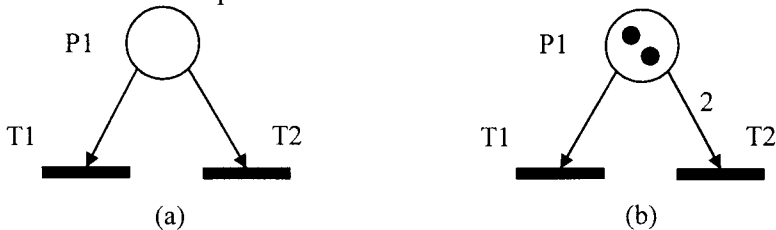
### Conflit

La notion de conflit est très importante dans la modélisation avec les réseaux de Petri car elle apparaît dans la plupart des modèles de systèmes industriels dès lors qu'il y a un partage de ressource ou qu'il y a un choix entre plusieurs tâches ou activités. Le conflit est toujours entre deux ou plusieurs transitions. On distingue deux types de conflit.

- Le *conflit structurel* qui ne fait intervenir que la structure du réseau de Petri et dont la définition est la suivante : Deux transitions  $T_1$  et  $T_2$  sont en conflit structurel si et seulement si elles ont au moins une place d'entrée  $P_i$  en commun.
- Le *conflit effectif* qui fait intervenir la structure du réseau et le marquage. La définition est la suivante : Deux transitions  $T_1$  et  $T_2$  sont en conflit effectif pour un marquage  $M$  si et seulement si elles ont au moins une place d'entrée  $P_i$  en commun tel que :

$$M(P_i) \geq \text{Pre}(P_i, T_1) \text{ et } M(P_i) \geq \text{Pre}(P_i, T_2)$$

La Figure 53 montre un exemple de conflit structurel et effectif.



**Figure 53 :** Conflit structurel (a) et effectif (b)

## 3 Modélisation des structures de base

### 3.1 Tâche, événement

Les systèmes à événements discrets dont font partie les systèmes logistiques sont, comme leur nom l'indique, caractérisés par un ensemble d'états discrets dans un espace temps qui peut être continu ou discret. Ces états sont généralement représentés par une place et lorsque la place est marquée, c'est à dire qu'elle contient un jeton, l'état est actif. Si

la place n'est pas marquée, l'état est inactif. Le changement d'état s'effectue par franchissement des transitions. Ainsi, la modélisation d'un événement se fait à l'aide d'une place, d'une transition amont et d'une transition aval. Le franchissement de la transition amont modélise le début de l'état et le franchissement de la transition aval modélise la fin de l'état. Le temps resté dans l'état est modélisé par le temps de franchissement affecté à la transition aval. Ce temps peut être déterministe, on a alors un réseau de Petri temporisé, ou bien aléatoire, on a alors un réseau de Petri stochastique. Dans le cas des systèmes industriels et logistiques, on peut parler d'état (panne, marche, arrêt) ou bien de tâche ou d'activité à réaliser (chargement, déchargement, transport, stockage, ...). La modélisation est identique et un exemple est donné dans la Figure 54.

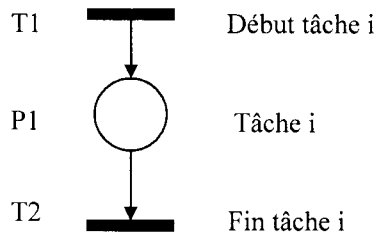


Figure 54 : Structure de base

### 3.2 Partage de ressources

Le partage de ressource est une structure très fréquemment utilisée dans les systèmes industriels. La ressource est utilisée par plusieurs équipements ou machines pour effectuer une tâche bien précise. On entend par ressource, l'ensemble des systèmes de manutention (robot, pont roulant, transpalettes, chariot de manutention, convoyeur, véhicule guidé automatiquement, monte-charge), les systèmes de transport (camion, véhicule, ascenseur), ou bien des outils spécifiques.

La structure de partage de ressource est représentée sur la Figure 55. La place  $P_2$  représente l'état de disponibilité de la ressource. La quantité de ressources disponibles est donnée par la somme des marquages des places  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$ .

$$\text{Nombre de ressources} = M(P_1) + M(P_2) + M(P_3)$$

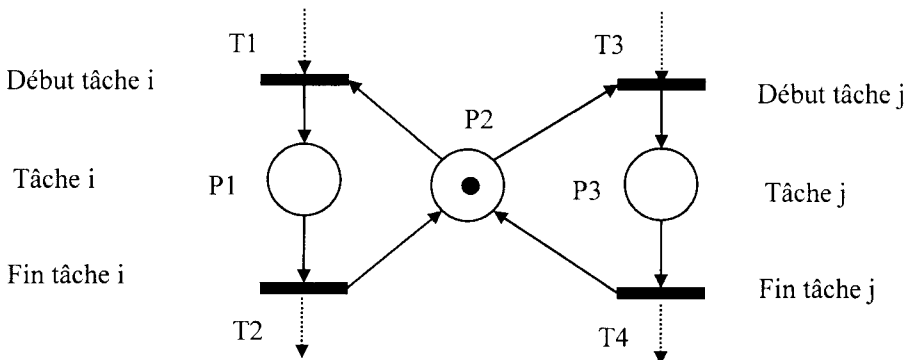


Figure 55 : Partage de ressources

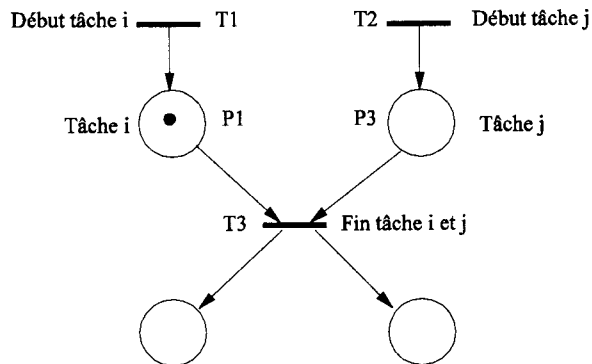
Dans notre cas, il y a une seule ressource qui est disponible car un seul jeton est dans la place  $P_2$ . Les tâches  $i$  et  $j$  ont besoin de la même ressource pour être réalisées. Ce partage de ressource se décompose en 2 parties graphiques :

- Réserve de la ressource : représentée par les arcs reliant la place  $P_2$  et les transitions  $T_1$  et  $T_3$ . Le franchissement de  $T_1$ , c'est à dire le début de la tâche  $i$  est conditionné par la présence du jeton dans la place  $P_2$  (Ressource disponible).
- Libération de la ressource : représentée par les arcs reliant les transitions  $T_2$  et  $T_4$  et la place  $P_2$ . En effet, dès que les tâches  $i$  et  $j$  sont terminées, elles libèrent la ressource afin que celle-ci puisse être réutilisée.

Bien entendu, on peut augmenter le nombre de ressources en augmentant le nombre de jetons dans la place  $P_2$ . De même, la ressource peut être partagée sur plus de deux tâches. Il suffit de créer des arcs reliant la place  $P_2$  aux transitions de début et de fin de tâches supplémentaires.

On constate que la modélisation du partage de ressource surtout pour l'acquisition de la ressource génère un conflit structurel et souvent effectif s'il y a présence de jeton dans les places amont des transitions  $T_1$  et  $T_3$ . La résolution du conflit effectif peut se réaliser en ajoutant des priorités d'acquisition pour effectuer telle ou telle tâche. La modélisation de cette priorité s'effectue directement sur les transitions  $T_1$  et  $T_3$ , en imposant des conditions de franchissement comme l'ajout de places en amont des transitions ou l'ajout d'arcs inhibiteurs.

### 3.3 Synchronisation



*Figure 56 : Synchronisation bilatérale*

La synchronisation permet de stopper une liste de tâches à effectuer et de la faire repartir suivant une condition. La Figure 56 et la Figure 57 montrent deux types de synchronisation. La première est une synchronisation bilatérale, où deux évolutions de tâches en parallèle sont stoppées et recommencent au même instant. Dans le deuxième cas, la synchronisation est unilatérale, une série de tâches avec une évolution indépendante conditionne l'évolution d'une autre liste de tâches. Dans notre exemple, la tâche  $j$  ne peut se terminer que si l'information que la tâche  $i$  est en cours de réalisation est effective, c'est à dire qu'il faut avoir un jeton dans la place  $P_2$ . Le franchissement de  $T_1$  génère deux jetons : un jeton pour dans la place  $P_1$  qui modélise la réalisation physique de la tâche  $i$  et un jeton dans la place  $P_2$  qui modélise l'information de la réalisation de la tâche  $i$ . Cette duplication du nombre de jetons rend indépendant l'évolution des tâches. La place  $P_2$  a un rôle de mémorisation de l'information.

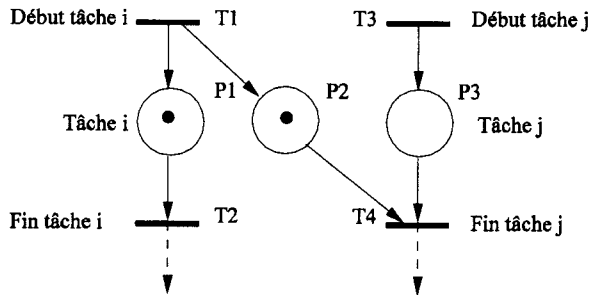


Figure 57 : Synchronisation unilatérale

### 3.4 Capacité

Cette structure est très importante dans les systèmes industriels. Elle permet de limiter l'accès aux produits dans les unités de production ou les systèmes de stockage. La modélisation de cette capacité est simple; comme le partage de ressources, elle se compose de deux parties : une partie acquisition de la capacité et une partie libération. La taille de cette capacité est donnée par la somme des jetons présents dans la boucle de capacité. Dans l'exemple donné sur la Figure 58, la capacité est de 3 jetons.

$$\text{Capacité totale} = M(P_1) + M(P_2) = 3$$

La place  $P_2$  représente l'état de disponibilité de cette capacité. Si par exemple, la place  $P_1$  modélise un état de production, l'unité de production dispose au total de 3 emplacements, 2 sont occupés et 1 emplacement est libre.

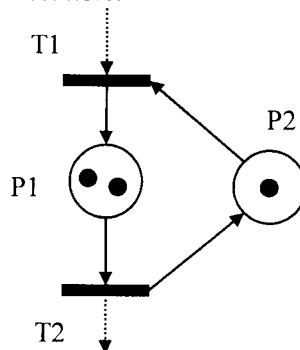


Figure 58 : Capacité

### 3.5 Création et suppression d'entités

Lorsque le système industriel est en flux ouvert, la modélisation nécessite de créer et de supprimer des entités. Ces entités sont alors modélisées par des jetons qui sont créés en entrée et détruits en fin de réseau. Ces entités peuvent représenter des pièces, comme l'arrivée de matière première ou de produits semi-finis et le départ de produits finis ou bien alors l'arrivée de commandes et le départ de factures.

La création d'entités est modélisée par une transition source et la destruction par une transition puit. Ces structures sont représentées sur la Figure 59.

La création et la destruction d'entités sont souvent soumises à des contraintes internes ou externes aux systèmes industriels. Par exemple, un produit ne peut sortir d'une entreprise que si une commande d'un client est arrivée ou qu'un camion de transport est présent. Inversement, une matière première ne peut entrer dans l'entité de production que si le stock amont a des emplacements disponibles. Ces conditions sont modélisées par des arcs et des places en amont des transitions source et des transitions puit.



Figure 59 : Création (a) et destruction (b) de jetons

## 4 Modélisation d'entités et évaluation de performances

La modélisation des entités qui composent un système industriel reprend les structures de base définies précédemment mais pour faciliter cette étape de modélisation, on précise une méthode de modélisation.

### 4.1 Méthode de modélisation

La méthodologie de modélisation est un point clé dans l'application des réseaux de Petri aux systèmes industriels. Ce paragraphe ne donne qu'une seule approche de modélisation, mais d'autres approches sont possibles. La spécification des systèmes industriels peut être considérée comme un ensemble de ressources, un ensemble d'opérations et des relations de précédence. La méthode suivante, donnée dans les travaux de Zhou et al. [43], utilise cette spécification pour créer un modèle réseau de Petri du système.

- Etape 1 : Identifier les activités et les ressources utilisées pour la production d'une pièce de chaque produit.
- Etape 2 : Ordonner les activités en tenant compte des relations de précédence données par le processus de production.
- Etape 3 : Pour chaque activité classée : créer et nommer une place qui représente l'état de cette activité; ajouter une transition avec un arc de sortie reliée à la place "activité" (cette transition représente le début de l'activité); ajouter une transition avec un arc d'entrée relié à la place "activité" (cette transition représente la fin de l'activité). En général, la transition d'arrêt d'une activité est la transition de début de l'activité suivante. Lorsque le réseau est terminé, un jeton dans une place activité indique que l'activité est en cours de déroulement. Plusieurs jetons indiquent que l'activité est réalisée plusieurs fois. Le franchissement d'une transition de début représente le départ de l'activité ou du processus, et le franchissement d'une transition de fin représente l'exécution de l'activité et le début de la prochaine activité.
- Etape 4 : Pour chaque activité : créer et nommer une place pour chaque ressource nécessaire au démarrage de l'activité (si cette place n'est pas déjà créée). Cette place correspond à la disponibilité de la ressource. Connecter toutes les places "disponibilité de ressource" avec des arcs d'entrée reliés à la transition début de

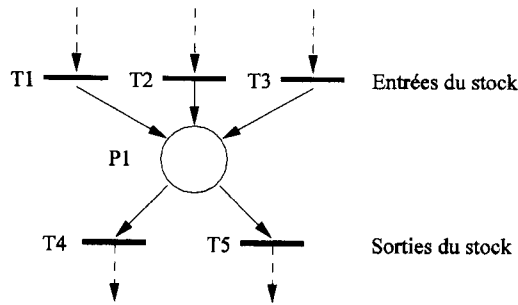
l'activité. Créer des arcs de sortie reliant la transition fin de l'activité et toutes les places ressources représentant l'état de disponibilité de celles-ci.

- Etape 5 : Spécifier le marquage initial du système.

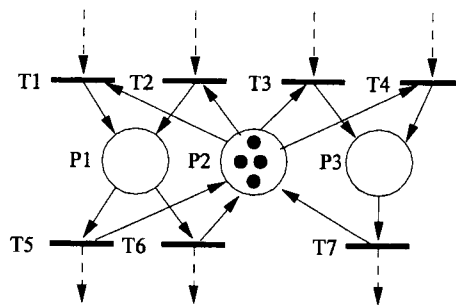
Dans la suite, différents modèles de systèmes de manutention et d'entreposage sont décrits.

#### 4.2 Moyens de stockage

Les moyens de stockage sont intégrés au coeur du flux de production. Ils ont pour mission d'accueillir des produits (matière première, produits semi-finis ou produits finis) en attente de production ou de départ sur un autre site. Les moyens de stockage permettent d'une manière générale de réguler le flux de matière dans le système de production. La modélisation de base, représentée sur la Figure 60, est composée d'une ou plusieurs entrées (transitions  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ), d'une ou plusieurs sorties (transitions  $T_4$  et  $T_5$ ) et d'une place contenant les éléments à stocker. Dans notre exemple, le stock est de capacité illimitée car il n'y a pas de condition au franchissement sur les trois transitions d'entrée.



