



**HAL**  
open science

# Etude d'agencement spatial dans un atelier de production selon le concept de technologie de groupe

Didier Anciaux

► **To cite this version:**

Didier Anciaux. Etude d'agencement spatial dans un atelier de production selon le concept de technologie de groupe. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paul Verlaine - Metz, 1990. Français. NNT : 1990METZ002S . tel-01775851

**HAL Id: tel-01775851**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01775851>**

Submitted on 24 Apr 2018

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

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



## AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

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

S/112  
90/2  
1x

N° inv	19900035
Cote	S/Mz 90/2
Loc	

# THESE

présentée à

L'U.F.R. MATHEMATIQUE, INFORMATIQUE,  
MECANIQUE, AUTOMATIQUE

en vue de l'obtention du

DIPLOME DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE METZ  
option : Production Automatisée

par

Didier ANCIAUX



---

ETUDE D'AGENCEMENT SPATIAL DANS UN ATELIER DE  
PRODUCTION SELON  
LE CONCEPT DE TECHNOLOGIE DE GROUPE.

---

Soutenue le 22 janvier 1990, devant la commission d'Examen :

Rapporteurs : Mlle. M.C. PORTMANN  
M. C. LAURENT

Examineurs : MM. B. MUTEL  
M. POTIER FERRY  
P. MARTIN

à mes *PARENTS*,

à *CHRISTINE* et *VIVIANE*,

qu'ils me pardonnent de leur avoir volé du temps  
pour réaliser ce travail.

*Quel que soit le point de départ de l'activité scientifique, cette activité ne peut pleinement convaincre qu'en quittant le domaine de base :*

*si elle expérimente, il faut raisonner,  
si elle raisonne, il faut expérimenter.*

*Gaston Bachelard "Le nouvel esprit scientifique"*

*Cette thèse a été réalisée au Laboratoire d'Automatique et d'Electronique Industrielles de l'Institut Supérieur de Génie Mécanique et Productique de l'Université de Metz.*

*Ce travail a été effectué sous la direction scientifique de Monsieur le Professeur Bernard MUTEL.*

*Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance pour la confiance qu'il m'a témoignée et l'aide qu'il m'a apportée.*

*Je tiens à remercier Mademoiselle le Professeur Marie Claude PORTMANN pour les discussions fructueuses que nous avons eues ainsi que pour ses conseils et je lui suis très obligé d'avoir accepté de juger mon travail en qualité de rapporteur.*

*J'exprime ma sincère gratitude à Monsieur le Professeur Claude LAURENT, Directeur du L.A.E.I, pour sa grande disponibilité et je le remercie d'avoir accepté de juger ce travail en qualité de rapporteur.*

*Je suis très honoré par la présence de Messieurs les Professeurs Michel POTIER FERRY et de Patrick MARTIN, qui ont accepté de juger ce travail.*

*Je remercie également mes camarades chercheurs et techniciens pour leur aide et leur soutien amical.*

*Enfin, que Mademoiselle Isabelle MESMER, soit remerciée pour la gentillesse avec laquelle elle a assuré la réalisation matérielle de cette thèse.*

## TABLE DES MATIERES

	page
<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>XI</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>XII</b>
<b>CHAPITRE I : INTRODUCTION : LA FONCTION PRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
1.1 Le projet productique.....	2
1.2 La fonction production.....	4
1.3 Les zéros olympiques.....	5
1.3.1 Diminution des stocks.....	5
1.3.2 Diminution des défauts.....	6
1.3.3 Diminution des délais.....	6
1.3.4 Diminution des pannes.....	7
1.3.5 Diminution de la manutention.....	8
1.4 Automatisation de l'appareil de production.....	9
1.4.1 Evolution du matériel.....	9
1.4.2 Evolution de l'atelier.....	10
1.4.3 Evolution du système de gestion.....	10
1.5 Les ateliers flexibles.....	11
1.6 Les ateliers conventionnels.....	13
1.7 Le concept de coalescence.....	16

**CHAPITRE II : AGENCEMENT D'UNE UNITE DE PRODUCTION :****L'état de l'art.....25**

2.1 Introduction.....	25
2.2 Les objectifs.....	27
2.3 Modélisations et méthodes de résolution.....	28
2.3.1 Modèle d'assignation quadratique.....	29
2.3.2 Modèle de placement quadratique.....	34
2.3.3 Programmation linéaire en nombre entier.....	37
2.4 Méthodologie d'agencement.....	40
2.4.1 Méthodologies utilisées.....	40
2.4.2 Logiciels d'agencement.....	42
2.5 Conclusion.....	48
2.5.1 Les modèles mathématiques proposés.....	48
2.5.2 Les logiciels.....	48

**CHAPITRE III : NOUVELLE APPROCHE DE L'AGENCEMENT.....52**

3.1 Méthodologie générale.....	52
3.2 Objectifs fixés.....	53
3.3 Définition des caractéristiques du problème d'agencement	53
3.3.1 Les données.....	56
3.3.2 Les contraintes.....	57
3.3.3 Les paramètres.....	60
3.3.4 Les inconnues.....	61
3.4 Détermination de la fonction critère.....	61
3.4.1 Définition du problème.....	62
3.4.2 Modélisation du problème.....	64
3.4.3 Formulation mathématique.....	70
3.4.4 Méthode de résolution.....	70
3.5 Méthode d'évaluation de la fonction coût.....	73
3.5.1 Discrétisation du plancher de l'atelier.....	73
3.5.2 Détermination et remise à jour des recouvrements....	74
3.5.3 Stratégie de déplacement.....	77



3.5.4 Détermination et remise à jour de la matrice des distances.....	80
3.6 Etude expérimentale de la technique d'optimisation.....	81
3.6.1 Placement des postes de travail sur des sites prédéterminés.....	82
3.6.2 Influence de la configuration initiale sur la vitesse de convergence de la méthodologie.....	86
3.6.3 Placement des postes de travail en l'absence de sites prédéterminés.....	89
3.6.4 Conclusion.....	90
<b>CHAPITRE IV : Logiciel ADAMP et application industrielle.....</b>	<b>92</b>
4.1 Présentation du logiciel.....	92
4.1.1 Module saisie des données.....	92
4.1.2 Module exploitation.....	93
4.1.3 Module visualisation.....	94
4.2 Présentation d'un cas industriel.....	100
4.2.1 Caractéristiques et production des compteurs.....	100
4.2.2 La circulation des produits. Les opérations poste par poste.....	100
4.2.3 La succession des postes de montage.....	102
4.2.4 Répartition spatiale initiale.....	102
4.2.5 Diminution du nombre de postes de montage.....	103
4.2.6 Caractéristiques logistiques de l'atelier de montage.....	104
4.2.7 Matrice des flux.....	105
4.2.8 Matrice des nuisances.....	106
4.2.9 Modélisation de l'atelier de montage.....	107
4.3 Résultats.....	109
4.3.1 Solution initiale.....	110
4.3.2 Solutions proposées.....	110
4.3.3 Interpretation des résultats.....	110
<b>CHAPITRE V : CONCLUSION.....</b>	<b>115</b>

	<b>page</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>119</b>
<b>ANNEXE A : MODELES MATHEMATIQUES.....</b>	<b>124</b>
<b>ANNEXE B : LOGICIELS D' AGENCEMENT.....</b>	<b>135</b>
<b>ANNEXE C : AGENCEMENT DES MAGASINS.....</b>	<b>146</b>
<b>ANNEXE D : GAMMES OPERATOIRES DES COMPTEURS.....</b>	<b>155</b>

## LISTE DES FIGURES.

Figures :	page
1.1	: Roue de l'automatisation intégrée de la production...2
1.2	: Diagramme fonctionnel d'une entreprise.....3
1.3	: Spirale de la construction de la qualité.....6
1.4	: Génération des délais.....7
1.5	: Décomposition du temps passé dans un atelier.....8
1.6	: L'atelier flexible intégré.....12
1.7	: Différents types d'ateliers conventionnels.....15
1.8	: Exemple de pièces hétérogènes et de leur regroupement en familles.....20
1.9	: Homogénéisation des moyens de production.....21
1.10	: Le code T.G., support d'intégration.....22
3.1	: Algorithme de visualisation-modification.....52
3.2	: Structure de la méthodologie d'agencement.....54
3.3	: Evolution de l'approche proposée.....55
3.4	: Regroupement des postes de travail.....58
3.5	: Solutions finales à proscrire.....59
3.6	: Orientation privilégiée par rapport à une allée.....59
3.7	: Exemples de contraintes logistiques.....60
3.8	: Solution finale.....61
3.9	: Modélisation d'un atelier.....63
3.10	: Modélisation d'un poste de travail.....64
3.11	: Détermination de l'échelle de chevauchement.....65
3.12	: Détermination de l'échelle de nuisance.....66
3.13	: Différents types de calcul de distance en fonction du moyen de transport.....69
3.14	: Allure de la fonction objectif d'un problème complexe en fonction de la configuration du système.....71