*Figure 60 : Modèle de stock avec capacité illimitée*



*Figure 61 : Modèle de stock avec capacité limitée*

Le modèle présenté dans la Figure 61 comporte une zone de stockage commune avec une capacité totale limitée. Ce type de stock permet de prendre en compte le stockage de différents produits dans une même zone. Dans notre exemple, cette zone commune reçoit deux types de produits. Le premier produit est alimenté par deux entrées (transitions  $T_1$  et  $T_2$ ) et évacué par deux sorties ( $T_5$  et  $T_6$ ). La place  $P_1$  représente l'état de présence du premier type de pièce. Le deuxième produit arrive dans la zone de stockage par 2 entrées ( $T_3$  et  $T_4$ ) et est évacué par  $T_7$ . La présence de ces produits est signalée par le marquage de

la place  $P_3$ . La zone a une capacité totale limitée à 4 emplacements (4 jetons dans la place  $P_2$ ).

La modélisation par réseau de Petri permet aisément de prendre en compte certaines politiques de stockage comme les politiques FIFO, LIFO et toutes les autres combinaisons. L'exemple représenté sur la Figure 62 est une politique de stockage FIFO. Les places  $P_1$  à  $P_4$  représentent les emplacements physiques du stock. Le stock a donc 4 emplacements. Les places  $P_5$  à  $P_8$  représentent l'état de disponibilité de chaque emplacement. Dans la configuration représentée, le stock a donc un seul emplacement occupé (1 jeton dans  $P_4$ ) et trois emplacements disponibles. Les transitions  $T_1$  et  $T_5$  modélisent respectivement l'entrée et la sortie du stock. Les produits ne peuvent entrer dans le stock FIFO que si le premier emplacement  $P_1$  est libre. Dès que le produit entre dans le stock, il passe progressivement de la place  $P_1$  à la place  $P_4$  suivant l'état de disponibilité des places aval. Arrivé dans la place  $P_4$ , le produit est évacué.

Attention, cela ne veut pas dire que le produit change physiquement d'emplacement dans le stock mais c'est uniquement sa position de sortie qui évolue. Bien entendu, on peut compléter le modèle en intégrant une condition à la sortie du stock (place supplémentaire en amont de la transition  $T_5$  modélisant une demande).

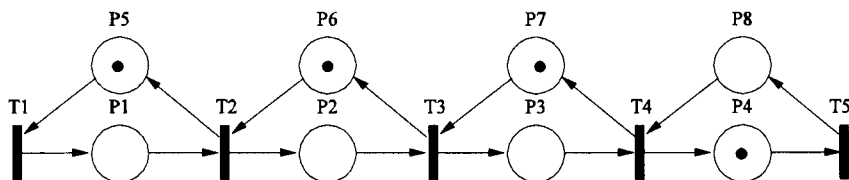


Figure 62 : Modèle d'un stock géré en politique FIFO

### 4.3 Moyens de manutention

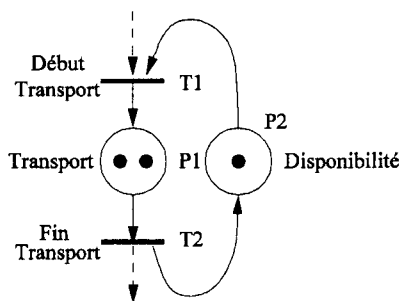


Figure 63 : Modèle d'une activité de transport

La modélisation de ces moyens de transport est le plus souvent composée d'une place représentant l'opération de transport, avec une transition amont correspondant au début du transport et une transition aval correspondant à la fin du transport. L'opération de transport ne s'effectue que si le moyen est disponible. On retrouve donc une structure de partage de ressource ou de capacité modélisée par une place reliée avec un arc en amont de la transition d'entrée et un arc en aval de la transition de sortie. La Figure 63 représente un exemple de modélisation d'une opération de transport. Dans cet exemple, il y a au total

trois moyens de transport, deux sont occupés (deux jetons dans  $P_1$ ) et un est disponible (un jeton dans  $P_2$ ).

#### 4.4 Phénomène de panne

Il est tout à fait possible d'intégrer au modèle réseau de Petri des phénomènes de panne qui perturbent le fonctionnement normal des moyens de manutention. Il suffit alors d'ajouter une place représentant l'état de panne du système et deux transitions. La première transition modélise l'entrée dans l'état de panne et est associée à un taux de défaillance  $\lambda$ , et la deuxième transition modélise la sortie de l'état de panne associé à un taux de réparation  $\mu$ . La Figure 64 reprend le modèle de la Figure 63 en ajoutant un état de défaillance (place  $P_3$ ). La transition  $T_3$ , associée au taux de défaillance  $\lambda$  modélise le passage à l'état de panne, et la transition  $T_4$ , associée au taux de réparation  $\mu$  modélise le passage à l'état de fonctionnement normal, c'est-à-dire la disponibilité du système.

Le taux de défaillance  $\lambda$  et le taux de réparation  $\mu$  sont des variables aléatoires distribuées avec des lois de probabilités adéquates (exponentielle ou Weibull par exemple).

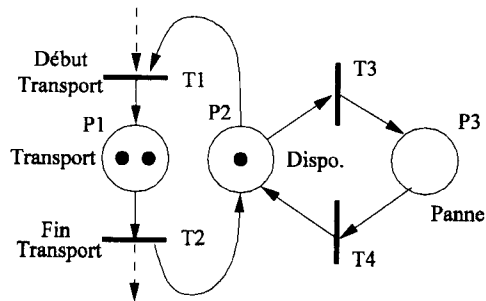


Figure 64 : Modèle d'un système de transport avec état de panne

#### 4.5 Evaluation de performances

Pour évaluer les performances des modèles réseaux de Petri en terme de comportement dans le temps, il est nécessaire d'associer des temporisations aux différentes transitions. Elles sont alors appelées transitions temporisées. Lorsqu'un jeton est réservé pour franchir une transition temporisée, il ne franchit la transition qu'après un temps égal à la temporisation de la transition. Si le temps de franchissement est nul, la transition est appelée transition immédiate. Suivant la nature de ces temps : déterministe ou stochastique, on obtient différentes appellations de réseau de Petri. Pour simplifier, on a :

- Des transitions temporisées déterministes : réseau de Petri temporisé.
- Des transitions temporisées stochastiques (distribuées avec une loi exponentielle) : réseau de Petri stochastique [1].
- Des transitions immédiates et transitions temporisées (déterministes et stochastiques) : réseau de Petri stochastique et déterministe (DSPN).

Lorsque le modèle est de grande dimension et que le nombre de marquages généré est infini, il est nécessaire pour évaluer les performances du modèle de recourir à la simulation. Plusieurs simulateurs de réseaux de Petri existent sur le marché, et certains logiciels gratuits sont disponibles sur le site international des réseaux de Petri



(<http://www.daimi.au.dk/PetriNets/>). On propose toutefois dans cet ouvrage (Chapitre VII) un simulateur de réseaux de Petri temporisé.

Le calcul des indices de performances s'effectue en régime stationnaire (ou permanent), c'est à dire que l'évolution des marquages est constante et stabilisée. Trois grands indices de performance se dégagent facilement. Il suffit en effet de comptabiliser le nombre de jetons qui stationnement dans les places ou qui franchissent les transitions sur une durée fixée. Ainsi, on obtient :

- Le nombre moyen de marques dans une place.
- La fréquence moyenne de franchissement des transitions.
- Le temps moyen d'attente d'une marque dans une place.

Si on applique les indices de performance définis précédemment aux systèmes logistiques, on obtient ces types de performance :

- Le nombre moyen de pièces transportées par unité de temps.
- Le taux moyen d'utilisation des moyens de manutention.
- Le nombre moyen de pièces dans un stock.
- Le temps moyen de séjour d'une pièce dans un stock.

## 5 Etude de structures complètes

Dans ce paragraphe, on étudie des exemples de structures complètes de systèmes logistiques. Les modèles présentés ici sont volontairement orientés vers une modélisation des flux du système et non vers une modélisation des états. Toutefois, la modélisation des flux du système intègre une partie des états du système. Les flux de production sont de 2 types :

- Flux ouverts : ils correspondent le plus souvent aux flux de produits dans le système industriel; de la matière première aux produits finis en intégrant parfois les déchets et les rebuts. Le modèle représentant ces flux ouverts comporte une création de jetons en début de modèle (arrivée des produits dans le système) et une suppression des jetons en sortie de modèle (expédition ou sortie des produits). Le modèle est bien entendu non borné car il peut avoir une accumulation infinie de jetons.
- Flux fermés : ils correspondent aux flux des outils de manutention dans le système. Ces outils de manutention sont par exemple des palettes, des caisses ou bien des conteneurs métalliques. Dans ce cas, les jetons représentent l'outil de manutention avec ou sans produit posé dessus ou déposé dedans. Le modèle est généralement borné car la quantité des outils de manutention est fixée.

### 5.1 Cellule de production avec AGV

#### Modélisation

Une cellule de production est composée le plus souvent d'un stock d'entrée, d'une ou plusieurs entités de production et d'un stock de sortie. Les produits sont transférés automatiquement du stock d'entrée aux entités de production et des entités de production au stock de sortie. Ce transfert automatisé s'effectue à l'aide de moyens de manutention (chariot guidé automatiquement, convoyeur, carrousel, robot). Les produits traités dans la

cellule peuvent être différents les uns des autres. Ils arrivent par lot ou de façon unitaire. La flexibilité de la cellule permet de prendre en compte ces diversités. Les stocks (entrée ou sortie) et les entités de production ont chacun une capacité limitée.

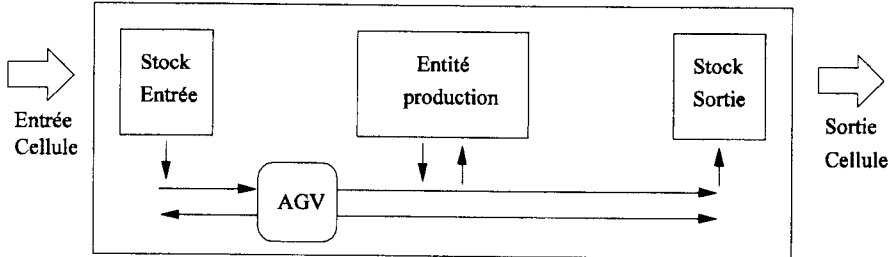


Figure 65 : Configuration de la cellule de production

Un exemple de structure d'une cellule flexible est donné sur la Figure 65. Elle comporte une entité de production, un stock d'entrée et un stock de sortie. Le transport des produits au sein de la cellule flexible est assuré par un véhicule guidé automatiquement. L'arrivée et la sortie des produits de la cellule ne sont pas assurées par l'AGV. Le modèle réseau de Petri associé à cette cellule est présenté sur la Figure 66. La modélisation proposée ici est générique. Si on veut augmenter la taille de la cellule de production, il suffit d'ajouter des éléments en amont et en aval du modèle. La sortie d'un élément (stock, machine) correspond à l'entrée dans un autre élément. La signification des places et des transitions est donnée dans le Tableau 18.

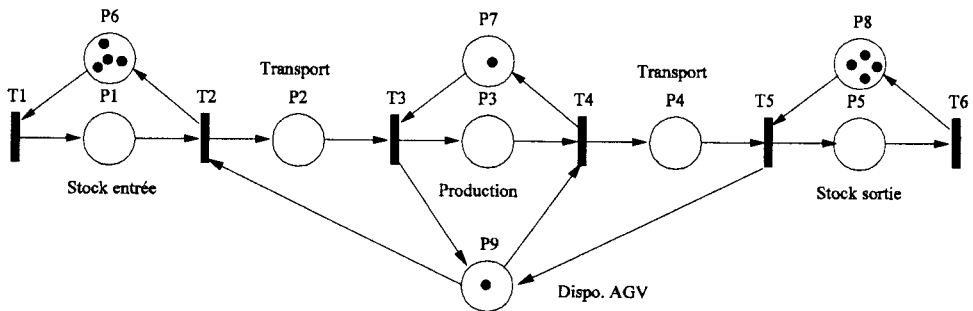


Figure 66 : Modèle RdP de la cellule de production

Places	Signification	Transitions	Signification
$P_1$	Niveau du stock d'entrée	$T_1$	Entrée dans la cellule
$P_2$	Transport (stock vers entité)	$T_2$	Sortie du stock - Début transport
$P_3$	Etat de production	$T_3$	Fin transport - Début production
$P_4$	Transport (entité vers stock)	$T_4$	Fin production - Début transport
$P_5$	Niveau du stock de sortie	$T_5$	Fin transport - Début stockage
$P_6$	Disponibilité du stock entrée	$T_6$	Sortie de la cellule
$P_7$	Disponibilité de l'entité		
$P_8$	Disponibilité du stock sortie		
$P_9$	Disponibilité de l'AGV		

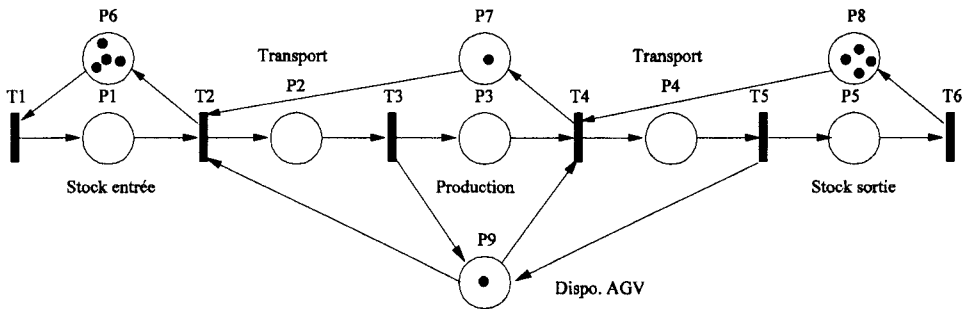
Tableau 18 : Signification des places et des transitions

**Problème de Blocage**

La structure proposée ici comporte des états de blocage du réseau. Prenons le cas où l'entité produit une pièce (1 jeton dans  $P_3$ , pas de jeton dans  $P_7$ ), l'AGV effectue une opération de transport du stock d'entrée vers l'entité (1 jeton dans  $P_2$ , pas de jeton dans  $P_9$ ) : le réseau est alors bloqué. Le marquage du réseau correspondant à ce blocage est le suivant :  $Mb = [0, 1, 1, 0, 0, 4, 0, 4, 0]$ . On ne peut pas franchir  $T_3$  (terminer l'opération de transport), car  $P_7$  ne contient pas de jeton et on ne peut pas franchir  $T_4$  (terminer l'opération de production) car la place  $P_9$  ne contient pas de jeton.