3.15	: Discrétisation de l'atelier sous forme d'un maillage.....	73
3.16	: Partitionnement de l'ensemble K en n sous-ensembles $p_1$ .....	74
3.17	: Stratégie de déplacement sans recouvrement.....	79
3.18	: Exemple de stratégie de déplacement avec recouvrement.....	79
3.19	: Exemple de configuration désordonnée.....	87
3.20	: Configuration optimale.....	87
3.21	: Evolution de la température initiale $T_1$ en fonction de différents paramètres.....	89
4.1	: Hiérarchie des menus page 1/3.....	95
4.2	: Hiérarchie des menus page 2/3.....	96
4.3	: Hiérarchie des menus page 3/3.....	97
4.4	: Ecran de visualisation.....	98
4.5	: Algorithme de la méthode d'optimisation.....	98
4.6	: Succession des postes de travail pour chaque compteur.....	101
4.7	: Répartition spatiale initiale.....	102
4.8	: Répartition spatiale initiale simplifiée.....	104
4.9	: Schématisation des contraintes logistiques.....	105
4.10	: Différents types de contraintes prises en compte...	108
4.11	: Solution initiale.....	110
4.12	: Solution numéro 1.....	111
4.13	: Solution numéro 1 avec représentation des flux....	111
4.14	: Solution numéro 2.....	112
A.1	: Matrice de permutation cyclique.....	127
C.1	: Modélisation d'un magasin.....	148
C.2	: Détermination de l'échelle de nuisance.....	150
C.3	: Détermination de l'échelle de position verticale...	151
C.4	: Détermination de l'échelle de profondeur.....	152

**LISTE DES TABLEAUX.**

<b>Tableaux :</b>	<b>page</b>
1.1 : Comparaison des modèles de représentation des processus de production.....	19
2.1 : Exemple d'échelle qualitative.....	48
3.1 : Description du problème d'agencement dans les termes d'un problème d'optimisation.....	62
3.2 : Stratégie de déplacement suivant les zones de recouvrement.....	80
3.3 : Résultats obtenus par génération aléatoire.....	88
4.1 : Caractéristiques physiques des différents compteurs..	100
4.2 : Production prévisionnelle.....	100
4.3 : Regroupement de postes de montage.....	103
4.4 : Matrice des flux.....	106
4.5 : Matrice des nuisances.....	107
4.6 : Matrice des relations.....	107
4.7 : Différents type de postes de montage.....	109
D.1 : Fabrication des compteurs G40 et G65.....	157
D.2 : Fabrication du compteur G25.....	158
D.3 : Fabrication des compteurs G10 et G16.....	159

## **Introduction.**

Face à une concurrence devenue mondiale et à un remaniement profond du type de production qui se concrétisent par le passage d'une économie d'échelle à une économie d'envergure, le monde industriel, depuis une vingtaine d'années, n'a cessé d'évoluer. L'amélioration de la productivité passe aujourd'hui par une automatisation des moyens de production. On parle maintenant d'ateliers flexibles capables de s'adapter à toutes sortes de variations et d'aléas de production.

Mais en contrepartie de l'automatisation et de la flexibilité, on se heurte à une complexité croissante des problèmes à résoudre; il devient de plus en plus complexe d'appréhender le système de production dans son ensemble alors que seule une approche «système» permet de garantir une bonne maîtrise et une bonne efficacité des structures de production.

En effet, s'il est possible de disposer sur le marché d'un ensemble de sous-systèmes automatisés ou de composantes d'automatisation (machines-outils à commande numérique, robots, automates, etc...), la coordination et l'intégration de l'ensemble restent le facteur clef de la réussite.

L'une des manières de réussir cette intégration au niveau de l'atelier de production, tout en augmentant la productivité, est de le restructurer spatialement de façon à diminuer les coûts de manutention.

Ce mémoire se divise en cinq chapitres. Dans le premier nous présentons succinctement le concept CIM "Computed Integred Manufacturing" où nous nous intéressons plus particulièrement à la fonction production en exposant les différents objectifs à atteindre, à savoir

les zéros olympiques. Puis, nous présentons les différents types d'ateliers existants c'est à dire, les ateliers flexibles, les sections homogènes, les chaînes de transfert, les îlots de fabrication et les agencements modulaires. Enfin nous comparons le système de production Taylor/Ford au concept de Technologie de Groupe. Celui-ci nous permet, par l'étude des flux de matière, de déterminer des îlots de fabrication, où les coûts de manutention des produits sont rendus minimum par une réorganisation spatiale (agencement) des postes de travail à l'intérieur de chaque îlot.

Dans le deuxième, nous exposons l'état de l'art du problème d'agencement des ateliers. Nous présentons tout d'abord les caractéristiques générales du problème et sa complexité. Ensuite nous examinons les diverses approches mathématiques utilisées à ce jour, en explicitant pour chacune d'elles le modèle développé, ainsi que la méthode de résolution. Enfin, nous passons en revue les différentes techniques d'agencement couramment utilisées, ainsi que les logiciels les plus connus.

Le troisième chapitre propose une nouvelle approche de l'agencement. Nous définissons dans un premier temps la méthodologie générale d'étude d'implantation qui est basée sur un concept de Technologie de Groupe, puis nous présentons les différents objectifs à atteindre. Nous exposons ensuite les caractéristiques physiques de l'atelier et des postes de travail nous permettant de définir la modélisation mathématique. Ce problème d'optimisation complexe a été résolu à l'aide d'un algorithme du type «recuit simulé». Nous présentons ensuite l'ensemble de notre travail expérimental. Nous nous sommes d'abord consacrés à une étude détaillée des différents paramètres de l'algorithme (température initiale, longueur des paliers, etc...). Cette étude nous a permis

d'élaborer un programme du recuit bien adapté à notre type de problèmes, et une méthode d'évaluation de la fonction coût minimisant les temps de calcul.

Dans le quatrième chapitre nous appliquons cette méthodologie à la réorganisation spatiale d'un atelier de montage de compteurs à gaz. Nous exposons d'abord la structure du logiciel d'aide à l'Agencement Des Ateliers et des Magasins de Production (A.D.A.M.P) et son utilisation. Puis nous modélisons l'atelier de montage et présentons les résultats obtenus. L'étude a montré que la souplesse de la méthode permet de prendre en considération non seulement un certain nombre de contraintes physiques, mais également les règles de savoir-faire qui sont appliquées par les concepteurs d'agencement.

En conclusion, nous synthétisons les résultats obtenus et exposons les recherches futures permettant d'intégrer dans le modèle des hypothèses de plus en plus complexes.



**CHAPITRE I**  
**INTRODUCTION:**  
**LA FONCTION PRODUCTION**

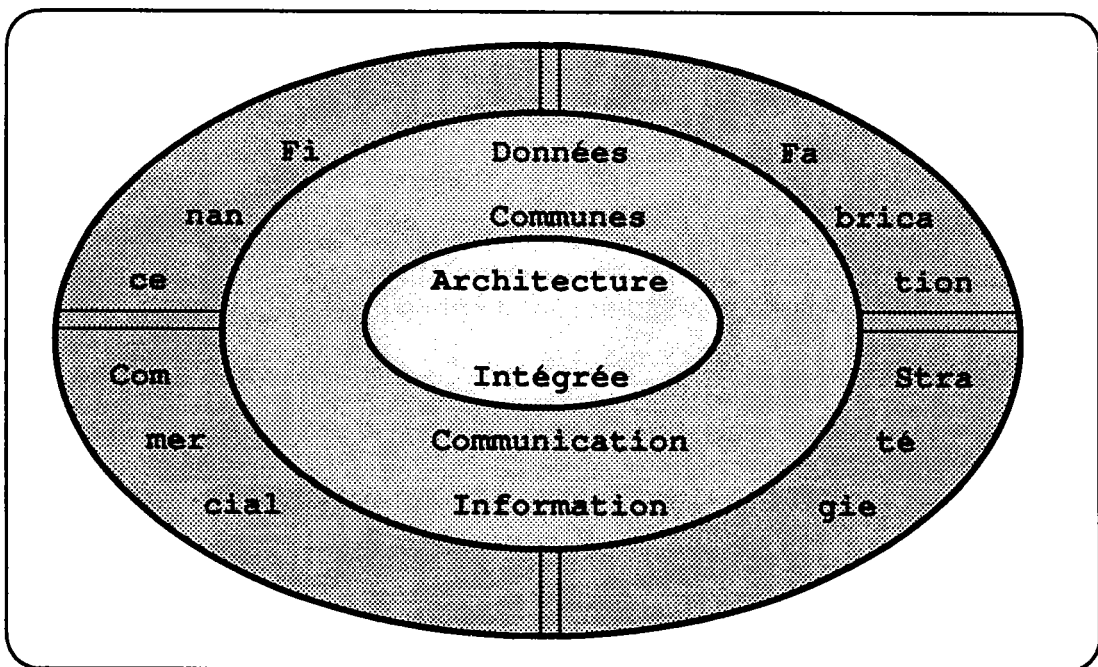
## I) La fonction production.

### 1.1) Le projet productique :

#### Objectifs et conditions préalables.

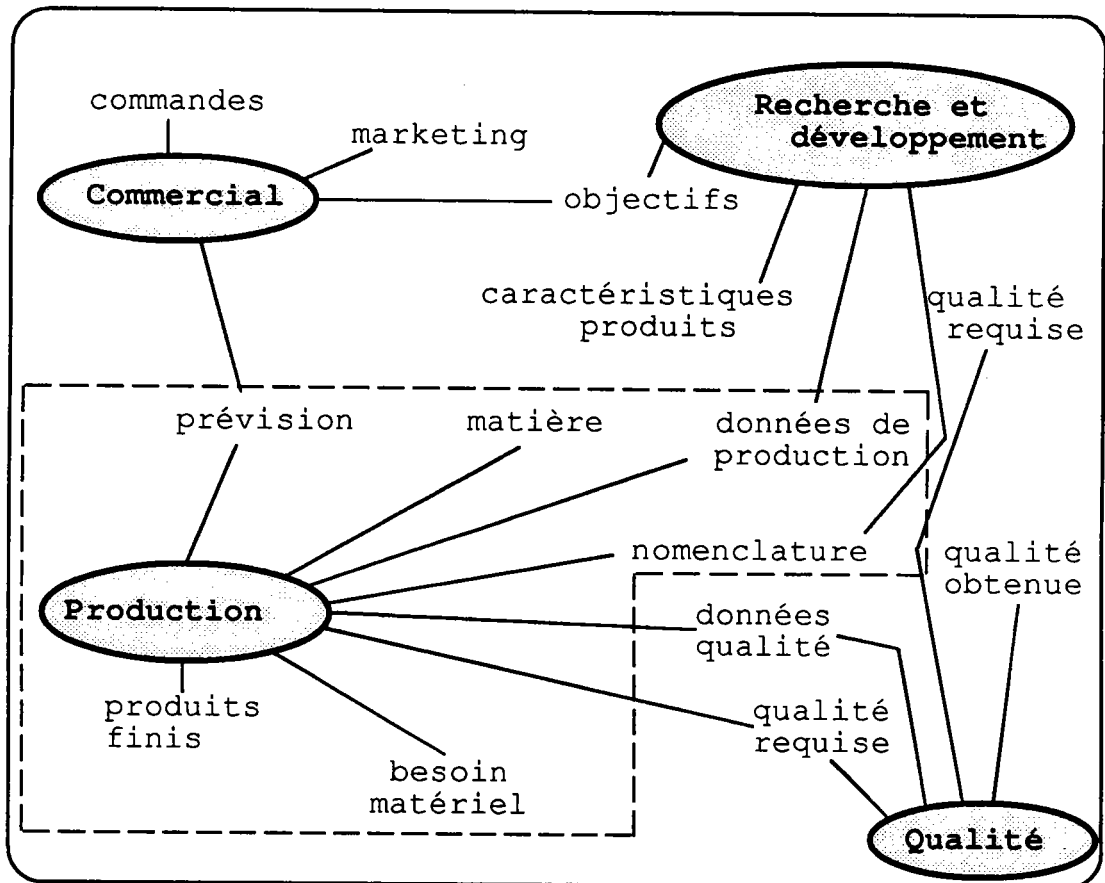
L'intégration de l'ensemble des sous systèmes hétéroclites ne peut se faire que si les techniques informatiques et automatiques sont utilisées de façon adéquate et de manière à organiser la qualité de la production à tous les niveaux de la conception d'un produit [Benc 85]. C'est le défi de la fin du siècle posé aux dirigeants d'entreprise et aux responsables de la production.

Le terme de cette évolution est sans doute l'usine du futur, entièrement automatisée selon le concept CIM, «**Computed Integrated Manufacturing**», (figure 1.1), où le cycle de fabrication d'un produit de sa conception à sa livraison, sera entièrement intégré où toutes les fonctions de l'entreprise seront assistées par un ensemble d'ordinateurs interconnectés, faisant appel à des bases de données accessibles à l'ensemble des utilisateurs par l'intermédiaire d'un réseau [Voi 85].



**Figure 1.1** : Roue de l'automatisation intégrée de la production.

Pour mener à bien ce projet productique, il faut s'assurer que les flux informationnels et matériels au sein de l'entreprise est fiable. La figure 1.2 résume l'ensemble des grandes fonctions du système complexe que constitue l'entreprise mais aussi leurs interactions [Fra 87].



**Figure 1.2** : Diagramme fonctionnel d'une entreprise [Sch86].

Ainsi :

- un système de planification des besoins ne peut fonctionner que si l'on s'est assuré, au préalable, de la conformité des nomenclatures et de la connaissance des stocks,
- un système de gestion des achats n'est performant que

- si les relations avec les fournisseurs sont bonnes,
- un magasin automatisé n'est efficace que si l'on a d'abord entrepris des actions pour diminuer les stocks.
  - un système de C.A.O. ou de F.A.O. n'est bien utilisé que si le personnel a été longuement formé et bien préparé, car le mode de travail et les façons de penser vont s'en trouver fortement modifiés.

## **1.2) La fonction production.**

La fonction production (voir encadré figure 1.1) se caractérise par la transformation de matières premières en produits finis. Ce processus s'effectue à la fois dans le temps et l'espace, et comporte quatre phases [Shi 83] :

- la fabrication consiste à transformer, usiner, monter et démonter les produits,
- le contrôle a pour but de vérifier la conformité des produits aux cahiers des charges,
- le transport intervient chaque fois qu'un changement d'emplacement des produits s'avère nécessaire,
- le stockage se définit par le temps durant lequel n'intervient aucune des opérations sus-citées.

Or, une seule de ces phases crée de la valeur ajoutée, à savoir celle qui comporte des opérations physiques ou technologiques modifiant le produit.

Les trois autres représentent des activités annexes qui, si elles ne transforment pas le produit, en augmentent cependant le

coût, et représentent environ la moitié de la valeur ajoutée. On conçoit donc aisément la nécessité de réduire au maximum toutes les activités liées au contrôle, au transport et au stockage. D'où les objectifs que se fixent les systèmes de production, qui peuvent se résumer à tendre vers les «zéros olympiques» :

- **zéro stock,**
- **zero défaut,**
- **zéro délai,**
- **zéro panne,**
- **zéro manutention.**

### **1.3) Les zéros olympiques.**

#### **1.3.1) Diminution des stocks.**

En dehors de l'aspect financier conduisant à une immobilisation des capitaux, des stocks trop importants engendrent des conséquences néfastes [Bena 86] :

- **il freinent les améliorations du produit, puisque l'on aura tendance à épuiser d'abord un stock existant,**
- **ils provoquent des délais et entraînent un retard dans les réactions auprès de la fabrication et des fournisseurs sur le plan de la qualité,**
- **ils sont générateurs de pièces obsolètes.**

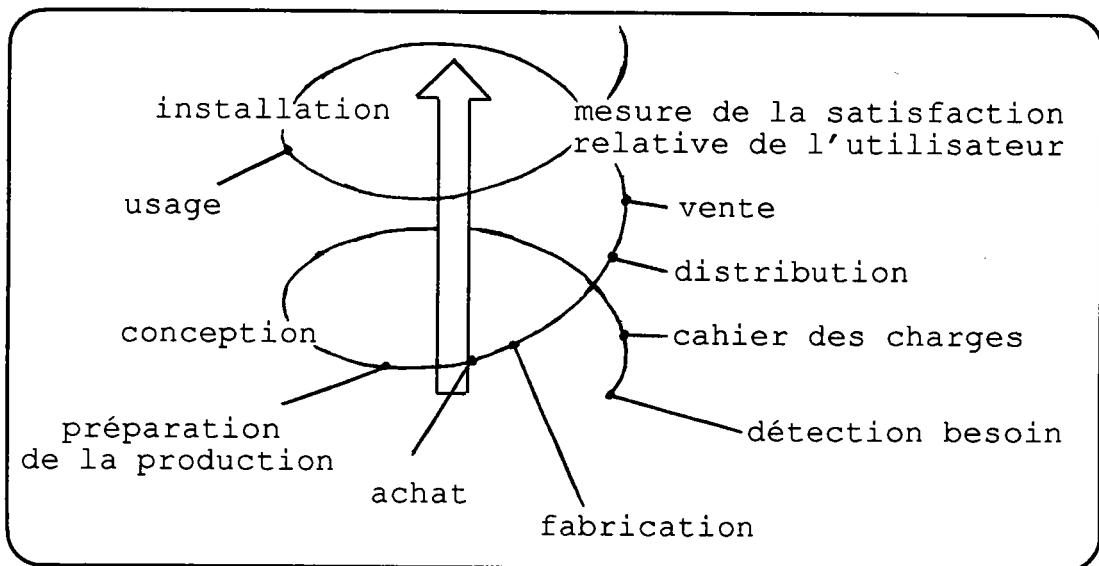
Pour remédier à ces inconvénients, l'effort portera sur trois domaines :

- **la réduction de la taille des lots,**

- la réduction du stock de sécurité,
- l'amélioration des flux de transport des produits.

### 1.3.2) Diminution des défauts.

La diminution des défauts est nécessaire, car la non qualité engendre des coûts pouvant atteindre 20 à 30% de la valeur de la production [Bon 87], [Lam 87].