Une solution pour éviter ce blocage est représentée sur la Figure 67. Il suffit de remplacer l'arc reliant la place  $P_7$  et la transition  $T_3$  par un arc reliant la place  $P_7$  à la transition  $T_2$ . On ne commence l'opération de transport que si l'entité de production est disponible. On applique la même solution au transport de l'entité vers le stock de sortie (remplacer l'arc reliant  $P_8$  à  $T_5$  par un arc de  $P_8$  à  $T_4$ ).

On constate également que le modèle proposé ne résout pas le problème d'ordonnancement des tâches de transport du véhicule guidé automatiquement. En effet, la structure du réseau de Petri comporte des conflits structurels et effectifs. La résolution de ces conflits impose des règles de priorité des tâches de transport. Plusieurs solutions sont envisageables :



*Figure 67 : Modèle de la cellule de production sans blocage*

- Définir au préalable un ordonnancement des tâches de transport (suite de tâches de transport à effectuer sur un horizon fini).
- Donner des priorités à certaines opérations de transport. On peut privilégier par exemple le transport de l'entité vers le stock de sortie. On facilite ainsi l'évacuation des pièces de la cellule flexible.

La modélisation de ces solutions peut passer par l'ajout d'arcs inhibiteurs reliés aux transitions de début de transport ou par l'ajout de place supplémentaire modélisant une autorisation de transport. Cette place est reliée avec un arc d'entrée à la transition de début de transport. L'absence de jeton dans cette place interdit l'opération de transport.

**Evaluation de performances**

Pour évaluer les performances de la cellule de production modélisée par les réseaux de Petri, on affecte des temporisations déterministes aux transitions. La valeur des temporisations est donnée dans le Tableau 19. Le marquage initial est celui du modèle présenté sur la Figure 67, c'est-à-dire  $M0 = [0, 0, 0, 0, 0, 4, 1, 4, 1]$ . Après simulation sur un horizon important (afin d'atteindre un régime permanent), on donne la valeur des

marquages moyens de chaque place ainsi que la fréquence moyenne de chaque transition (Tableau 19). La simulation est effectuée avec le programme Matlab donné dans le Chapitre VII4.

Places	Marquage moyen	Transition	Temporisation	Fréquence moyenne
$P_1$	3,625	$T_1$	3	0,125
$P_2$	0,125	$T_2$	1	0,125
$P_3$	0,625	$T_3$	1	0,125
$P_4$	0,125	$T_4$	5	0,125
$P_5$	0,125	$T_5$	1	0,125
$P_6$	0,75	$T_6$	1	0,125
$P_7$	0,25			
$P_8$	3,75			
$P_9$	0,75			

**Tableau 19** : Performances de la cellule de production avec AGV

A partir de ces valeurs, il est possible de dégager de nombreux indices de performances dont voici quelques exemples :

- Productivité de l'unité de production : 62,5%.
- Disponibilité de l'AGV : 75%.
- Niveau moyen du stock d'entrée : 3,625 pièces.
- Niveau moyen du stock de sortie : 0,125 pièce.

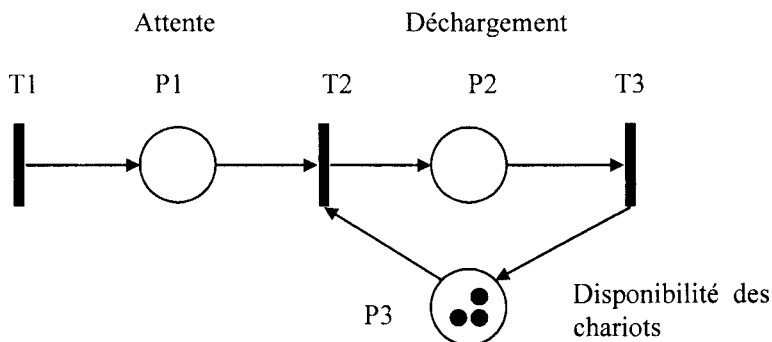
On retrouve une fréquence moyenne de franchissement identiques à toutes les transitions et égale à 0,125 pièce par unités de temps. Ceci s'explique facilement par le fait que c'est l'unité la plus lente qui donne la cadence à toute la cellule. La simulation permet également de vérifier des invariants de marquage sur les capacités des stocks, de l'AGV ou de l'unité de production. Par exemple,  $M(P_4) + M(P_5) + M(P_8) = 0,125 + 0,125 + 3,75 = 4 =$  capacité du stock de sortie ou bien  $M(P_2) + M(P_9) + M(P_4) = 0,125 + 0,75 + 0,125 = 1 =$  nombre d'AGV.

## 5.2 Zone d'expédition

### Modélisation

Une zone d'expédition est dans le cas d'une entreprise manufacturière composée d'une plateforme de stockage, d'un nombre fini de quais et d'un nombre fini de moyens de manutention. La plateforme sert à entreposer les produits prêts à être expédiés et à recevoir les produits prêts à être stockés. Les moyens de manutention déchargent les produits des camions stationnés dans les quais mais également chargent les produits préparés sur la plateforme dans les camions.

Le modèle proposé sur la Figure 68 décrit uniquement la phase de déchargement des camions par des chariots de manutention. La zone de déchargement est composée de 3 quais associés chacun avec un chariot de manutention. Les camions arrivent dans la zone de déchargement, se stationnent devant un quai si celui-ci est libre sinon ils restent en attente. Après déchargement, ils quittent la zone. La signification des places et des transitions est donnée dans le Tableau 20.



**Figure 68** : RdP de la phase de déchargement

Places	Signification	Transitions	Signification
$P_1$	Etat d'attente des camions	$T_1$	Arrivée des camions
$P_2$	Etat de déchargement	$T_2$	Positionnement devant un quai
$P_3$	Disponibilité des chariots	$T_3$	Déchargement + départ

**Tableau 20** : Signification des places et des transitions

### Evaluation de performances

A l'instant initial, seule la place  $P_3$  contient des jetons. Ces trois jetons correspondent au nombre de chariots disponibles dans la zone. Aucun camion n'est dans la zone. Le marquage initial du réseau de Petri est donc  $M_0 = [0 \ 0 \ 3]$ .

La transition source  $T_1$  qui modélise l'arrivée des camions dans la zone est affectée d'une temporisation de 15 minutes, c'est-à-dire que les camions arrivent toutes les 15 minutes. Dès qu'un chariot est libre, il faut 2 minutes pour se positionner (transition  $T_2$ ) et 40 minutes pour être déchargé (transition  $T_3$ ). Le Tableau 21 donne les valeurs des marquages moyens des places et les fréquences moyennes de franchissement des transitions. La Figure 69 donne les courbes d'évolution des marquages des 3 places.

Places	Marquage moyen	Transition	Temporisation (minute)	Fréquence moyenne
$P_1$	0,133	$T_1$	15	0,0666
$P_2$	2,666	$T_2$	2	0,0666
$P_3$	0,33	$T_3$	40	0,0666

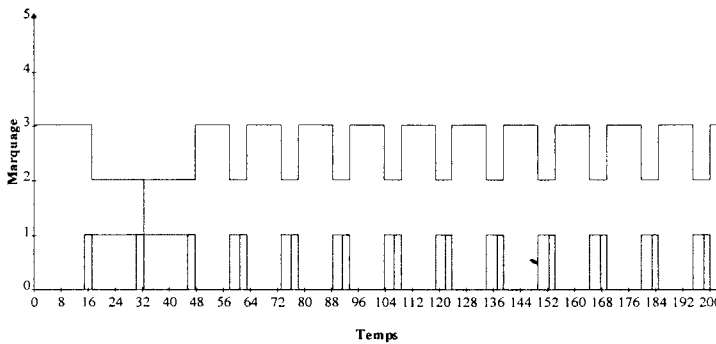
**Tableau 21** : Performances de la zone d'expédition

Ces valeurs permettent de déduire certains indicateurs de performances comme par exemple :

- Taux d'utilisation des chariots :  $2,666 / 3 = 88,8 \%$  ( $= M^*(P_2) / (M^*(P_2) + M^*(P_3))$ ).
- Taux de disponibilité des chariots :  $0,33 / 3 = 11,1 \%$  ( $= M^*(P_3) / (M^*(P_2) + M^*(P_3))$ ).
- Débit moyen de sortie des camions : 0,0666 camions par minute ( $= f^*(T_3)$ ).

Avec  $M^*(P_i)$ , le marquage moyen de la place  $P_i$  et  $f^*(T_i)$ , la fréquence moyenne de franchissement de la transition  $T_i$ .

Dans ce cas simple, le débit de sortie des camions est égal au débit d'entrée des camions car il n'y a pas accumulation de camions dans la zone, c'est-à-dire 1/15 minutes.



*Figure 69 : Courbes d'évolution des marquages*

## 6 Analyse de performances

Les réseaux de Petri offrent plusieurs méthodes d'analyses qui permettent de dégager des propriétés qualitatives et quantitatives relatives à la structure et au comportement du modèle RdP. Parmi les principales propriétés, on peut citer la bornitude du nombre de jetons dans les places, la vivacité des transitions (propriété d'une transition de toujours être franchie à partir de n'importe quel marquage) et la réversibilité (propriété de revenir à un marquage donné en partant d'un autre marquage).

Leur signification par rapport aux systèmes industriels est la suivante :

- La bornitude implique l'absence de dépassement des capacités, comme les éléments de stockage ou les files d'attente qui ont une capacité finie. La bornitude d'une place assure qu'un élément de stockage ou qu'une file d'attente ne sera pas engorgé ou surchargé. Une place ou un réseau 1-borné est appelé place ou réseau sauf. La propriété sauf d'une place opération garantit qu'il n'y pas de tentative de demande d'exécution d'un processus en cours. La propriété sauf d'une place ressource indique la disponibilité d'une seule ressource.
- La vivacité implique l'absence de blocage. Cette propriété garantit que le système peut produire avec succès. De plus, cela assure que tous les états modélisés peuvent apparaître.
- La réversibilité implique le comportement cyclique d'un système. Ceci a des implications sur la résolution des erreurs dans un contexte industriel. C'est à dire que le système peut être initialisé à partir de tous les états atteignables.

# Chapitre VI

## Notions fondamentales d'optimisation

La compréhension exacte des modes de gestions, des solutions pratiquées en contexte réel nécessite un minimum de connaissances en recherche opérationnelle. Certains choix de méthodes ou même la possibilité d'envisager certaines pistes nouvelles d'amélioration ont besoin de ce type de connaissances. Cette partie du document est alors dédiée aux rappels des notions fondamentales en techniques d'optimisation et de recherche opérationnelle. Une partie de ces rappels est inspirée des travaux de Chu [11] et Yalaoui [42].

La recherche de la meilleure solution suivant un ou plusieurs critères (de minimisation ou de maximisation) pour résoudre un problème donné en prenant en compte ses contraintes organisationnelles, matérielles, humaines, technologiques, ... est appelée optimisation.

L'optimisation de tout problème passe par une série d'étapes, quasi incontournables, que sont :

- L'identification et l'expression précise de la problématique.
- La formalisation et la modélisation du problème : utilisation de technique de modélisation mathématique type programmation linéaire, programmation dynamique, technique de files d'attente, les réseaux de pétri, ... ou également une modélisation informatique. La modélisation consiste en général à :
  - Définir la structure du problème.
  - Identifier et choisir les variables de décision.
  - Lister, de manière claire et exhaustive, les contraintes nécessaires pour la réalisabilité d'une solution.
  - Établir le ou les critères à optimiser.
- Résolution (recherche de solution réalisable) et optimisation (choix intelligent et prévu de solutions optimales de l'ensemble des solutions et cela dans la mesure du possible).

Les principales étapes de l'optimisation ci-dessus représentent également une délimitation et une prise en main complète d'un problème. Ce contournement du problème est donné par l'algorithme suivant :

- Etape1 : Identifier : expression et recensement des difficultés et caractéristiques du problème.
- Etape2 : Modéliser : choix de protocole ou de méthodologie permettant de restituer formellement et fidèlement (mathématiquement et/ou informatiquement) le problème posé.
- Etape 3 : Evaluer la complexité : évaluation de la difficulté d'obtention de solutions aux problème posé.
- Etape 4 : Répondre : construction et élaboration de proposition de résolution avec comme étapes récursives jusqu'à saturation :
  - Résoudre.
  - Optimiser.
  - Améliorer : la technique de résolution.

- Etape 5 : Validation : validation les solutions, leur qualité et leur pertinence, en respectant un protocole confirmé et préétabli. Sinon aller à l'Etape 2.
- Etape 6 : Mise en place et réalisation : finalisation du travail d'optimisation.

Dans ce qui suit, quelques notions évoquées ci-dessus sont détaillées.

## 1 Modélisation

Globalement, la modélisation consiste à *décrire*, *identifier* et à *formaliser* le problème. Elle prend en compte :

- Données : les durées, les lois de variation, ... toutes caractéristiques du problème.
- Contraintes : organisationnelles, de ressources, ... toutes conditions indispensables à la viabilité de la résolution du problème.
- Critères (Fonction Objectif) : gain, rapidité, efficacité, ... toute fonction permettant de juger de la pertinence et de l'intérêt d'une solution.
- Variables de décisions : les variables à quantifier correctement afin de résoudre efficacement (optimalité) le problème.

### 1.1 Type de modélisation

Il faut essentiellement distinguer trois types de modélisation que sont :

- Mathématique : les contraintes et la fonction objective peuvent être décrites sous forme d'expressions mathématiques. Ceci se fait en adoptant une démarche spécifique, avec parmi celles-ci :
  - La Programmation linéaire.
  - La Programmation linéaire en nombres entiers.
  - La Programmation dynamique, et autre ...
- Informatique (simulation, symbolique) : les contraintes et la fonction objectif sont décrites suivants des formalismes informatiques. Ce mode de représentation est applicable à tout problème. Néanmoins son efficacité est surtout avérée pour le cas où les contraintes et la fonction objectif ne sont pas analytiquement exprimables ou le sont lourdement.
  - Utilisation de logiciels dédiés : Siman-Arena, Witness, Prélude, MissRdP et MocaRdP, ... chaque logiciel ou outil a un champ d'utilisation bien défini.
  - Langage de programmation de base C, C++, C builder, Delphi,...
- Mixte : ce type de représentation largement répandue est la combinaison des deux précédentes a savoir l'analytique et l'informatique.

Les limites entre les différents types de représentation ne sont pas strictes. Il arrive souvent que des problèmes mathématiquement représentés sont résolus grâce à des méthodes numériques qui passent alors forcément par des transcriptions informatiques du problème. Au même titre, des problèmes, pour lesquels des formalisations analytiques sont difficiles, sont décomposés en problèmes plus simples pour lesquels des représentations analytiques sont possibles. Alors on associe à la modélisation informatique de ce type de problème une liste de transcriptions informatiques de modèles mathématiques.



## 2 Complexité

La complexité est la mesure de la difficulté et des moyens nécessaires pour résoudre un problème donné. La théorie actuelle est basée sur les moyens (informatiques) existants ( $P \neq NP$ ).

- Polynomiale.
- Non-polynomiale (NP-difficile).
- Hors classe.

A travers les différentes études réalisées sur un grand nombre de problèmes, la résolution de certains d'entre eux semble plus difficile à réaliser que d'autres. Fort de ce constat, des recherches ont été entreprises et elles se sont soldées par l'élaboration d'une théorie sur la complexité des problèmes. Cette dernière a permis de classer les problèmes en deux catégories : les classes P et NP.