**Figure 1.3** : Spirale de la construction de la qualité [Pru 86].

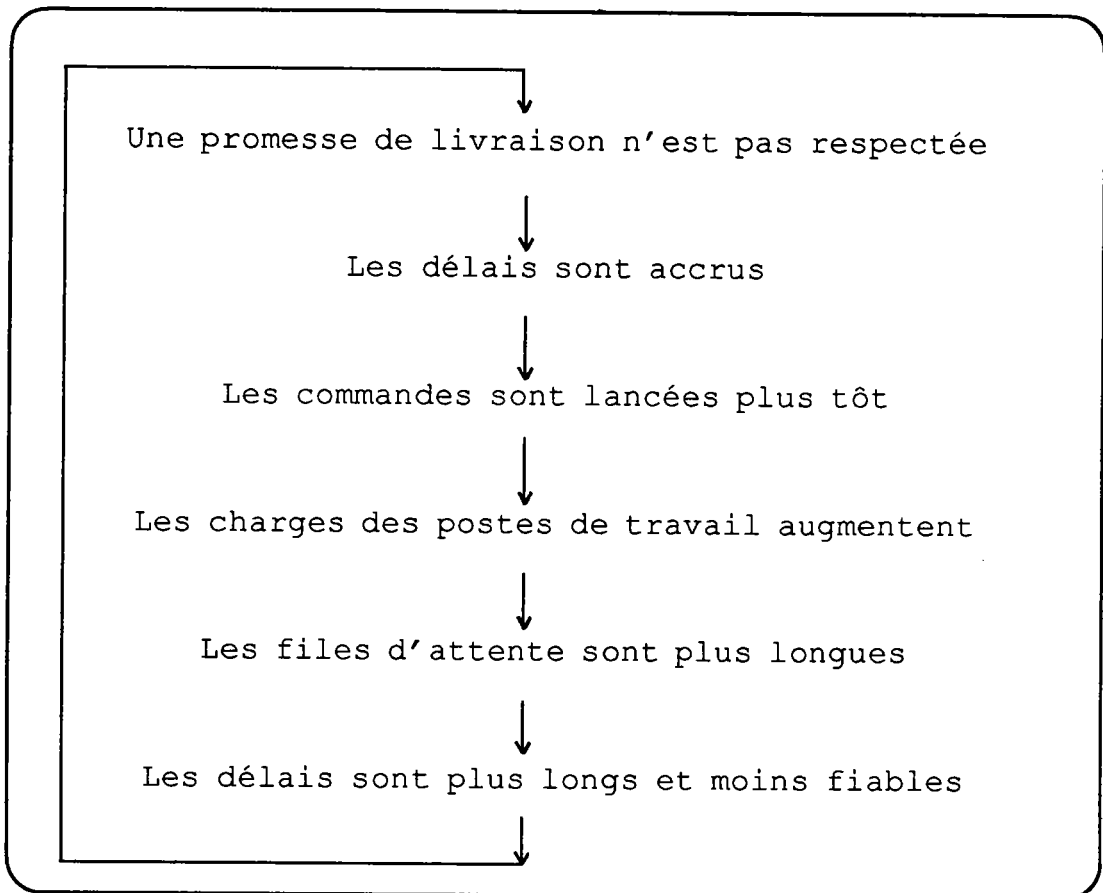
Un des facteurs essentiels est que la qualité doit être apportée non pas par le service de contrôle des produits finis, mais par tous les services de l'entreprise, comme le montre la figure 1.3.

Une des façons d'améliorer la qualité est de manutentionner le moins possible un produit par un choix approprié des moyens de transport et par le regroupement des postes de travail réalisant une famille de produits.

### 1.3.3) Diminution des délais.

Pour réduire les délais de fabrication d'un produit, on

peut agir sur plusieurs facteurs, tels que : l'approvisionnement, l'administratif, la production, le développement, etc...



**Figure 1.4** : Génération des délais [Bena 86].

Si l'on examine de plus près les délais dus à la production, on constate que le temps d'usinage d'un produit est très inférieur au temps de manutention et de stockage.

D'une façon générale, que ce soit pour la fabrication, les approvisionnements ou le développement, les délais génèrent eux-mêmes d'autres délais selon le processus que montre la figure 1.4.

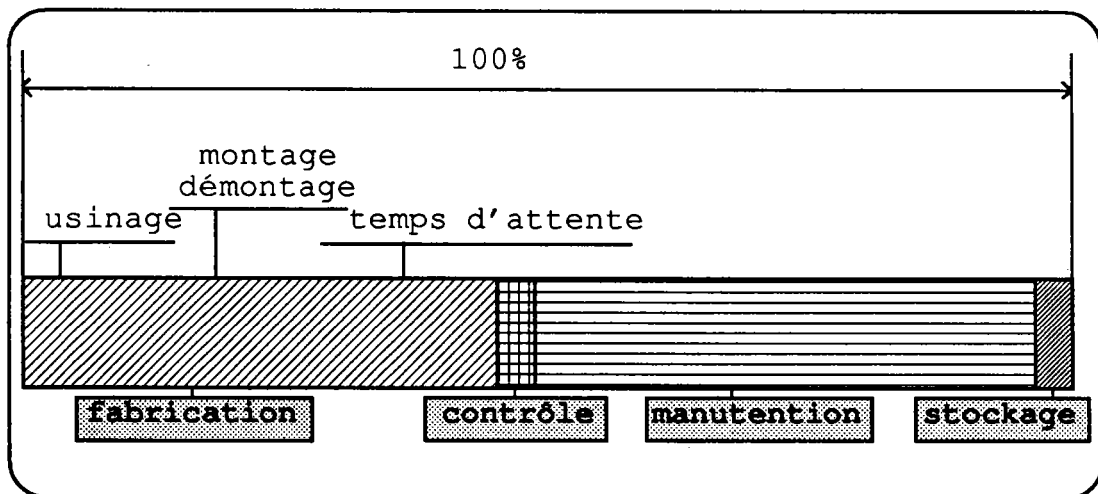
#### **1.3.4) Diminution des pannes.**

Pour diminuer les pannes dans une unité de production, le service maintenance doit :

- effectuer un contrôle statistique du processus de fabrication,
- motiver le personnel pour détecter les pannes,
- établir un arbre des causes à effets pour permettre de déterminer les organes défectueux,
- le cas échéant, réétudier le produit et (ou) le processus de fabrication.

### 1.3.5) Diminution de la manutention.

Dans une unité de production, en général, le transport constitue une part importante du processus de fabrication d'un produit. En effet, la fabrication représente 45% du temps passé dans l'atelier, le contrôle 5%, la manutention 45% et le stockage 5%, comme le montre la figure 1.5.



**Figure 1.5** : Décomposition du temps passé dans un atelier.

Pour y remédier efficacement, on doit :

- améliorer l'implantation des postes de travail, de manière à diminuer les distances de manutention,



- voire les supprimer,
- **déterminer par l'étude du flux, des caractéristiques des produits (volume, poids), le(s) moyen(s) de transport approprié(s).**

#### **1.4) Automatisation de l'appareil de production.**

Les deux types d'actions qui consistent à installer une cellule de tournage robotisée, ou à se doter d'un système de gestion de production, sont assimilables aux processus d'automatisation de l'appareil de production, même s'ils ne se situent pas sur le même plan. Cette notion d'automatisation a profondément modifié le système de production. Ce changement est perceptible sur trois niveaux : matériel, atelier et système de gestion.

##### **1.4.1) Evolution du matériel.**

Actuellement, l'évolution des postes de travail tend vers une plus grande autonomie de fonctionnement. Cette autonomie se caractérise par :

- **la combinaison d'opérations multiples,**
- **l'association des fonctions élémentaires d'usinage et de celles de préparation du poste de travail,**
- **l'accroissement des commandes numériques et des protocoles de communication.**

Cette évolution permet une diminution, une rationalisation et une meilleure gestion des flux de produits entre les différents postes de travail.

### **1.4.2) Evolution de l'atelier.**

Si l'atelier pouvait être considéré autrefois comme la somme d'un ensemble de postes de travail regroupés physiquement dans un même lieu ou sous la même dépendance hiérarchique, il a profondément évolué pour permettre l'émergence d'une véritable entité «atelier» dotée de ses propres moyens de gestion et de pilotage.

On notera au niveau de l'atelier :

- **l'apparition de véritables systèmes de pilotage et de gestion,**
- **la mise en oeuvre d'une coopération entre les différents moyens de production,**
- **l'utilisation de moyens de manutention automatisés,**
- **la prise en compte des aléas de production ou des pannes de postes de travail.**

### **1.4.3) Evolution du système de gestion.**

L'informatisation a permis sur le plan du système de gestion, la prise en compte d'un nombre toujours plus grand de paramètres et la résolution des problèmes classiques de gestion que sont la planification, l'ordonnancement ou l'agencement. L'apparition de nouvelles techniques de recherche opérationnelle a fortement contribué à cette évolution. Les grandes fonctions prises en compte dans le domaine de la gestion de production sont :

- **la gestion des données techniques,**
- **la planification,**
  - \* plan directeur de production,
  - \* ordonnancement,

- \* lancement,
- la gestion des stocks,
- le suivi de production.