La classe  $P$  comporte les problèmes de décision qui admettent une résolution par des algorithmes polynomiaux. Un algorithme est dit polynomial si son temps d'exécution est borné par  $O(p(x))$  où  $p$  est un polynôme et  $x$  est la longueur d'entrée d'une instance du problème. Les algorithmes, dont le temps d'exécution ne peut pas être borné polynomialement, sont dits d'exponentiels.

Pour plus d'informations sur ce sujet, on recommande les travaux de Yalaoui [42] et le livre de Prins [32]. En résumé, voici les trois catégories de problèmes :

- Problème Polynomial : Ce type de problème admet une solution calculable en temps *polynomial* en terme de données (de base) du problème. Polynôme d'ordre  $O(p(n))$  (les développements limités) pour  $n$  pièces à stocker par exemple ( $O(n^2)$ ).
- Problème NP-difficile (*NP-Hard*) : Il n'admet pas de solution calculable en temps *polynomial* mais plutôt *exponentiel*. La complexité de ce type de méthode peut être par exemple en  $O(2^n)$ . Deux catégories sont référencées :
  - NP-difficile au sens FAIBLE : possibilité de méthode polynomiale en fonction d'une combinaison de données mais non pas en caractéristique de base du problème. Ce type de méthode, ou problème, est alors dit Pseudo-polynomiale.
  - NP-difficile au sens FORT : par opposition au type précédemment cité c'est à dire une absence d'algorithmes Pseudo-polynomiaux.
- Hors classe : se sont des problèmes pour lesquels la détermination de la complexité est difficile et même impossible avec les connaissances actuelles.

## 3 Méthodes d'optimisation classiques

Partant de la classification précitée, l'approche de résolution de chaque problème dépend de sa complexité. La résolution de problème de la classe  $P$  est automatiquement orientée vers l'élaboration d'algorithmes polynomiaux, ce qui n'est pas le cas des problèmes de la classe  $NP$  où l'obtention de ce type d'algorithmes est peu probable. La résolution des problèmes polynomiaux est basée sur la mise en place de techniques permettant, moyennant la détermination de caractéristiques d'optimalité propres, de trouver la (les) solution (s) optimale (s) en temps polynomial.

Pour la classe de problèmes NP, différentes méthodes de résolution ont été développées. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes que sont les méthodes exactes et les méthodes approchées.

### 3.1 Méthodes exactes

Une méthode est exacte si elle permet l'obtention d'une solution optimale garantie au problème posé pour n'importe quelle instance numérique. Parmi ces méthodes, on a celles basées sur la programmation mathématique : linéaire, entière ou dynamique, les méthodes arborescentes (séparation et évaluation), la théorie des graphes etc.

Toutes ces méthodes se caractérisent surtout par un temps de calcul exponentiel, pour la résolution des problèmes NP-difficiles, ce qui réduit leur efficacité à la résolution de problèmes de petites et moyennes tailles. En fonction de la problématique, la notion de petites, moyennes et grandes tailles est spécifiques pour l'ordonnement. Quelques unes d'entre elles vont être présentées.

### 3.2 Méthode arborescente

Cette méthode, appelée aussi procédure par séparation et évaluation (ou *branch-and-bound*), est basée sur une exploration intelligente de l'espace des solutions. Elle consiste à décomposer le problème initial en sous problèmes de plus en plus petits. Son déroulement peut être schématisé par un arbre. Ses différentes étapes sont, pour un problème d'ordonnement avec minimisation d'un critère donnée, les suivantes :

- Calculer une borne supérieure de la solution optimale. Cette borne sera réactualisée tout au long de la résolution et ce chaque fois qu'une solution réalisable de valeur inférieure est trouvée.
- Choisir un point de branchement en utilisant une stratégie d'exploration qui peut être soit
  - en profondeur : en prenant en premier un des fils du dernier sommet séparé,
  - en largeur : qui privilégie les nœuds de même niveau (même taille de solution partielle}), ou
  - suivant la borne inférieure : appelée aussi stratégie progressive où on sépare en premier le nœud avec la plus faible évaluation. Chaque nœud est évalué en calculant une borne inférieure de la meilleure solution partant de ce nœud et en vérifiant le respect des propriétés de dominance.
- Ce processus est répété jusqu'à l'obtention de la solution optimale. L'exploration de certaines branches de l'arbre est coupée par l'aboutissement de l'évaluation d'un nœud à une borne inférieure plus grande que la borne supérieure en cours ou à la violation d'une propriété de dominance. Cette élimination de branches permet de ne pas énumérer réellement toutes les solutions et augmente les chances d'obtenir une solution optimale durant un temps plus court.

On constate à travers la présentation précédente, que certaines notions sont liées à ce type de méthode, à savoir :

- La borne inférieure qui est une valeur, obtenue après relaxation de certaines contraintes considérées au départ, minorant toutes solutions réalisables du problème posé.
- La borne supérieure qui est une solution supérieure à toutes solutions optimales du problème.

- La propriété de dominance qui est une caractéristique particulière, mathématiquement prouvée, liée au problème posé. Elle permet, sur un ensemble de solutions partielles du problème, de déterminer celles susceptibles d'aboutir à une solution optimale si elles sont complétées. Ce type de résultats permet de prendre la décision de compléter ou pas une solution partielle et alors de distinguer les solutions dominantes.
- La stratégie de branchement qui est une politique d'exploration de l'arbre de résolution.

### 3.3 Programmation Dynamique

Cette méthode a été établie par Bellman [6] en 1957. Ses domaines d'application sont très vastes. La programmation dynamique est fondée sur une approche récursive. Elle part d'un problème de dimension  $N$  et le décompose en un ensemble de problèmes de dimensions plus petites. Le système est alors constitué d'au maximum  $N$  étapes que l'on résout séquentiellement, le passage d'une étape à une autre se fait à partir des lois d'évolution du système et d'une décision. Les problèmes résolus par la programmation dynamique se ramènent au choix d'une suite (finie ou infinie selon le problème) de décisions séquentielles, appelée politique, faisant évoluer l'état d'un système. Cette méthode construit une solution optimale pour des critères donnés sous certaines hypothèses. Elle est basée sur le principe d'optimalité qui affirme que : pour tout processus de décision séquentielle et tout critère vérifiant la propriété de Markov, toute sous politique d'une politique optimale est aussi optimale à condition d'avoir une équation reliant différents états du processus. Alors l'utilisation de la programmation dynamique est conditionnée par l'existence d'une équation récursive permettant de décrire la valeur optimale du critère, à un niveau donné du système, en fonction de sa valeur du niveau antérieur.

### 3.4 Modélisation analytique et programmation linéaire

Cette méthode consiste à formaliser mathématiquement un problème et ce en identifiant sa fonction objectif et ses différentes contraintes. Elle permet de cerner clairement le problème et de le résoudre en utilisant les outils appropriés. Reste que cette méthode est limitée à certains types de problèmes qui admettent le plus souvent une modélisation en programmation linéaire.

Un programme mathématique est une représentation mathématique d'un domaine  $D$  de solutions réalisables, défini par un ensemble d'équations et/ou d'inéquations. Un programme linéaire est un programme mathématique avec des équations et/ou inéquations linéaires et également une fonction objectif linéaire.

Il existe actuellement différents langages de modélisation, tels que MPL, GAMS, LINGO, qui permettent de transcrire aisément et de manière formelle des programmes linéaires, similaires à l'écriture mathématique. Ces langages de modélisation peuvent être combinés avec des solveurs, tels que CPLEX, OSL, XPRESS, ou générer des fichiers utilisables par ces solveurs.

### 3.5 Méthode du Simplex

Partir de la forme standard du problème. Il faut que  $\text{rang}(A)=m < n$  ( $m$  colonnes indépendantes, pour la base  $B$ , dans la matrice  $A$ , avec  $n$  nombres de variables de décisions).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiser } Z = C^T x \\ \text{Sous contraintes :} \\ Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Z(\max) + 0^T x_B + (C_B^T A_B^{-1} A_L - C_L^T) x_L = C_B^T A_B^{-1} b \\ \quad \quad \quad + x_B + (A_B^{-1} A_L) x_L = A_B^{-1} b \end{array} \right.$$

La technique consiste à transformer le problème initial en une suite de problèmes équivalents. Cette transformation s'arrête après obtention d'un problème avec résolution immédiate (Coefficients de la ligne de  $Z$  positifs ou nuls) [11].

Le déroulement succinct de la méthode consiste à :

- Partir de la forme standard du problème.
- Choisir une variable libre à la faire rentrer en base.
- Choisir la variable avec le plus petit coefficient (négatif) et donc le plus grand en valeur absolue de la ligne de  $Z$ .
- Choisir une variable à faire sortir de la base. Sortir la variable en base qui a le plus petit ratio (positif) entre la valeur de la colonne  $b$  et la colonne de la variable entrante. Ceci permet d'avoir une nouvelle base réalisable. Faire des réductions de Gauss pour avoir la nouvelle base.
- Répéter les entrées sorties jusqu'à l'obtention de coefficients tous nuls ou positifs de la ligne  $Z$ . La solution est alors obtenue.

### 3.6 Méthode Graphique

Lorsque le nombre de variables est faible (inférieure à 2) sous forme canonique, ou lorsque ( $n-m < 2$ ) avec  $n$  variables et  $m$  contraintes sous forme standard, on peut utiliser la méthode graphique. Pour cela on représente les variables de décisions  $y_1$  et  $y_2$  par les axes. Chaque contrainte partage le plan en deux demi faces : une demi face réalisable selon la contrainte en question et une demi face non réalisable. La frontière est une droite. L'interaction des demi faces réalisables définit l'ensemble  $D$ , domaine réalisable pour le problème posé.

La fonction objectif est une droite avec comme paramètre  $Z : Z = C_1 y_1 + C_2 y_2$ . Le vecteur  $(C_1, C_2)$  qui est perpendiculaire à cette droite donne une direction à déplacer la droite pour augmenter la valeur de  $Z$  (Maximisation). Lorsque la droite ainsi déplacée se trouve sur la limite du domaine réalisable, on atteint l'optimum.

### 3.7 Méthodes approchées

Ces méthodes sont aussi appelées heuristiques. Une heuristique est une méthode qui permet d'obtenir des solutions réalisables sans assurer leur optimalité. Il existe une grande variété de méthodes selon les problèmes à traiter. Un grand nombre de ces méthodes peuvent être classées dans des familles mais certaines d'entre elles sont inclassables. Parmi ces méthodes, on distingue celles par construction, par décomposition, par relaxation.

### 3.8 Les méthodes par construction

Ce sont des méthodes itératives qui complètent, à chaque itération, une solution partielle. Parmi cette classe, on trouve en particulier des méthodes gloutonnes (*greedy methods*). Ce sont des méthodes qui ne reviennent jamais sur une décision prise à une

itération précédente. Parmi ces méthodes, on a les algorithmes de liste et les méthodes par construction progressive.

Les algorithmes de liste, pour des problèmes d'ordonnancement, consistent d'abord à déterminer une liste ordonnée de travaux selon un critère donné, ensuite à construire un ordonnancement suivant l'ordre de la liste. Pour les méthodes par construction progressive, elles sont différentes des méthodes précédemment citées, par la construction dynamique de la liste. C'est à dire que la liste des tâches est recalculée à chaque étape de la résolution.

### 3.9 Les méthodes par décomposition

Elles consistent à décomposer le problème posé en un système de problèmes de plus petites tailles. On trouve la décomposition structurelle, spatiale, temporelle, etc.

En ordonnancement, par exemple, la méthode de décomposition temporelle consiste à ordonnancer un sous-ensemble de tâches ou d'opérations sélectionnées en utilisant un certain critère ou caractéristique comme la date de disponibilité. L'ordonnancement obtenu est fixé pour les tâches ou opérations exécutées jusqu'à une certaine date. Le reste des tâches ou des opérations est ensuite considéré avec celles qui n'appartiennent pas au sous-ensemble. Ce processus continue jusqu'à ce que toutes les opérations soient ordonnancées.

### 3.10 Méthodes de relaxation

Les méthodes dites de relaxation sont, comme l'indique leur nom, des méthodes basées sur la relaxation de certaines contraintes. Ces relaxations permettent alors d'obtenir des problèmes plus simples par rapport au problème initialement posé et qui sont plus faciles à résoudre. La résolution des problèmes relaxés faite, une technique de recomposition permet alors de remonter et d'obtenir la solution au problème posé. Parmi ces méthodes, on trouve la relaxation lagrangienne, les multiplicateurs de Lagrange, etc.

### 3.11 Les méthodes amélioratrices, de recherches globales ou métaheuristiques

Ce sont des méthodes itératives qui travaillent directement d'une itération à l'autre sur une solution complète. Généralement, ce type de méthode commence par l'élaboration d'une solution initiale de manière aléatoire ou à l'aide de méthodes constructives. Ensuite à chaque étape, des modifications sont apportées à la solution courante et ce jusqu'à la satisfaction d'un certain critère d'arrêt. Ces méthodes font appel à une notion dite de voisinage. On comprend par voisinage d'une solution, toute solution proche suivant un certain critère et créée par une ou plusieurs modifications sur la solution en question. De ces méthodes, on peut citer les suivantes.

#### Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont dus à John Holland et à son équipe qui ont été relayés par des auteurs tels que : Goldberg [19] et Man [29]. Le travail de ces chercheurs était de développer une analogie entre un individu dans une société et une solution dans un problème d'optimisation [42]. La similitude réside dans le fait que chaque solution est caractérisée par une structure de données qui représente son empreinte génétique, ce que possède tout être vivant. Chaque personne a une force d'une certaine valeur, ce que détient également une solution. Cette valeur est calculée en utilisant la fonction objective associée au problème. L'algorithme génère une population initiale d'individus et utilise ensuite les opérateurs génétiques courants comme le croisement ou la mutation.

La structure générale de l'algorithme génétique est la suivante :

1. Initialisation de la population des chromosomes.
2. Evaluation de chaque chromosome de la population.
3. Création de nouveaux chromosomes par croisement et mutation.
4. Evaluation des nouveaux chromosomes.
5. Elimination des chromosomes non sélectionnés (par la roulette par exemple).
6. Vérification du test d'arrêt (nombre d'itérations ou non amélioration de la solution sur un certain nombre d'itérations). S'il n'est pas vérifié, aller en 3.

L'empreinte génétique ou le codage est une représentation de tous les paramètres et de toutes les données qu'un individu doit posséder. Elle doit contenir toutes les informations et les caractéristiques d'une solution du problème. Cette représentation peut prendre plusieurs formes, comme des 0 et 1, auquel cas on parle de codage binaire, ou des valeurs réelles. Le codage peut représenter directement une solution du problème et il est alors appelé codage direct, ou des informations sur des paramètres permettant d'obtenir la solution après interprétation, on parle dans ce cas de codage indirect. Les opérateurs de croisement sont des algorithmes qui, en combinant deux individus (chromosomes), permettent d'obtenir un ou plusieurs individus selon le type de croisement. Le déroulement général de ce type d'algorithme consiste :

- A choisir deux individus de la population, suivant un taux de croisement fixe.
- A choisir un point (ou plusieurs points ou pas du tout selon les croisements) sur la longueur des chromosomes, appelé point de croisement.
- A découper les individus en parties par rapport à ce point (ou à ces points) et de les recombinaison selon des règles propres à chaque type de croisement pour construire ainsi la structure des enfants.

Les opérateurs de mutation sont des opérateurs asexués car, contrairement aux opérateurs de croisement qui partent de deux individus pour la création d'enfants, la mutation utilise uniquement un individu et effectue des changements au sein de sa structure. La mutation consiste à choisir un chromosome avec une probabilité dite de mutation et d'effectuer des changements. Les deux types de modifications les plus couramment utilisés sont :

- De tirer au hasard un gène du chromosome choisi pour être muté et le modifier aléatoirement.
- De tirer aléatoirement deux gènes et interchanger leurs valeurs respectives.

La sélection est une phase qui suit l'étape d'évaluation des individus, elle consiste à décider des individus à prendre pour construire la population de la prochaine génération. Le choix des individus peut se faire soit en ne prenant que les meilleurs de la génération actuelle auquel cas on parle de sélection élitiste, ou bien en mettant en place et en prenant des individus suivant une probabilité dite de sélection.

### Recuit simulé

Le recuit simulé est une méthode d'optimisation développée par Kirkpatrick et al. [42]. Le principe du recuit simulé découle des résultats de processus thermiques et essentiellement de l'étude sur la recherche de stabilité des corps et du comportement de ces derniers durant la phase de transition entre des états instables (ou de désordre) et des états de stabilité (ordre ou pseudo-ordre). Le déroulement se présente de la manière suivante : On part d'une température initiale  $T_0$  et d'une solution initiale  $A_0$ . On fait décroître la température suivant la formule mathématique :  $T=(x)*(T_0)$ , avec  $x<1$  (ce qui

représente une suite géométrique de raison  $x$ ). A chaque valeur de température, appelée niveau ou palier, on effectue un certain nombre de transformations et de perturbations sur la solution correspondante au palier (la solution courante). Ce procédé se réitère jusqu'à ce que une certaine température limite ou finale  $T_f$  soit atteinte. A chaque palier, on prend une solution de départ (si on est au premier niveau, elle est la solution initiale, sinon on prend la valeur communiquée par le traitement du palier précédent), on lui effectue une transformation grâce à une fonction dite de voisinage (recherche d'une autre solution dans le voisinage de la solution courante) et on calcule la valeur de la nouvelle solution en utilisant une fonction objectif  $F$ . Deux cas sont alors possibles :

- si la variation entre le nouvel état (solution) et l'ancien est négative alors il y a amélioration dans le cas d'une minimisation, ceci va permettre de réactualiser la solution courante et la valeur de la fonction objectif,
- sinon la nouvelle solution trouvée est acceptée comme solution courante avec une probabilité :  $P = \exp\left(\frac{-\Delta F}{T}\right)$ .

Avec  $\exp$  : la fonction exponentielle ;  $\Delta F$  : la variation de la valeur de la fonction objectif entre la nouvelle solution et l'ancienne ;  $T$  : température du palier en cours d'étude.

On note bien que la probabilité est d'autant plus petite que  $\Delta F$  est grande ou que  $T$  est petit. Cela signifie que plus la solution trouvée est mauvaise, plus la probabilité qu'elle soit acceptée est petite. Une mauvaise solution a plus de chance d'être acceptée comme solution courante au début de l'algorithme que vers la fin. Ceci correspond au niveau haut de  $T$ . Ensuite, après une série de perturbations, on fait baisser la température selon la formule  $T = (x) * (T_0)$  avec  $x < 1$  et on passe alors à un nouveau palier. L'algorithme du recuit simulé s'arrête en arrivant à la température limite  $T_f$  fixée initialement.

### Méthode de descente

Elle consiste à sélectionner une solution de coût plus faible dans le voisinage de la solution courante. Ce type de méthode se distingue par une rapidité d'exécution mais avec un risque d'aboutir à de mauvaises solutions car elle s'arrête dès qu'un optimum local est atteint. Parmi ces méthodes, on cite les méthodes de type *r-opt*.

### Recherche tabou

Ces méthodes ont été inventées par Glover [18] vers 1985. Elles sont de conception plus récente que le recuit simulé, et n'ont aucun caractère stochastique et paraissent meilleures à temps d'exécution égale. Elles sont caractérisées par trois points fondamentaux :

- A chaque itération, on examine complètement le voisinage  $V(s)$  de la solution actuelle  $s$ , et on va sur la meilleure solution  $s'$ , même si le coût remonte.
- On s'interdit de revenir sur une solution visitée dans un passé proche grâce à une liste taboue  $T$  stockant de manière compacte la trajectoire parcourue. On cherche donc  $s'$  dans  $V(s)-T$ .
- On conserve la meilleure solution trouvée en cours de route car, contrairement au recuit simulé, c'est rarement la dernière. On stoppe après un nombre maximal  $N_{max}$  d'itérations, ou après un nombre maximal d'itérations sans améliorer la solution ou quand  $V(s)-T = \emptyset$ . Ce dernier cas ne se produit que sur de très petits problèmes pour lesquels le voisinage tout entier peut se trouver enfermé dans  $T$ .

D'un point de vue pratique, cette méthode permet d'obtenir de bonnes performances et ce malgré l'absence de résultats théoriques assurant la convergence de l'algorithme vers la solution optimale.

### 3.12 Evaluation des algorithmes approchés

De manière générale, l'évaluation de la qualité d'une certaine heuristique se fait en déterminant le rapport ou l'écart entre la valeur de la solution calculée par l'heuristique et la valeur d'une solution optimale. Pour une méthode approchée  $A$  et une instance  $p$  d'un problème donné, en notant  $A(p)$  la valeur de la solution obtenue à l'aide de la méthode  $A$  et  $OPT(p)$  la valeur d'une solution optimale (si on arrive à la calculer) alors  $\rho_A(p) = \frac{A(p)}{OPT(A)}$  représente la performance relative de  $A$  par  $p$ . Il existe différents types de performance relative suivant le mode d'évaluation [32].

- Evaluation a priori : la performance relative au pire cas (*worst case performance ratio*)  $P_A$  d'une méthode approchée  $A$  représente sa plus mauvaise performance relative possible ou sa performance relative dans le pire des cas sur l'ensemble des données possibles.  $P_A = \text{Max}_{(p)}\{\rho_a(p)\}$ . A partir de ce type de résultat, un algorithme est dit de type ( $P_A$ -*approximation*) s'il s'exécute en temps polynomial avec une performance dans le pire cas, notée  $P_A$  avec  $P_A > 1$ , ne dépassant pas  $P_A * OPT$ .
- Performance relative en moyenne : elle consiste à étudier le comportement moyen de l'heuristique en calculant le ratio, précédemment présenté, non pas uniquement pour le pire cas mais aussi pour la moyenne d'un ensemble de données ou d'instances.
- Evaluation a posteriori : elle est indispensable lorsque la solution optimale n'est pas calculable. Il est alors possible d'évaluer la qualité de l'heuristique en la comparant avec d'autres heuristiques ou avec des bornes inférieures ou supérieures de la solution optimale. Pour ce dernier cas, on effectue une évaluation dite par défaut et ce en remplaçant l'optimum  $OPT(p)$  par un minorant  $LB(p)$  et alors

$$\rho_A(p) = \frac{A(p)}{OPT(A)} \leq \frac{A(p)}{LB(p)}.$$

## 4 Conclusion

Cette partie a pour but de donner une idée générale sur le monde de l'optimisation et ses différentes déclinaisons. Des évolutions sont continues et permanentes dans la construction de nouvelles approches. La méthode des colonies de fourmis [36] en fait partie.



# Chapitre VII

## Programmes informatiques

### 1 File d'attente M/M/S (Macro sous Microsoft Excel)

Tout d'abord, quelques conseils pour créer une macro Excel.

- Cliquer dans la barre d'outil Excel *Outil / Macro / Macros*. Une fenêtre s'ouvre.
- Taper le nom de la macro (par exemple *mms*) puis cliquer sur *créer*. Une feuille de projet VBA s'ouvre automatiquement avec écrit :

```
Sub mms()
```

```
End Sub
```

- Insérer ensuite le code suivant :

```
' Calcul d une file d attente M/M/S
```

```
Dim lambda As Integer
```

```
Dim mu As Integer
```

```
Dim taux As Variant
```

```
Dim tauxS As Variant
```

```
Dim fact(15) As Variant
```

```
fact(0) = 1
```

```
MsgBox "calcul d une file d'attente MMS"
```

```
lambda = InputBox("Entrée la valeur du taux d'arrivée lambda")
```

```
mu = InputBox("Entrée la valeur du taux de service")
```

```
S = InputBox("Entrée le nombre des serveurs")
```

```
taux = lambda / mu
```

```
tauxS = lambda / mu / S
```

```
' calcul factorielle -----
```

```
For i = 1 To 15
```

```
fact(i) = fact(i - 1) * i
```

```
Next i
```

```
' calcul du taux d'engorgement
```

```
If (lambda / mu / S) >= 1 Then
```

```
MsgBox "S trop faible : engorgement"
```

```
While (lambda / mu / S) >= 1
```

```
S = S + 1
```

```
Wend
```

```
MsgBox "Nombre de serveurs mini : " & S
```

```
End If
```

```
tauxS = lambda / mu / S
```

```
' calcul de la somme -----
```

```
For i = 0 To S - 1
```

```

som = som + 1 / fact(i) * taux ^ i
Next i

' calcul de Po -----
Pofilemms = 1 / (som + 1 / ((1 - tauxS) * fact(S)) * taux ^ S)

' calcul de Q : nombre moyen de clients dans la file -----
Qfilemms = tauxS * taux ^ S * Pofilemms / fact(S) / ((1 - tauxS) ^ 2) + taux

' calcul de T : nombre moyen de clients dans la file -----
T = Qfilemms / lambda

' affichage des résultats -----

Range("A1").FormulaR1C1 = "Taux d'arrivée "
Range("A2").FormulaR1C1 = "Taux de service"
Range("A3").FormulaR1C1 = "Nombre de stations"
Range("B1").FormulaR1C1 = lambda
Range("B2").FormulaR1C1 = mu
Range("B3").FormulaR1C1 = S
Range("A4").FormulaR1C1 = "Probabilité P0"
Range("A5").FormulaR1C1 = "Nombre moyen Q"
Range("A6").FormulaR1C1 = "Temps moyen T"
Range("B4").FormulaR1C1 = Pofilemms
Range("B5").FormulaR1C1 = Qfilemms
Range("B6").FormulaR1C1 = T
Range("A7").FormulaR1C1 = "Taux d'engorgement"
Range("B7").FormulaR1C1 = tauxS

```

## 2 Ordonnancement cyclique de robot (Matlab)

```

% cyclic flowshop scheduling
% Algorithme Levner Cats

clear all
disp(' Ordonnancement cyclique de robot ')

% ***** donnees *****
d = [ 5 7 3 3 4 2]
t = [0 17 11 11 25 27]
r = [1 0 3 2 5 7 ; 3 2 0 3 6 4 ; 4 6 2 0 3 5 ; 5 5 3 1 0 3 ; 6 3 1 3 2 0 ; 8 1 3 4 2 1]
r1=[zeros(1,length(r));r, zeros(length(r)+1,1)]
m=4 % ***** nombre de machine sans m0 et Mn *****
TOmin = [ ];
Z = [ ]; % vecteur des temps d'exécution
Y = [ ]; % vecteur des temps d'exécution modulo le temps de cycle optimal
Z(1)=0;
l=[ ];

% **** calcul des bornes inferieures et superieures *****

disp(' temps de cycle maximal')
Tmax = sum(d)+sum(t)+r(length(r),1)
disp(' temps de cycle minimal')
for i = 2 : length(d)
    TOmin = [TOmin; d(i-1)+t(i)+d(i)+r(i,i-1)];
end

```

```

Tmin = max(TOmin)

% **** calcul des completion times ****
for i = 2 : length(d)
    Z(i) = Z(i-1) + d(i-1) + t(i);
end
disp(' completion times')
Z1 = [0:length(d)-1;Z]

% **** calcul des intervalles l ****
for j=1:length(d)
    for i=1:length(d)
        if i>j
            Tprime= Z(i)-Z(j)-d(j)-r1(j+1,i);
            Tsecond=Z(i)-Z(j)+d(i)+r1(i+1,j);
            l=[i-1,j-1,Tprime,Tsecond];
        end
    end
end

% **** adjonction de Tmin ****
l = [l;[0 0 0 Tmin]];

% **** creation des sous ensemble lm
for i=1:m
    l=[l;l(:,1:2),l(:,3:4)/i];
end

% **** classement par ordre croissant ****
l = sortrows(l,[3 4]);
for i=2:length(l)
    if l(i,4) < l(i-1,4) l(i,3:4)=l(i-1,3:4);
    elseif l(i,3) < l(i-1,4) l(i,3)=l(i-1,3);
    end
end

% **** Temps de cycle optimal ****
disp(' temps de cycle optimal ')
Topt = [0,max(l(find(l(:,3)==0),4))]

% **** Determination du cyle ****
div = fix(Z./max(Topt)); % valeur des multiples
for i=1:length(Z1)
    Z1(2,i) = Z1(2,i) - div(i)*Topt(2);
end
disp(' ordonnancement des activités du robot')
ordo=sortrows(Z1',2)

```

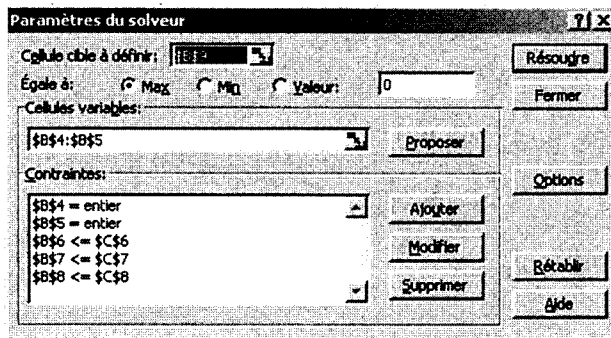
### 3 Sélection d'équipements : Solveur Microsoft Excel

Le solveur du logiciel Microsoft Excel permet de définir et de résoudre des problèmes formulés sous forme de contraintes linéaires ou non. Les variables peuvent être rationnelles, entières ou binaires. La fonction objective peut être minimisée, maximisée ou atteindre une valeur cible.

Pour utiliser le solveur, cliquer sur :

- *Outils/solveur*

La boîte de commande suivante apparaît :



Cette boîte de commande permet de définir les cellules de la feuille Excel qui sont soit la fonction objective (*cellule cible à définir*), soit les variables (*cellules variables*), soit les contraintes.