En conclusion, l'automatisation permet de concilier les objectifs suivants :

- accroissement de la productivité par un meilleur engagement des postes de travail, une réduction des «en cours» et des délais de fabrication,
- augmentation de l'adaptabilité de l'appareil de production par une plus grande capacité des moyens engagés et une adéquation aux variations de la production.

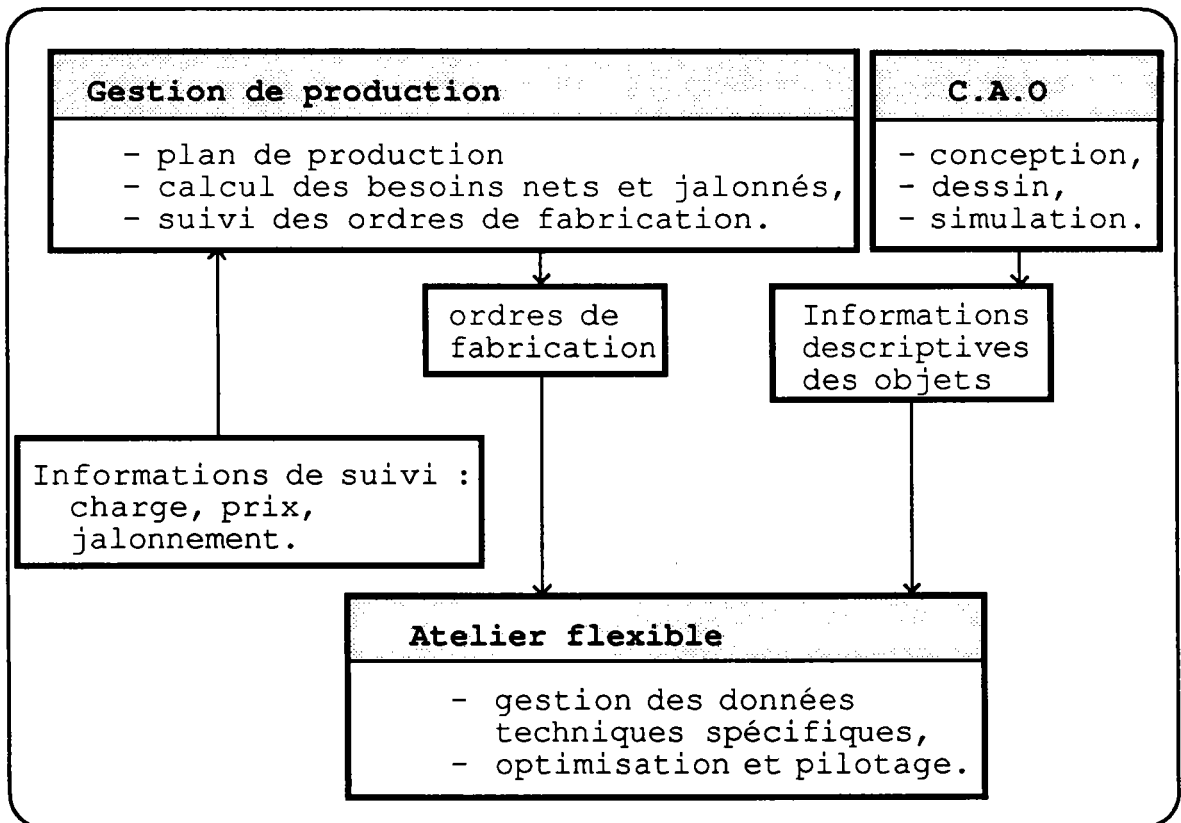
Ces deux objectifs peuvent être en partie atteints par les ateliers flexibles intégrés.

### **1.5) Les ateliers flexibles.**

A la base de la conception de l'ensemble des ateliers flexibles réside un principe d'autonomie : l'atelier doit disposer de l'ensemble des fonctions nécessaires à la production de pièces répondant aux spécifications fournies par la C.A.O. et selon les quantités et les délais impartis par la gestion de production, comme le montre la figure 1.6.

Ce principe conditionne directement l'organisation de la production. Contrairement aux ateliers conventionnels qui n'assurent que la tâche de fabrication, un atelier flexible regroupe les fonctions suivantes :

- **manipuler** : placer les pièces en position de travail,
- **fabriquer** : usiner, sonder, etc...,
- **piloter la production** : diriger chaque pièce vers un poste de travail selon son état d'avancement,
- **manutentionner** : transporter les pièces d'un poste de travail à l'autre,
- **stocker** : immobiliser les pièces, car les temps de passage sur les postes de travail ne sont pas identiques,
- **contrôler** : vérifier le respect de la qualité.



**Figure 1.6** : L'atelier flexible intégré.

Cet ensemble de fonctions représente la différence essentielle par rapport aux machines spéciales ou transfert qui ne peuvent exécuter que des produits sensiblement identiques dans les limites

fixées au préalable au moment de la conception de la ligne [Pro 86].

### **1.6) Les ateliers conventionnels.**

Actuellement nous relevons quatre grands types d'ateliers conventionnels :

- **Les sections homogènes** (figure 1.7a) dérivent du modèle de Taylor/Ford. Ce type convient plus particulièrement à une demande homogène, en progression régulière, et il engendre une production standardisée, en grandes séries et à durée de vie élevée. Il se base sur des processus séquentiels où les postes de travail accomplissant une fonction similaire sont regroupés en départements spécialisés où l'homme et la machine sont interdépendants.

L'organisation de type hiérarchique centralise les décisions et sépare les services fonctionnels des ateliers. Ceux-ci se sont cloisonnés en sections homogènes dans lesquelles les lots de pièces transitent suivant les étapes de l'usinage. Chaque section possède alors ses ouvriers spécifiques spécialisés, ses cadres, et dans chacune les pièces sont stockées en attente d'usinage ou de transfert.

Cette structure qui se décompose en étapes de production successives et prédéterminées ne dépend pas de l'environnement. Le modèle de représentation des processus de production de Taylor figure dans le tableau 1.1 où il est comparé à celui de la **Technologie de Groupe** que nous développerons ultérieurement.

La gestion d'un tel système se base sur la recherche opérationnelle, la gestion des stocks ; les décisions financières dépendent des critères d'investissement courants (addition des coûts de chaque phase de la production) et la gestion du personnel se fonde sur une classification des postes de travail.

- **Les chaînes de transferts** (figure 1.7b) sont constituées, comme leur nom l'indique, de postes de travail disposés en ligne, selon la succession des opérations imposées par la fabrication du produit. Généralement on élabore sur une telle chaîne un seul type de produits, mais il s'avère possible d'y réaliser des familles de produits similaires.
- **Les îlots de fabrication** (figure 1.7c) illustrent un type d'agencement où des produits semblables sont obtenus par un ensemble de postes de travail regroupés en îlots, à l'intérieur desquels s'effectue la quasi-totalité des opérations.
- **Les agencements modulaires** (figure 1.7d) sont composés d'îlots de fabrication, positionnés de chaque côté d'un couloir de communication. C'est un type des plus récents. L'usine de moteurs quatre cylindres Volvo-Skadeverken en est un exemple. Le corps de l'agencement est constitué d'un département de montage, encadré par un ensemble d'îlots séparés par des aires libres et situés aux angles.

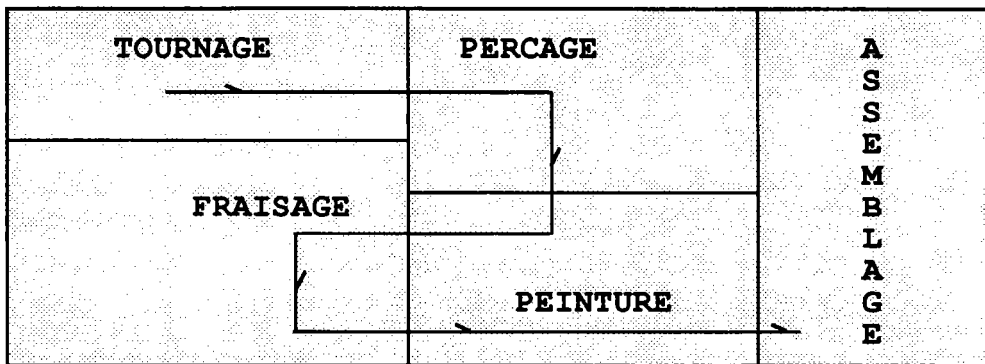


Figure 1.7.a : Sections homogènes.

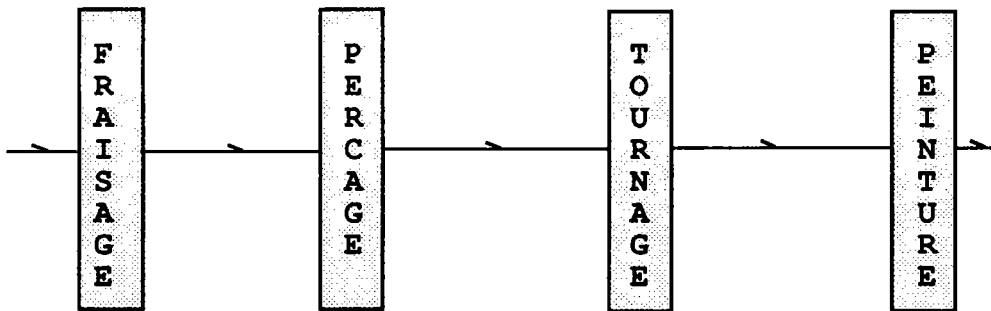


Figure 1.7.b : Chaîne de transfert.