Si la commande solveur n'apparaît pas, aller dans le menu :

- Outils/macro complémentaires/solveur

### Exemple PLNE

Soit le Problème Linéaire en Nombre Entier (PLNE) à deux variables  $x_1$  et  $x_2$  suivant :

Fonction objective à maximiser :

$$\text{Max } z = 2x_1 + x_2$$

Soumise aux contraintes :

$$x_1 + x_2 \leq 5$$

$$-x_1 + x_2 \leq 0$$

$$6x_1 + 2x_2 \leq 21$$

$$x_1, x_2 \in \mathbb{N} \text{ (entier naturel)}$$

La feuille Excel se remplit de la façon suivante :

	A	B
1	0	0
2	0	0
3	=A1+A2	5
4	=-A1+A2	0
5	=6*A1+2*A2	21
6	=2*A1+A2	

Les cellules A1 et A2 définissent les variables  $x_1$  et  $x_2$ .

Les cellules A3, A4 et A5 définissent les équations des contraintes tandis que les cellules B3, B4 et B5 définissent les valeurs limites des contraintes.

La cellule A6 définit la fonction objective.

Une fois tous les champs renseignés, l'appui sur le bouton *Résoudre* donne la solution du PLNE :

$$(x_1, x_2) = (3, 1) \text{ et } z = 7.$$

Toutes les valeurs des variables, des contraintes et de la fonction objective sont retrouvées dans la feuille Excel.

	A	B
1	3	0
2	1	0
3	4	5
4	-2	0
5	20	21
6	7	

Pour toutes informations complémentaires, n'hésitez pas à consulter l'aide d'Excel en tapant le mot clé : *solveur*.

### Application : sélection d'équipements

Dans cette partie, les éléments pour résoudre le problème de sélection d'équipements sont décrits au paragraphe Chapitre IV1. La démarche d'utilisation du solveur de Microsoft Excel est donnée au paragraphe précédent.

En premier temps, il est nécessaire de rentrer l'ensemble des caractéristiques du problème (données, variables, contraintes et fonction objective) dans une feuille de calcul Excel (représentée sur la Figure 70). On retrouve sur la partie droite de la feuille les données du problème, avec les temps et les différents coûts de déplacement par équipement (cellules F2 à J21), et sur la partie gauche la déclaration des variables X11 à X36, Y1 à Y3 (cellules B2 à B22), les différentes contraintes (cellules B23 à B31) et enfin la fonction objective (cellule B32) à minimiser qui est égale à :

$$H12*B2+H13*B3+H14*B4+H15*B5+H16*B6+H17*B7+I12*B8+I13*B9+I14*B10+I15*B11+I16*B12+I17*B13+J12*B14+J13*B15+J14*B16+J15*B17+J16*B18+J17*B19+H21*B20+B21*I21.$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Variable	Valeur	Condition	Contrainte						
2	X11	0	=	binaire						
3	X12	0	=	binaire						
4	X13	0	=	binaire						
5	X14	0	=	binaire						
6	X15	0	=	binaire						
7	X16	0	=	binaire						
8	X21	0	=	binaire						
9	X22	0	=	binaire						
10	X23	0	=	binaire						
11	X24	0	=	binaire						
12	X25	0	=	binaire						
13	X26	0	=	binaire						
14	X31	0	=	binaire						
15	X32	0	=	binaire						
16	X33	0	=	binaire						
17	X34	0	=	binaire						
18	X35	0	=	binaire						
19	X36	0	=	binaire						
20	Y1	0	=	entier						
21	Y2	0	=	entier						
22	Y3	0	=	entier						
23	X11*X21+X31	=B2+B6+B14	=	1						
24	X12*X22+X32	=B3+B9+B15	=	1						
25	X13*X23+X33	=B4+B10+B16	=	1						
26	X14*X24+X34	=B5+B11+B17	=	1						
27	X15*X25+X35	=B6+B12+B18	=	1						
28	X16*X26+X36	=B7+B13+B19	=	1						
29	I11.X11+...+I16.X16	=G*B2+H*B3+I*B4+J*B5+K*B6+L*B7	<=	Y1						
30	J12.X21+...+J17.X26	=G*B8+H*B9+I*B10+J*B11+K*B12+L*B13	<=	Y2						
31	G1.X31+...+G6.X36	=J*B14+K*B15+L*B16+M*B17+N*B18+O*B19	<=	Y3						
32	Fonction objective	=H12*B2+H13*B3+H14*B4+H15*B5+H16*B6+H17*B7		Minimiser						

		Type d'équipement		
		1	2	3
Déplacement	h1	0,77	0,33	1
	2	1,45	0,48	1
	3	0,16	0,15	1
	4	0,31	0,08	1
	5	0,17	0,04	1
	6	0,29	0,17	1

		Type d'équipement		
		1	2	3
Coût	cl1	1300	635	750
	2	2630	1298	3652
	3	260	315	341
	4	402	195	1198
	5	255	126	1114
	6	595	333	10000

		Type d'équipement		
		1	2	3
Cl	B0	400	0	0

Figure 70 : Feuille de calcul Excel du problème d'affectation

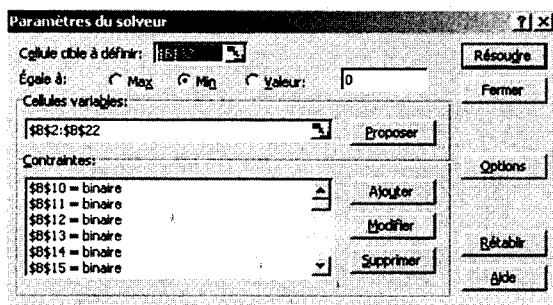


Figure 71 : Paramètres du solveur

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Variable	Valeur	Condition	Contrainte						
2	X11	0,0	=	binaire						
3	X12	0,0	=	binaire						
4	X13	0,0	=	binaire						
5	X14	0,0	=	binaire						
6	X15	0,0	=	binaire						
7	X16	0,0	=	binaire						
8	X21	0,0	=	binaire						
9	X22	1,0	=	binaire						
10	X23	1,0	=	binaire						
11	X24	1,0	=	binaire						
12	X25	1,0	=	binaire						
13	X26	1,0	=	binaire						
14	X31	1,0	=	binaire						
15	X32	0,0	=	binaire						
16	X33	0,0	=	binaire						
17	X34	0,0	=	binaire						
18	X35	0,0	=	binaire						
19	X36	0,0	=	binaire						
20	Y1	0,0	=	entier						
21	Y2	1,0	=	entier						
22	Y3	0,0	=	entier						
23	X11+X21+X31	1,0	=	1						
24	X12+X22+X32	1,0	=	1						
25	X13+X23+X33	1,0	=	1						
26	X14+X24+X34	1,0	=	1						
27	X15+X25+X35	1,0	=	1						
28	X16+X26+X36	1,0	=	1						
29	r11.X11+...+r16.X16	0,00	<=	Y1						
30	g1.X21+...+g6.X26	0,92	<=	Y2						
31	G1.X31+...+G6.X36	1,00	<=	Y3						
32	Fonction objective	3419,00		Minimiser						

Type d'équipement			
	1	2	3
tij			
1	0,77	0,33	1
2	1,45	0,48	1
3	0,16	0,15	1
4	0,31	0,08	1
5	0,17	0,04	1
6	0,29	0,17	1

Type d'équipement			
	1	2	3
cij			
1	1300	636	750
2	2630	1298	3852
3	280	315	341
4	402	195	1198
5	255	128	1114
6	595	333	10000

Type d'équipement			
	1	2	3
ci			
1	80	400	0

Figure 72 : Résultats du problème d'affectation avec le solveur Excel

Dans un deuxième temps, il faut renseigner les paramètres du solveur en lui indiquant le nom des cellules où se situent les variables, les contraintes, la fonction objective (cellule cible) sur la feuille de calcul Excel. La Figure 71 donne les paramètres du solveur.

Enfin, pour obtenir la solution du problème (si elle existe), il suffit d'appuyer sur le bouton « Résoudre » de la fenêtre du solveur et on obtient une fonction objective égale à 3419 avec les variables de décision affectées à 0 ou à 1. L'ensemble des solutions est représenté sur la Figure 72.

#### 4 Simulateur de réseau de Petri (Matlab)

```
clear all
clg
% ----- Réseau de Petri de la cellule de production avec AGV
% ----- Attention les transitions ne reservent qu un seul jeton a la fois pour le franchissement
% ----- definition des donnees -----
m0 = [0; 0; 0; 0; 0; 4; 1; 4; 1]; %marquage initial
pre = [0 1 0 0 0 0; 0 0 1 0 0 0; 0 0 0 1 0 0; 0 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 0 1; 1 0 0 0 0 0; 0 1 0 0 0 0; 0 0 1 0 0 0];
post = [1 0 0 0 0 0; 0 1 0 0 0 0; 0 0 1 0 0 0; 0 0 0 1 0 0; 0 0 0 0 1 0; 0 1 0 0 0 0; 0 0 0 1 0 0; 0 0 0 0 1 0; 0 0 1 0 1 0];
```

```

tempo=[3 1 5 1 1]; % ---- vecteur des temporisations des transitions
finfranchi = 3000; % ----- fin de la simulation
tempo=[1 1 1 1 1]; % ---- vecteur des temporisations des transitions
finfranchi = 30; % ----- fin de la simulation
p=size(pre,1); %----- nombre de places du reseau
t=size(pre,2); %----- nombre de transitions du reseau
val=zeros(1,t); % ---- vecteur des transitions validees
seq=zeros(1,t); % ---- vecteur des transitions franchissables
tempovar=zeros(1,t); % ---- vecteur des dates de validation des transitions
M=[ ]; % ---- vecteur marquage en fonction du temps
T=[ ]; % ---- vecteur temps
flag1=0; % ---- flag pour la validation des transitions
w = post - pre;

% ----- depart de la boucle --- nombre de franchissement
m=m0;
M=m0';
T=0;
temp = 0;
for temp=0:0.5:finfranchi % ----- debut de la boucle de simulation

% ---- franchissement des transitions
if temp >0 % ----- evite le franchissement de debut
    compar=find(tempovar==temp); % --- recherche des transitions a franchir
    a = length(compar);
    seq(compar(1:a))=ones(1,a); % ---- mise a 1 de la sequence
    tempovar(compar(1:a))=zeros(1,a); % ---- mise a 0 de la tempo
end
m=m+w*seq'; % ---- equation d'etat
seq=zeros(1,t); % ---- mise a zero du vecteur franchissement
val=zeros(1,t); % ---- mise a zero du vecteur des transitions validees

% ---- recherche des transitions validees
for j=1:t % ----- incrementation sur les transitions
    enspvalid=find((pre(:,j)>0));
    for k=1:length(enspvalid)
        if m(enspvalid(k)) >= pre(enspvalid(k),j) & pre(enspvalid(k),j)>0 & flag1==0
            val(j)=1; % vecteur des transitions validees
        else val(j)=0; flag1=1;
        end
    end
end
flag1=0;

    if val(j) >0 & tempovar(j)==0
        tempovar(j) = temp+tempo(j);
    end
end
x=find(m<0);
if x>0 m(x)=0; % evite les marquages negatifs
end
M=[M;m'];
M=[M;m'];
T=[T;temp];
T=[T;temp+.5];
end % ----- fin de la boucle temporel

% ----- Tracé des courbes et affichage des marquages
plot(T,M)
disp(' ----- marquages moyens -----')

```

```
disp('place')
[1:p]
mean(M)
```

## 5 Contrôle progressif (Visual Basic sous Excel).

### Conseils d'utilisation

- Lancer l'application Excel
- Créer un bouton de commande (*Affichage/barre d'outils/visual basic* – Cliquer sur l'icône *boite à outils contrôles* puis sur *bouton de commande* – Tracer le bouton de commande dans la feuille « *Feuill* » d'Excel puis double cliquer su le bouton de commande, une feuille de programmation s'ouvre automatiquement avec deux lignes de code : *Private Sub CommandButton2\_Click()* et *End Sub*.
- Taper le corps du programme entre les deux lignes de codes précédentes.

### Corps du programme

```
Dim p0, p1, a, b, g0, g1, d, k, An, Bn, i As Double
Dim Nk, condition, signe, car, X, Y As Integer
Dim Msg, Style, NQA, NQL, Alfa, Beta, Help, Ctxt, Response, MyString, Message, Default, MyValue
```

```
X = 0
Y = 0
condition = 0
signe = 0
```

```
'Effacement de la feuille
Range("A1:F44").ClearContents
Range("A1:F44").ClearFormats
```

```
Msg = "Dans ce programme, la fraction décimale est toujours exprimée en ( , ) mais jamais en ( . )" ' Définit le message.
```

```
Style = vbYesNo + vbCritical + vbDefaultButton1 ' Définit les boutons.
```

```
Title = "Information IMPORTANTE " ' Définit le titre.
```

```
Help = "DEMO.HLP" ' Définit le fichier d'aide.
```

```
Ctxt = 1000 ' Définit le contexte de
```

```
Response = MsgBox(" " & Chr(9) & Chr(10) & " " & " " & Msg & Chr(10) & Chr(13) + Chr(13) & "Souhaitez vous continuer?", Style, Title, Help, Ctxt)
```

```
If Response = vbYes Then ' L'utilisateur a choisi Oui.
```

```
MyString = "Oui" ' Effectue une action.
```

```
Message = "Entrez la valeur de NQA : une valeur comprise entre 0 et 1"
```

```
Titre = "Saisi de Données : NQA" ' Définit le titre.
```

```
p0 = InputBox(Message, Titre, 777, , , "DEMO.HLP", 10)
```

```
Do While p0 <= 0 Or p0 >= 1 And p0 <> 777
```

```
    p0 = InputBox(Message & Chr(10) & "Pour arrêter Tapez 777", Titre, 777, , , "DEMO.HLP", 10)
```

```
Loop
```

```
Range("A7").Value = "NQA"
```

```
Range("B7").Value = "Données Fausses"
```

```
If p0 <> 777 Then
```

```
    Range("B7").Value = p0
```

```
    Message = "Entrez la valeur de NQL : une valeur comprise entre 0 et 1"
```

```
    Titre = "Saisie de Données : NQL" ' Définit le titre.
```



```

p1 = InputBox(Message & Chr(10) & "Pour arrêter Tapez 777", Titre, 777, , , "DEMO.HLP", 10)
Do While p1 <= 0 Or p1 >= 1 And p1 <> 777
    p1 = InputBox(Message, Titre, 777, , , "DEMO.HLP", 10)
Loop
If p1 <> 777 Then
    Do While p0 = p1
        MsgBox (" " & Chr(10) + Chr(9) & "NQA et NQL ne peuvent pas être identiques. " &
        Chr(10) + Chr(9) & "Choisissez de nouvelles valeurs Sinon les valeurs par défauts
        sont NQA=0,025 et NQL=0,12 pour ce support" & Chr(10) + Chr(9))
        p0 = 0.025
        p0 = InputBox(" Nouvelle valeur de NQA", "Modification de Données", p0, , ,
        "DEMO.HLP", 10)
        Do While p0 <= 0 Or p0 >= 1
            p0 = InputBox(" Nouvelle valeur de NQA", "Modification de Données", p0,
            , , "DEMO.HLP", 10)
        Loop
        p1 = 0.12
        p1 = InputBox(" Nouvelle valeur de NQL", "Modification de Données", p1, , ,
        "DEMO.HLP", 10)
        Do While p1 <= 0 Or p1 >= 1
            p1 = InputBox(" Nouvelle valeur de NQL", "Modification de Données", p1, ,
            , "DEMO.HLP", 10)
        Loop
        Loop
        MsgBox (" " & Chr(10) + Chr(9) & "Entrez la valeur du risque fournisseur (alfa) et du risque
        client (beta)." & Chr(10) + Chr(9) & " Choisissez de nouvelles valeurs Sinon les valeurs
        par défauts sont alfa=0,05 et beta=0,1 pour ce support " & Chr(10) + Chr(9))
        a = 0.05
        a = InputBox(" Valeur de ALFA ", "Saisie de probabilité", a, , , "DEMO.HLP", 10)
        Do While a <= 0 Or a >= 1
            a = InputBox(" Valeur de ALFA ", "Saisie de probabilité", a, , , "DEMO.HLP", 10)
        Loop
        b = 0.1
        b = InputBox(" Valeur de Beta ", "Saisie de probabilité", b, , , "DEMO.HLP", 10)
        Do While b <= 0 Or b >= 1
            b = InputBox(" Valeur de Beta ", "Saisie de probabilité", b, , , "DEMO.HLP", 10)
        Loop
    End If
    Else
        MsgBox " " & Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) & "
        !.....DONNEES FAUSSES.....!" & Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) +
        Chr(10) + Chr(10) & "A une prochaine fois"
    End If
    Range("A7").Value = "Paramètres de l'accord partenariat"
    Range("A8").Value = "NQL"
    Range("B8").Value = p1
    Range("A9").Value = "a"
    Range("B9").Value = a
    Range("A10").Value = "b"
    Range("B10").Value = b
    If p0 <> 777 And p1 <> 777 And a <> 777 And b <> 777 Then
        d = Log(p1 / p0) + Log((1 - p0) / (1 - p1))
        g0 = Log((1 - a) / b) / d
        g1 = Log((1 - b) / a) / d
        k = Log((1 - p0) / (1 - p1)) / d
        Nk = g0 * g1 / (k * (1 - k))
        MsgBox (" " & Chr(9) & "Voici alors le plan et la politique de contrôle progresif avec les
        paramètres déclarés." & Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) & "Pour l'utilisation il suffit pour

```

```

chaque prélèvement de déclare l'état de la pièce ou de l'article en question à savoir : " & Chr(10) +
Chr(9) & "Bonne (saisir alors 1) ou" & Chr(10) + Chr(9) & "Mauvaise (saisir alors 0)"
Range("A12").Value = "Paramètres du Contrôle Progressif"
Range("A13").Value = "g0"
Range("B13").Value = g0
Range("A14").Value = "g1"
Range("B14").Value = g1
Range("A15").Value = "k"
Range("B15").Value = k
Range("A16").Value = "Nbre Max de prélèvements : Nk"
Range("B16").Value = Nk
Range("A17").Value = "Nbre Max de prélèvements : Nk"
Range("B17").Value = Nk
Range("A18").Value = "Point sortie ACCEPTATION : An"
Range("B18").Value = -g0 + Nk * k
Range("A19").Value = "Point sortie REFUS : Bn"
Range("B19").Value = g1 + Nk * k
Range("D18").Value = "Point au début : An"
Range("C18").Value = -g0
Range("D19").Value = "Point au début : Bn"
Range("C19").Value = g1
While condition = 0
    a = InputBox(" " & "Entrez l'état de la pièce en cours (par défaut la valeur est 1):" & Chr(9)
    + Chr(9) + Chr(10) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) & " Mauvaise(0)" & Chr(9) + Chr(9) +
    Chr(10) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) & " Bonne (1)" & Chr(9) + Chr(9) + Chr(10) + Chr(9) +
    Chr(9) + Chr(9), "Etat de la pièce en cours de traitement", 1)
Do While car <> 0 And car <> 1
    a = InputBox(" " & Chr(9) & "Valeur invalide, l'état d'une pièce est toujours :
    mauvais(0) ou bon(1)", "Problème de saisie de données !!!!!")
Loop
If a = 0 Then
    Y = Y + 1
End If
X = X + 1
Style = vbYes ' Définit les boutons.
Title = "Resultat des Prélèvements en cours " ' Définit le titre.
Response = MsgBox(" " & Chr(10) & "Nombre de pièces déjà contrôlées : " & " " & X & " " & Chr(10)
& " " & Chr(10) & "Nombre de pièces ou articles bons : " & " " & (X - Y) & " " & Chr(10) & " " & Chr(10)
& "Nombre de pièces ou articles mauvais : " & " " & Y & " " & Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) + Chr(9)
+ Chr(9) & "!!! Continuer !!!" & Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9), Style, Title, Help, Ctxt)
An = -g0 + X * k
Bn = g1 + X * k
If X = Nk Then
    If Y < (g1 - g0) / 2 + X * k Then
        signe = 1
    Else
        signe = 2
        a = 7
    End If
    condition = 1
End If
If Y >= Bn Then
    signe = 2
    condition = 1
End If
If Y <= An Then
    signe = 1
    condition = 1
End If

```

```

Range("A25").Value = "Point en cours "
Range("B25").Value = X
Range("C25").Value = X - Y
Range("B26").Value = "Continuer"
If condition = 1 And signe = 2 Then
    Range("A26").Value = "Décision"
    Range("B26").Value = "REFUS"
End If
If condition = 1 And signe = 1 Then
    Range("A26").Value = "Décision"
    Range("B26").Value = "ACCEPTER"
End If
Wend
If signe = 1 Then
    Style = vbYes           ' Définit les boutons.
    Title = "Resultat FINAL " ' Définit le titre.
    Response = MsgBox("" & Chr(9) + Chr(9) + Chr(10) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) & "La
    décision est d' ACCEPTER LE LOT " & Chr(9) + Chr(9) + Chr(10) + Chr(9) + Chr(9) +
    Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) & "", Style, Title, Help, Ctxt)
End If
If signe = 2 And a <> 7 Then
    Style = vbYes           ' Définit les boutons.
    Title = "Resultat FINAL " ' Définit le titre.
    Response = MsgBox("" & Chr(9) + Chr(9) + Chr(10) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) & "La
    décision est de REFUSER LE LOT " & Chr(9) + Chr(9) + Chr(10) + Chr(9) + Chr(9) +
    Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) & "", Style, Title, Help, Ctxt)
End If
If signe = 2 And a = 7 Then
    Style = vbYes           ' Définit les boutons.
    Title = "Resultat FINAL " ' Définit le titre.
    Response = MsgBox("" & Chr(9) + Chr(9) + Chr(10) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) & "La
    décision est de VOIR UNE AUTRE POLITIQUE CAR TAILLE DEPASSEE " & Chr(9) +
    Chr(9) + Chr(10) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) + Chr(9) & "",
    Style, Title, Help, Ctxt)
End If
Else
    MsgBox "" & Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) & "
    !.....DONNEES FAUSSES.....!" & Chr(10) + Chr(10) + Chr(10) +
    Chr(10) + Chr(10) + Chr(9) & "-----A bientôt-----"
End If

```

## 6 Contrôle progressif (language C)

```

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>

```

```

void main (void)
{

```

```

    int demo,x=0,y=0, Nk, condition=0,signe=0;
    float p0,p1,a,b,g0,g1,k,d,An,Bn;
    char car;

```

```

    printf("\n\t\t Bienvenue sur cette petite application de controle progressif.\n\n\t\t Pour
    Version demo tapez \t\t: 1 \n\n\t\t Pour Version avec vos valeurs tapez : 0 \n\t\t");
    scanf("%d", &demo);
    if(demo ==1)
    {

```

```

    p0=0.025;
    p1=0.12;
    a=0.05;
    b=0.10;
    printf("\nles valeurs de parametres de la demo sont \nNQA=%f
\nNQL=%f\nAlfa=%f\nBeta=%f",p0,p1,a,b);
}
else
{
    printf("\t\n\n Attention vous devez vous assurer de la validite des valeurs saisies
sinon la procedure risque de prendre du temps.\n\n Les valeurs sont comprises
entre 0 et 1 \n Pour arreter la procedure Taper 777.\n\t\t Maintenant : Taper la
valeur NQA\n\n");
    scanf("%f",&p0);
    while (((p0>1)||(p0<0)) & (p0!=777))
    {
        printf("\n Attention la valeur n'est pas valide. Pour arreter la procedure
Taper 777.\n Pour la demo tapez 0.1\n Retaper la nouvelle valeur pour
NQA\n");
        scanf("%f",&p0);
    }
}
if (p0!=777)
{
    if(demo==0)
    {
        printf("\t\n\n Attention vous devez vous assurer de la validite (elle
comprise entre 0 et 1) des valeurs saisies sinon la procedure risque de
prendre du temps.\n\n\n Pour arreter la procedure Taper 777.\n\t\t
Maintenant : Taper la valeur NQL\n\n\n");
        scanf("%f",&p1);
        while (((p1>1)||(p1<0)) & (p1 !=777))
        {
            printf("\n Attention la valeur n'est pas valide. Pour arreter la
procedure Taper 777.\n Pour la demo tapez 0.1\n Retaper la
nouvelle valeur pour NQL\n");
            scanf("%f",&p1);
        }
    }
    if (p1!=777)
    {
        while (p0==p1)
        {
            printf("NQA et NQL ne peuvent pas etre identiques.\n");
            printf("Retaper la valeur NQA\n");
            scanf("%f",&p0);
            while ((p0>1)||(p0<0))
            {
                printf("Retaper la valeur NQA\n");
                scanf("%f",&p0);
            }
            printf("Retaper la valeur NQL\n");
            scanf("%f",&p1);
            while ((p1>1)||(p1<0))
            {
                printf("Retaper la valeur NQL\n");
                scanf("%f",&p1);
            }
        }
    }
}
}

```

```

if(demo==0)
{
    printf("\n\tTaper la valeur de probabilite Alfa (elle est comprise
entre 0 et 1). \n");
    scanf("%f",&a);
    while ((a>1)||(a<0))
    {
        printf("\n\tRetaper la valeur a\n");
        scanf("%f",&a);
    }
    printf("\n\tTaper la valeur Beta (elle est comprise entre 0 et 1)\n");
    scanf("%f",&b);
    while ((b>1)||(b<0))
    {
        printf("\n\tRetaper la valeur Beta\n");
        scanf("%f",&b);
    }
}
//calculer g0,g1,k pour obtenir An,Bn et Nk est le nombre limite
d=log(p1/p0)+log((1-p0)/(1-p1));
g0=log((1-a)/b)/d;
g1=log((1-b)/a)/d;
k=log((1-p0)/(1-p1))/d;
Nk=g0*g1/(k*(1-k));
//processus de la contrôle progressif
while (condition==0)
{
    printf("\n\nVous devez aller jusqu'au bout de la simulation et de la
reponse concernant la decision a prendre.\n\n \t Entrer l'etat de la
piece en question piece : \n\tMauvais(m), \n\tBon(b)\n");
    scanf(" %c",&car);
    //un test pour verifier que le car est bon ou non
    while ((car!='m')&(car!='b'))
    {
        printf("\nProbleme de saisie, retapez l'etat de piece \n:
Mauvais(m), Bon(b)\n");
        scanf(" %c",&car);
    }
    if (car=='m')
        y=y+1;//la piece est mauvaise
        x=x+1;
        printf("\nLE BILAN intermediaire\n\tLe nombre total de
pieces dejà prelevees est de : \t%d\n", x);
        printf("Le nombre de pieces mauvaises : %d\t\t\n",y);
        printf("Le nombre de pieces bonnes : %d\t\t\n", (x-y));
        printf("\n-----\n\tPour le moment ON
CONTINUE\n-----\n");
        An=-g0+x*k;
        Bn=g1+x*k;
        if (x==Nk)
        {
            if (y<(g1-g0)/2+x*k) //calculer la premiere
                signe=1;
            else
                signe=2;
            a=7;
            condition=1;
        }
}

```

bissectrice)

```

        if (y>=Bn)
        {
            signe=2;
            condition=1;
        }
        if (y<=An)
        {
            signe=1;
            condition=1;
        }
    }
    if (signe==1)
    {
        printf("\n\n\n-----!!!! STOP : FIN !!!!!!!!!!!!!!!-----\n\n\n");
        printf("\n-----\n\t La decision finale est : ACCEPTATION DU LOT \n-----\n\n");
    }
    if ((signe==2) & (a==7))
    {
        printf("\n\n\n-----!!!! STOP : FIN !!!!!!!!!!!!!!!-----\n\n\n");
        printf("\n-----\n\t La decision finale est : Nombre de pieces limite depasse VOIR AUTRE METHODE \n-----\n\n");
    }
    if ((signe==2) & (a!=7))
    {
        printf("\n\n\n-----!!!! STOP : FIN !!!!!!!!!!!!!!!-----");
        printf("\n-----\n\t La decision finale est : REFUS DU LOT \n-----\n\n");
    }
}
else
{
    printf("\n\n\n Attention Problemes de validite des donnees.\n Arret volontaire\n\n\n");
}
}
else
{
    printf("\n\n\n Attention Problemes de validite des donnees.\n Arret volontaire\n\n\n");
}
}
}

```

# Références

- [1] Amodeo L., Contribution à la simplification et à la commande des réseaux de Petri stochastiques - Application aux systèmes de production, Thèse de doctorat de l'Université de Franche Comté, France, 1999.
- [2] Ashayeri J., L.F. Gelders and L. van Wassenhove, A micro computer-based optimisation model for the design of automated warehouses, *International Journal of Production Research*, 23, (4), 825-839, 1985.
- [3] Ashayeri J. and M. Goetschalckx, Analysis and design of order picking systems, In: *Ninth International Conference of Automation in Warehousing*, 125-135, 1988.
- [4] Askin R.G. and C.R. Standridge, *Modeling and Analysis of manufacturing systems*, Wiley, 1993.
- [5] Baglin G., Bruel O., Garreau A., Grief M. et Van Delft C., *Management Industriel et Logistique*, Editions Economica, 1996.
- [6] Bellman, R., *Dynamic programming*, Princeton University Press, Princeton, 1957.
- [7] Bourgeois, G, *le guide de l'entrepôt*, Garnor-Nathan-Entreprise, 1988.
- [8] Cave R. *Le contrôle statistique des fabrications*. Eyrolles, Paris, 1970.
- [9] Che A., Chu C., Levner E., A polynomial algorithm for 2-degree cyclic robot scheduling, *European Journal of Operational Research*, 145, 31-44, 2003.
- [10] Chen H., Amodeo L., Chu F., *Batch Deterministic and Stochastic Petri Net : A tool for Modeling and Performance Evaluation of Supply Chain*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington D.C., 1, 78-83 (CD-ROM), May 2002.
- [11] Chu C, Proth J-M, *L'ordonnancement et ses applications*, Masson, 1996.
- [12] David R., Alla H., *Du Grafset aux Réseaux de Petri*, *Traité des nouvelles technologies*, Hermes, 1989.
- [13] Duret D. et Pillet M., *Qualité en Production*, Editions d'Organisation, 1998.
- [14] Duve B. and T. Böcker, *Automatische Kommissioniersystem-Planung, Gestaltung und Realisierung*, *Hebezeuge und Fördermittel* 33, (1,2), 30-34, 1993.
- [15] Frazelle, E.H., *Material handling systems and terminology*, Lionheart publishing Inc., Atlanta, GA, 1992.
- [16] Frazelle, E.H., S.T. Hackman, U. Passy and L.K. Platzman, The forward-reserve problem, In: T.A. Ciriani, R.C. Leach-man (Ed.), *Optimization in Industry 2*, Wiley, 43-61, 1994.
- [17] Ganesharajah T., Hall N., Skiskandarajah C., Design and operational issues in AGV-served manufacturing systems, *Annals of Operations Research*, 76, 109-154, 1998.
- [18] Glover, F., Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computer and O.R.*, 13, 533-549, 1986.
- [19] Goldberg, D.E., *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989.
- [20] Hadley G. and T.M. Whitin, *Analysis of inventory Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1963.
- [21] Hackman S.T. and M.J. Rosenblatt, Allocating items to an automated storage and retrieval system, *IIE Transactions*, 28, (2), 115-127, 1996.
- [22] Hariga M.A. and P.L. Jackson, The warehouse scheduling problem: formulation and algorithm, *IIE Transactions* 21, (1), 7-14, 1990.