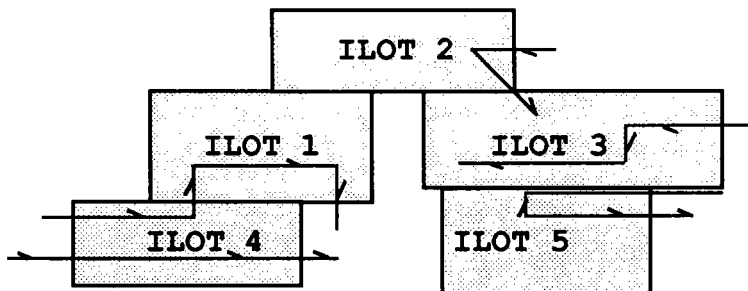


Figure 1.7.c : Ilots de fabrication.

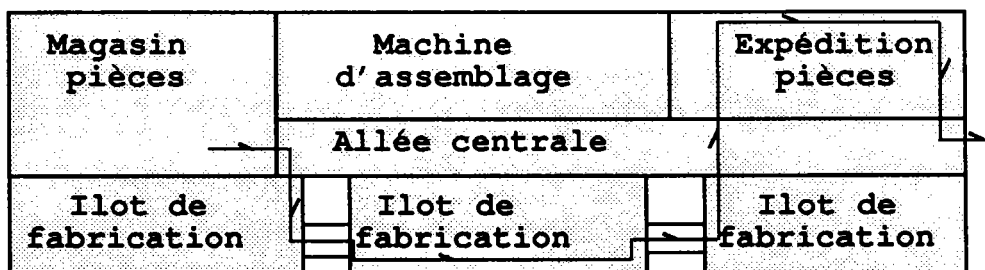


Figure 1.7.d : Agencement modulaire.

**Figure 1.7** : Différents types d'ateliers conventionnels.

Après avoir étudié les différents types d'ateliers existants (atelier flexible, atelier conventionnel), notre attention s'est portée sur la restructuration spatiale des entreprises à forte valeur ajoutée, fabriquant des produits manufacturés en petites et moyennes séries. Actuellement bon nombre de ces entreprises sont implantées en section homogène où il n'est pas possible d'automatiser (car la structure même de l'atelier ne s'y prête pas) et où les coûts de fabrication sont élevés, en raison de la manutention et des stocks importants comme nous l'avons vu précédemment.

C'est pour ces divers motifs que nous avons défini une méthodologie basée sur le concept de Technologie de Groupe Assisté par Ordinateur (**T.G.A.O**).

### **1.7) Le concept de coalescence.**

La naissance du principe de la technologie de groupe remonte aux années cinquante où S.P. Mitrofanow [Mit 60] chercha à regrouper les postes de travail et à standardiser les équipements de façon à ce qu'ils puissent fabriquer non pas un seul produit mais un ensemble de produits semblables (d'après les caractéristiques de la plus complexe).

Depuis la dernière décennie, sous les influences conjuguées d'une politique d'austérité dans un contexte économique stagnant, d'une diminution du cycle de vie des produits rapidement dépassés et d'une personnalisation de la demande, le système de production de masse introduit par Taylor dans les usines Ford au 19<sup>ème</sup> siècle se révèle inadapté à la compétitivité du marché actuel. Celui-ci réclame en effet un élargissement de l'éventail des produits fabriqués en série, souvent sur commande, mais en nombre plus réduit qu'auparavant. La demande variée, fluctuante mais de qualité, nécessite un



nouveau type de production basé sur :

- **une variété des produits,**
- **une variété des processus de fabrication,**
- **une complexité du système de production,**
- **un environnement plus fluctuant,**
- **des difficultés de planification et d'ordonnancement,**
- **une commande et un contrôle dynamique.**

De plus, les progrès technologiques (machine à commande numérique, centres d'usinages, généralisation de la micro-informatique) permettent la diversification et la qualité croissante des produits réalisés, les changements d'outils plus rapides et par conséquent le dépassement du système taylorien qui se révèle d'autant plus obsolète. La production se caractérise alors par le passage :

- **du travail sur des pièces au travail sur des informations,**
- **du travail à la machine au travail en cellule,**
- **de la gestion des flux prédéterminés (volume, nature, ...) à celle des flux variables flous,**
- **d'une organisation hiérarchique très structurée à une organisation interactive.**

La prise en compte de ces nouvelles caractéristiques augmente la flexibilité mais également la complexité du système de production du fait de l'interaction croissante de ses composantes. D'où l'importance d'une rationalisation des informations à toutes les étapes de la production.

L'entreprise entière se trouve donc touchée par la profonde mutation qui affecte la conception même de la production (avènement de la productique) dans chacune de ses composantes humaines, technologiques et organisationnelles (tableau 1.1).

Le recours à la T.G. s'impose inéluctablement malgré les réticences encore rencontrées car elle permet de faire face aux problèmes engendrés par la mutation du processus de production, puisqu'elle se base sur l'identification et l'exploitation des similarités entre les produits, entre leur conception et leur fabrication, de manière à rationaliser la production pour diminuer les prix de revient.

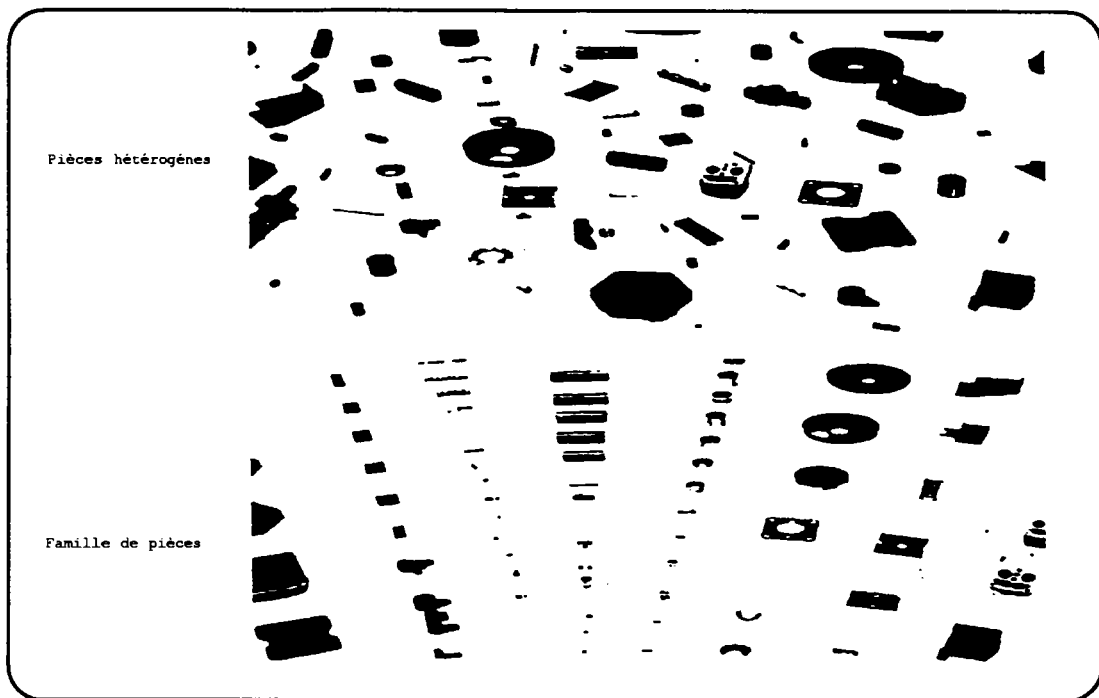
Le premier objet de la T.G. consiste à reconnaître et à regrouper les pièces similaires (figure 1.8) dans le but d'appliquer à chacune d'entre elles les données connues et l'expérience déjà acquise sur une pièce du même type précédemment réalisée. Il s'agira donc dans un premier temps d'élaborer des critères de regroupement.

Cela peut se faire d'après :

- **l'aspect visuel** : cette méthode se limite à un petit nombre de produits à examiner et exclut la prise en compte de certaines caractéristiques de fabrication non apparentes.
- **la nomenclature** : les produits sont classés selon leurs fonctions, mais doivent pour cela être définis très précisément et là encore on ne peut tenir compte de la méthode de fabrication.