- [23] Hausman J.P., L.B. Schwarz and S.C. Graves, Optimal storage assignment in automatic warehousing system, *Management Science*, 22, (6), 629-638, 1976.
- [24] Labadi K., Chen H., Amodeo, L., A New Petri Net Model: Batch Deterministic and Stochastic Petri Nets - Modelling, Analysis and its Application to Supply Chain, IEEE, International Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, The Netherlands, 4515-4520, October 10-13, 2004.
- [25] Lamouille J.L., Murry B. C. Potié C., La maîtrise Statistiques des Procédés (SPC) : Démarche et outils, *Afnor Gestion*, 1989.
- [26] Levner E., Kats V., Levit V. E., An improved algorithm for cyclic flowshop scheduling in a robotic cell, *European Journal of Operational Research*, 97, 500-508, 1997.
- [27] Lézin P., Martin H., Richard J.M. et Toullec A., Outils de gestion pour les commerciaux, *Dunod, Tertiaire Sup*, 2ème Edition, 2001.
- [28] Lyonnet P., La qualité : Outils et méthodes, *Lavoisier Tec&Doc*, 1997.
- [29] Man K.F., Tang K.S., Kwong S., *Genetic algorithms*, Springer, 1999.
- [30] McGinnis L., J. Trevino and J.A. White, A bibliography on material handling systems analysis, Technical Report MHRC-TR-83-06, Georgia Institute of Technology, 1983.
- [31] Prévost R. et A.Vervaeet, *Gestion des approvisionnements et des stocks*, Guérin, Dossiers Collégiaux, 1995.
- [32] Prins, C., *Algorithmes de graphes*, Eyrolles, Paris, 1997.
- [33] Proth J.M., Xie X., *Les Réseaux de Petri pour la Conception et la Gestion des Systèmes de Production*, Masson, 1995.
- [34] Rouwenhorst B., B. Reuter, V. Stockram, G.J. Van Houtum, R.J. Mantel and W.H.M. Zijm, Warehouse design and control: Framework and literature review, *European Journal of Operational Research*, 122, 515-533, 2000.
- [35] Roux, M, *Entrepôts et magasins : concevoir et améliorer une unité de stockage*, Editions d'Organisation, 2001.
- [36] Samrout M., Yalaoui F., Châtelet E., Chebbo N., New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems with ant colony optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, RESS, 2004.
- [37] Tanchoco J.M.A., *Material Flow Systems in Manufacturing*, Chapman & Hall, 1994.
- [38] *Techniques de l'Ingénieurs*, AG 7000, AG 7010, AG 7500, A 9200, A 9260.
- [39] Van den Berg J. P., *Planning and control of warehousing systems*, PhD thesis, University of Twente, Faculty of Mechanical Engineering, Enschede, The Netherlands, 1996.
- [40] Van den Berg J. P. and G.P. Sharp, Forward-reserve allocation in a warehouse, *European Journal of Operational Research*, 111, (1), 98-113, 1998.
- [41] Van den Berg J. P. and W.H.M Zijm, Models for warehouse management: classification and examples, *International Journal of Production Economics*, 59, 519-528, 1999.
- [42] Yalaoui F., *Ordonnancement de la production en présence de machines alternatives*, Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Troyes, France, 2000.
- [43] Zhou M. DiCesare F., *Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [44] Site Web : <http://www.directindustry.com>.



# Index

## A

ABC zoning, 14, 38  
accumulation, 45, 56, 123, 128  
agencement, 47, 51, 56, 68, 104  
AGV, 91, 100, 101, 102, 103, 104, 105,  
106, 123, 124, 125, 126, 144, 153  
algorithme, 62, 63, 68, 69, 108, 109, 111,  
129, 131, 136, 137, 138  
allées de circulation, 79, 102  
analyse, 15, 24, 25, 55, 56, 60, 70, 77,  
112  
armoires rotatives, 13, 44

## B

bâtiment, 3, 10, 49, 75, 77  
batterie, 78, 86, 92, 94, 95

## C

cantilevers, 11, 12  
caristes, 78, 112  
carrousels, 13, 14, 44, 87  
central, 16, 58, 60, 61, 71  
chaîne logistique, 3, 7, 71, 74, 112  
charges en vrac, 87  
chariot de manutention, 79, 83, 116, 126  
chariot élévateur, 96  
chariot embarqué, 96, 97  
chariots électriques, 78  
chariots guidés automatiquement, 91  
chariots thermiques, 78  
classification, 86, 105, 131, 154  
codes barres, 11  
codes des colis et palettes, 16  
complexité, 41, 62, 70, 104, 129, 131  
conception, 10, 14, 47, 48, 49, 50, 52, 55,  
57, 74, 75, 98, 100, 101, 102, 103,  
104, 137  
contrôle, 8, 9, 11, 14, 15, 16, 19, 20, 21,  
22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 40,  
47, 52, 53, 56, 58, 59, 71, 72, 88, 94,  
96, 147, 151  
contrôle progressif, 29, 30, 151  
contrôle réduit, 28, 29  
contrôle renforcé, 28

convoyeur, 43, 44, 45, 46, 87, 90, 99,  
116, 123  
convoyeurs aériens, 88, 89, 90  
coût, 3, 9, 33, 34, 48, 55, 59, 60, 63, 64,  
65, 73, 74, 75, 98, 99, 100, 137  
critère, 48, 49, 61, 63, 78, 132, 133, 135

## D

décret, 77, 95  
dimensionnement, 3, 10, 39, 47, 51, 56,  
65, 69, 71, 74, 80, 81, 82, 98, 104  
directive européenne, 77, 84, 95  
distribution physique, 3

## E

écoulement par gravité, 11  
entreposage, 3, 7, 8, 10, 11, 19, 38, 39,  
40, 41, 42, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 53,  
54, 55, 56, 57, 58, 60, 69, 70, 71, 72,  
120  
entreposage automatisé, 43  
entrepôt, 3, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 37, 39,  
41, 43, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56,  
57, 58, 60, 61, 62, 65, 66, 67, 68, 70,  
71, 72, 83, 153  
entrepôt central, 57, 58, 60, 61  
entrepôt de distribution, 48  
entrepôt de production, 48, 71, 72  
entrepôts spécifiques, 57  
équipement, 8, 11, 42, 49, 50, 51, 53, 70,  
85, 89, 90, 91, 92, 93, 98, 99, 100, 143  
estimation, 35, 65  
évaluation, 24, 25, 33, 36, 48, 49, 53, 55,  
56, 61, 88, 112, 119, 129, 132, 136,  
138  
expédition, 11, 14, 18, 19, 42, 44, 47, 48,  
49, 57, 72, 73, 75, 86, 123, 126, 127

## F

files d'attente, 81, 83, 88, 106, 129  
flotte, 80, 81, 82, 93, 94, 104  
flux, 7, 8, 9, 14, 24, 47, 49, 50, 55, 63,  
71, 73, 75, 86, 87, 88, 101, 105, 118,  
120, 123

fonction objective, 60, 63, 67, 99, 130,  
141, 142, 143, 144

## G

gerbage, 76, 77, 79, 91, 94  
gerbeurs, 14, 91, 99  
gestion de la flotte, 93

## I

identification, 15, 16, 18, 24, 61, 71, 88,  
129

## L

levage, 76, 79, 84, 85, 86, 97  
localisation, 3, 47, 54, 57, 59, 60, 62, 68,  
69, 71, 102, 103  
lot, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 29, 30,  
43, 65, 69, 70, 83, 84, 102, 111, 124

## M

machines à poussoirs, 45  
manutention, 3, 7, 9, 10, 13, 36, 39, 41,  
42, 43, 44, 45, 51, 54, 56, 60, 72, 73,  
74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 83, 84,  
86, 87, 88, 89, 90, 91, 94, 95, 96, 97,  
98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105,  
106, 111, 112, 116, 120, 121, 122,  
123, 126  
manutention continue, 75, 76, 86, 87, 88,  
89  
manutention spécifique, 76  
modélisation, 56, 112, 115, 116, 117,  
118, 119, 120, 121, 123, 124, 125,  
129, 130, 133  
monorails, 85, 90

## N

niveau opérationnel, 47, 52, 53, 56  
niveau stratégique, 47, 49, 50, 51, 52, 53,  
55  
niveau tactique, 51, 52, 53, 55, 56  
normalisation, 16, 18, 21, 73, 77  
norme, 10, 18, 28, 92, 95  
NQA, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 146,  
147, 150  
NQL, 21, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 146,  
147, 150

## O

optimisation, 3, 27, 39, 49, 50, 57, 59,  
60, 71, 129, 130, 131, 136, 138, 153  
ordonnancement, 7, 53, 54, 56, 65, 98,  
101, 105, 106, 109, 111, 125, 132,  
135, 141, 153  
ordre, 8, 42, 43, 49, 65, 69, 109, 111,  
131, 135, 137, 141

## P

palettes, 8, 10, 11, 13, 17, 42, 43, 48, 66,  
83, 91, 123  
palettiseurs, 11, 85  
PCB, 16  
performance, 19, 24, 47, 48, 49, 52, 69,  
123, 138  
phase de réception, 9  
phase de stockage, 9, 47  
plan de contrôle, 20, 24  
plan progressif, 20, 29  
plan simple, 20, 24, 27, 28, 29  
point de repos, 14  
point de stagnation, 53  
politiques de sortie, 14  
prélèvement, 9, 11, 14, 15, 19, 20, 21,  
24, 25, 30, 31, 38, 42, 43, 44, 49, 52,  
53, 54, 55, 56, 64, 65, 66, 67, 68, 148  
prélèvement par lot, 14  
prélèvement par vague, 43  
prélèvement unitaire, 43  
préleveurs, 11, 14  
préparation commande, 44  
processus d'entreposage, 9  
processus de réception, 14  
processus de sortie/consolidation, 9  
programmation, 63, 66, 68, 69, 93, 103,  
105, 112, 129, 130, 132, 133, 146

## R

rayonnage, 11, 44  
réception, 7, 8, 15, 19, 21, 25, 27, 32, 49,  
51, 71, 86  
réglementations, 77  
remplissage, 9, 38, 65  
répartition, 25, 51, 59, 69, 98, 101, 104,  
105, 106  
réseau de Petri, 105, 112, 113, 114, 115,  
116, 119, 121, 122, 124, 125, 127, 144

ressources, 7, 8, 10, 50, 51, 55, 73, 76,  
116, 117, 118, 119, 120, 130

RFID, 16

risque client, 147

risque du producteur, 21

risque fournisseur, 25, 147

## S

sécurité, 3, 9, 10, 11, 37, 39, 40, 41, 53,  
58, 60, 73, 78, 79, 85, 89, 92, 94, 100

sélection, 44, 47, 49, 50, 53, 55, 76, 98,  
100, 106, 136, 143

silos à tiroirs, 13, 44

SKU, 8, 42, 44

solveur, 100, 141, 142, 143, 144

station de production/assemblage, 8

stockage aléatoire, 14, 37, 56

stockage fixe, 37

stockage mixte, 38

stockages dynamiques, 12

stockages mobiles, 12

système de production, 3, 71, 74, 88, 93,  
102, 120

système de stockage, 9, 10, 43, 49, 50,  
51, 55

système de stockage et de récupération,  
43

systèmes automatiques, 45

systèmes automatisés, 15, 18, 48, 100,  
112

## T

taux d'arrivée, 81, 83

taux de rotation, 14, 38

taux de service, 81, 83, 139

tiroirs modulaires, 11

tracteur, 76, 90

transpalettes, 13, 84, 91, 116

tri, 14, 43, 45, 47, 49, 50, 53, 56, 72, 87,  
88, 92

trieurs à galets, 45, 46

trieurs à plateaux, 46, 47

trieurs à tapis, 46, 47

trieurs à taquets, 46

## U

UV, 16

## V

VAG, 91, 92, 94

véhicules autoguidés, 91, 92, 93, 94, 98,  
100

## W

WMS, 70, 71

## Z

zones de prélèvement, 14, 51

**La collection TECHNOSUP** dirigée par Claude Chèze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

**Niveau A Approche** (éléments, résumés ou travaux dirigés) *Initiation, mise à niveau*

**Niveau B Bases** (cours avec exercices et problèmes résolus) *IUP - IUT - BTS*

**Niveau C Compléments** (approfondissement, spécialisation) *Écoles d'ingénieurs, Maîtrise*

*L'ouvrage : niveau A (IUT - BTS) et niveau B (Licence)*

Manuel de synthèse dans un domaine où il y a surtout des articles divers, l'ouvrage correspond aux enseignements de plusieurs spécialités IUT/BTS et à des modules dans certaines formations industrielles ou de gestion.

Il traite de façon simple et agréable les aspects techniques ainsi que le management et la gestion opérationnelle.

Dans une première partie sont décrits les différentes ressources et les étapes de l'entreposage, l'accent étant mis sur les problèmes de localisation, dimensionnement et ordonnancement. Ensuite sont abordés les problèmes de conception et de gestion des systèmes de manutention, puis ceux relatifs à la sélection des équipements et à la gestion opérationnelle des véhicules. Enfin sont décrites la modélisation et l'évaluation des performances des systèmes logistiques à l'aide des réseaux de Petri.

L'ensemble est illustré par des figures et des applications numériques diverses, puis en fin d'ouvrage par des programmes informatiques d'utilisation facile.

*Les auteurs :*

*Lionel Amodeo est enseignant-chercheur à l'Université de Technologie de Troyes où il enseigne la modélisation et l'évaluation de performances. Ses recherches portent sur la modélisation, l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques.*

*Farouk Yalaoui est maître de conférences à l'Université de Technologie de Troyes où il est responsable des enseignements en qualité et logistique. Ses recherches portent sur les problèmes d'ordonnancement et d'agencement, la modélisation et la fiabilité.*

*Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.*



ISBN 2-7298-2489-8