<b>Modèle Fordien-Taylorien</b>	<b>Nouveau modèle</b>
<b>Aspects technologiques</b>	
Machine mono-opération	Machine-outils C.N.C. Centre d'usinage
Logique d'éclatement en machines diversifiées	Logique d'intégration des ressources
Production en grande séries	Petites et moyennes séries en lots respectifs
Standardisation des produits	Diversification des produits et standardisation des composants
Longue durée de vie des produits	Réduction de la durée de vie des produits
<b>Aspects organisationnels</b>	
Regroupement des machines par familles	Constitution d'îlots de fabrication regroupant des machines différentes autour de familles de pièces
Eloignement des services de préparation aux ateliers (séparation service/atelier)	Rapprochement des services fonctionnels du lieu de fabrication
Spécialisation et cloisonnement des services.	Intégration des fonctions, R/D, B.E., méthodes, gestion.
Importance de la hiérarchie	Réduction de la hiérarchie.
Organisation pyramidale avec centralisation des décisions	Organisation par modules avec décentralisation des décisions
<b>Aspects sociaux</b>	
Système de classification par poste	Recherche de nouveaux critères de classification
Relation classification/salaire et rendement	Individualisation des salariés et rendement intégré à l'organisation
Formation par ancienneté	Importance de la formation initiale et continue
Clivage entre les catégories salariales (cadres, techniciens, ouvriers)	Tendance à l'intégration, fonctionnelle de l'ensemble des salariés
Syndicalisme traditionnel centré sur les ouvriers	Importance croissante de la notion de syndicalisme d'entreprise

**Tableau 1.1** : Comparaison des modèles de représentation des processus de production.



**Figure 1.8** : Exemple de pièces hétérogènes et de leur regroupement en familles [ADE 83].

- **l'analyse des flux de production** [Bur 85] : un autre critère pour regrouper des pièces et réunir celles qui utilisent les mêmes postes de travail. Cette méthode est efficace au niveau du Bureau des Méthodes mais n'est pas adaptée aux autres services (Bureau d'Etude). Cependant cette approche présente un intérêt lors de la réorganisation des ateliers.
- **le codage et la classification** : à chaque pièce on fait correspondre une suite de nombres dont chacun représente la valeur d'une variable définissant le critère de classification. Si les critères retenus et leurs valeurs caractérisent précisément chaque pièce, on les regroupera en classes homogènes (figure 1.9)

selon les applications. Cette méthode semble actuellement la meilleure et la plus objective pour regrouper les produits semblables, car le codage qui indique une suite de critères reliés aux activités du Bureau d'Etude et de l'atelier, devient le vecteur d'intégration entre les services techniques et commerciaux (figure 1.10).

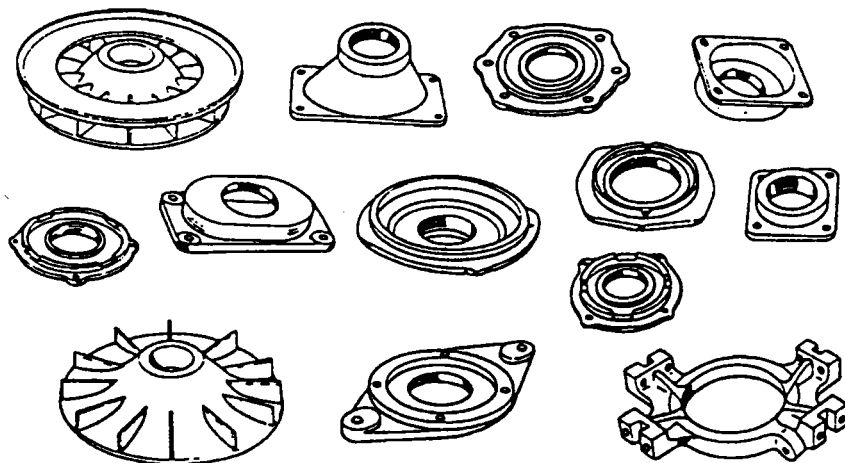
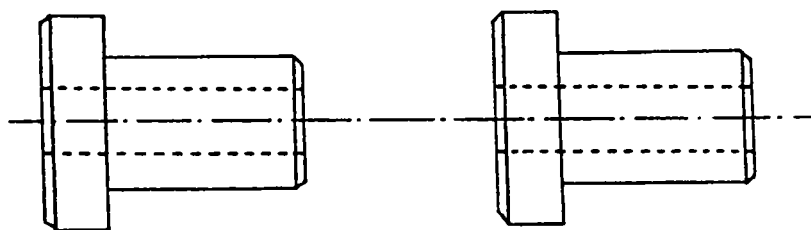


Figure 1.9a : Pièces de conception différente mais au processus de fabrication identique.

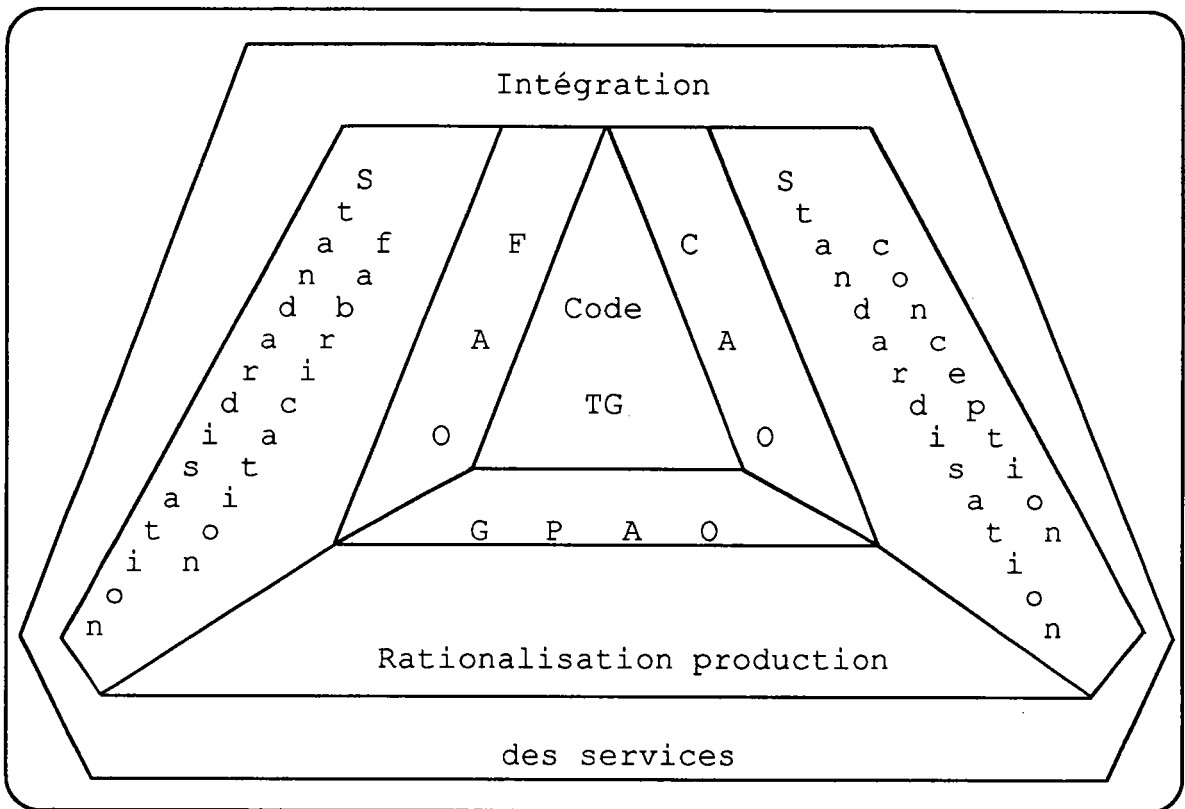


Tolérance :  $\pm 0.5$   
 Nombre : 200000/an  
 Matière : XC 38

Tolérance :  $\pm 0.001$   
 Nombre : 200/an  
 Matière : 25CD4

Figure 1.9b : Pièces de forme et taille identiques mais de fabrication différente.

**Figure 1.9** : Homogénéisation des moyens de production.



**Figure 1.10** : Le code T.G., support d'intégration.

La Technologie de Groupe, fabrication par familles de pièces, constitue alors un véritable principe général d'organisation à implanter dans une grande partie des services de l'entreprise, car la classification des pièces semblables permet le regroupement des postes de travail, des montages, des gabarits, des outils utilisés en commun, etc... Cela engendre un gain de temps (mise en place, production) par rapport à la fabrication répétitive antérieure et aboutit à la construction d'îlots de production très automatisés, ce qui améliore la productivité par la baisse des «en-cours», des temps de réglage, des stocks, des transports et facilite la gestion en temps réel.

L'organisation taylorienne de l'atelier se trouve donc entièrement bouleversée et évolue vers un **Système Intégré de Fabrication** (S.I.F.). L'objectif de la T.G. en tant que S.I.F. se définit

désormais, par l'analyse systématique de tous les produits et de leurs composants pour optimiser l'organisation et la conduite du système de production, par la maîtrise des coûts ainsi que celle des flux informationnels et de matière.

L'optimisation de ces flux dépend naturellement de la qualité de l'organisation, reposant sur une bonne structuration et de son degré d'adaptation à l'entreprise concernée.

**CHAPITRE II**  
**AGENCEMENT D'UN ATELIER :**  
**L'ETAT DE L'ART**



## **II) Agencement d'un atelier : état de l'art**

### **2.1) Introduction.**

En 1970 El-Rayad et al [Ray 70] a proposé une définition de l'agencement : c'est un procédé visant à obtenir une disposition optimale des postes de travail dans une unité de production.

Dans la pratique, il existe quatre situations différentes qui sont, dans l'ordre de difficulté croissant :

- **construction d'une nouvelle unité de production,**
- **nouvel agencement dans un local existant,**
- **ré-agencement d'une zone donnée,**
- **addition d'un poste de travail dans une unité de production.**

La mise au point d'une nouvelle unité se révèle en général très onéreuse mais ne se présente que rarement. Par contre, le cas de figure le plus couramment rencontré, à savoir l'ajout d'un poste de travail dans un agencement pré-existant, s'avère également le plus économique.

Cependant si le niveau de difficulté de chacun de ces problèmes diffère (par exemple pour la construction d'une nouvelle unité, il n'existe pas de contrainte sur l'occupation au sol, alors que lors de l'ajout d'un poste de travail, on doit perturber le moins possible l'agencement existant), ils possèdent néanmoins des caractéristiques mathématiques identiques :

- **ils ne peuvent être décrits exclusivement par des valeurs numériques,**
- **le but à atteindre ne peut être défini uniquement en**

termes de fonction(s) objectif(s),

- **il n'existe pas d'algorithme permettant de trouver la solution exacte.**

C'est pour ces diverses raisons que les problèmes d'agencement aboutissent à des problèmes du type NP-complet [New 69], [Ben 71].

De plus, définir l'étendue du problème d'agencement constitue une tâche peu aisée du fait de la multiplicité des paramètres à considérer, ceux-ci variant en fonction des situations. Nous pouvons cependant en dégager les principaux [Fra 74] :

- **addition d'un nouveau produit,**
- **suppression d'un produit existant,**
- **changement dans le volume d'un produit,**
- **remplacement des moyens de production,**
- **nouvelles normes de sécurité,**
- **changement dans l'organisation,**
- **décision de construire une nouvelle installation,**
- **goulots d'étranglement dans la production,**
- **retard et temps improductif,**
- **temps de stockage trop important,**
- **temps de manutention trop long.**

Toutes les remarques précédentes expliquent la variété des approches proposées, à savoir :

- **l'énumération totale** : elle constitue l'approche primaire, où l'on exploite la rapidité de calcul de l'ordinateur et où l'on évalue toutes les solutions. Cette

approche se révèle souvent inadaptée compte-tenu de la complexité du problème d'agencement.

- **la programmation interactive** : elle permet à la fois de concilier le savoir-faire de l'analyste et les capacités de l'ordinateur, efficace dans la manipulation de grandes quantités de données typiques des problèmes d'agencement.

La complémentarité homme-machine peut effectivement aboutir à une bonne solution.

- **les programmes heuristiques** : ils incluent des algorithmes qui présentent l'avantage de réduire le nombre de recherches nécessaires à l'obtention d'une solution acceptable.

Cette dernière technique parfois associée à des systèmes experts est la seule qui permette de résoudre les problèmes NP-complet, typiques des applications industrielles.

## **2.2) Les objectifs.**

Un projet d'installation ou de modification d'une unité de production doit obligatoirement se conformer aux normes de sécurité et aux principes généraux de la conception du travail. Mais il doit également satisfaire aux critères suivants :

- **coût de manutention minimum** : pour cela les postes de travail doivent être disposés en conséquence. Ce résultat est obtenu par le choix approprié des moyens

de transport, des gammes de fabrication et surtout de l'emplacement relatif des postes de travail. Ces trois facteurs influencent directement le nombre de chargements par unité de temps et la distance de parcours des produits.

- **flexibilité maximale** : un agencement doit être flexible dans le sens où il doit être rapidement et facilement modifiable pour répondre à des impératifs divers (par exemple : addition ou suppression d'un produit).
  
- **mobilité maximale** : un bon agencement doit permettre aux moyens de transport de se mouvoir librement dans les allées.

L'évaluation de la conformité à ces critères permet de juger de la qualité de l'agencement. Cependant nous ne pouvons négliger d'autres objectifs tels que :

- **minimiser l'investissement dans le matériel,**
- **réduire le temps global de production,**
- **utiliser efficacement la place disponible,**
- **minimiser le nombre de types de moyens de transport.**

### **2.3) Modélisations et méthodes de résolution.**

Les modèles mathématiques développés pour les problèmes d'agencement peuvent être classés en cinq grandes familles :

- l'assignation quadratique  
(placement sur sites prédéterminés),
- le placement quadratique  
(placement en l'absence de sites prédéterminés),
- la programmation linéaire en nombre entier,
- la programmation quadratique en variables zéro-un,
- la théorie des graphes.

Dans ce qui suit, nous allons exposer les différents modèles ainsi que leurs techniques de résolution.

### **2.3.1) Modèle d'assignation quadratique.**

#### **a) Modèles mathématiques.**

Koopmans et Beckman [Koo 57] furent les premiers à proposer un modèle d'assignation quadratique (QAP), ainsi nommé parce que la fonction objectif est du second degré et que les contraintes sont linéaires. Ce QAP est le premier à imposer des emplacements fixes aux postes de travail avec un flux de produit.

Soient :

- $n$  : nombre total de postes de travail (ou d'emplacements).
- $a_{ij}$  : revenu net de fonctionnement du poste de travail  $i$  sur l'emplacement  $j$ . Il inclut les revenus bruts auxquels on retranche le coût de l'investissement de base, mais ne comprend pas le coût de transport des produits d'un poste de travail à l'autre.
- $f_{ik}$  : flux de produits du poste de travail  $i$  au poste

de travail  $j$ . Il est indépendant de l'emplacement des postes de travail.

$C_{j1}$  : coût de transport unitaire de l'emplacement  $j$  à l'emplacement 1. Il est indépendant des postes de travail, et il revient moins cher de transporter les produits directement du poste de travail  $i$  au poste de travail  $k$  que de les faire transiter par un troisième emplacement.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le poste de travail } i \text{ est à l'emplacement } j; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Le QAP est :

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} \cdot C_{j1} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (1)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Si  $a_{ij}$  représente maintenant les coûts de déplacement et de fonctionnement du poste de travail  $i$ , au lieu de représenter son revenu net de fonctionnement, alors (1) peut être reformulé de la manière suivante :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} \cdot C_{jl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (1a)$$

sous les contraintes : (2), (3) et (4)

avec  $a_{ij}$  : coût fixe de déplacement du poste de travail  $i$  à l'emplacement  $j$ .

Lawer [Law 63] introduit la quantité  $b_{ijkl}$ , telle que :

$$b_{ijkl} = \begin{cases} f_{ik} \cdot C_{jl} + a_{ij} & \text{si } i=k \text{ et } j=l \\ f_{ik} \cdot C_{jl} & \text{si } i \neq k \text{ ou } j \neq l \end{cases}$$

d'où la reformulation de la fonction objectif (1a) :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{ijkl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (1b)$$

sous les contraintes : (2), (3) et (4).

Dans la formulation ci-dessus si :

- $i \neq k$  alors  $j \neq l$ ,
- $j \neq l$  alors  $i \neq k$ ,
- $i=k$  alors  $j=l$ ,
- $j=l$  alors  $i=k$ ,

Cet ensemble de conditions est dû aux équations (2) et (3). De plus, le nombre des postes de travail est égal au nombre d'emplacements. Cependant, dans certains problèmes comme celui de

**1** :  $i$  différent ( $\neq$ ) de  $k$

Steinberg (1961), le nombre de postes de travail  $m$  est inférieur au nombre d'emplacements  $n$  ( $m < n$ ). De tels problèmes peuvent également être ramenés à un QAP par l'adjonction de postes de travail fictifs ( $n-m$ ) et par l'annulation de la valeur des flux de ceux-ci vers tous les autres.

Si la valeur de tous les  $a_{ij}$  est nulle ou identique, alors la fonction objectif (1a) se ramène à :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} \cdot C_{jl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (1c)$$

Deux cas particuliers du QAP peuvent être déduits des relations (1a), (2) à (4), et sont présentés à l'annexe A (paragraphe 1.1 et 1.2).

Le QAP (1a), (2) à (4) est fréquemment utilisé pour formuler les problèmes d'agencement. Cependant, si l'on considère le cas des problèmes d'agencement où l'on ignore au départ l'emplacement des postes de travail, ceux-ci ne peuvent être formulés en QAP parce qu'il est impossible de déterminer la distance  $d_{jl}$  entre les emplacements  $j$  et  $l$ , car elle dépend de la séquence d'aménagement de tous les autres postes de travail.

Cette situation ne se produit pas lorsqu'il s'agit de problèmes sur sites prédéterminés, où les postes de travail sont de même taille, les surfaces des emplacements identiques et les distances, de ce fait constantes, indépendantes des postes de travail assignés à ces emplacements (annexe A, paragraphe 1.3). Les problèmes où l'on connaît les emplacements et où les postes de travail n'ont pas la même taille, peuvent être formulés de deux façons. La première est :



$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} \cdot C_{jl}^k \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (5)$$

sous les contraintes : (2), (3) et (4).

avec  $C_{jl}^k$  : coût de transport par unité de produit de l'emplacement  $j$  à l'emplacement  $l$  pour l'agencement  $K$ .

Notons que  $K$  augmente l'ensemble des agencements potentiels et comme l'ont montré Armor et Buffa [Arm 63], leur nombre dépend de la surface des postes de travail et n'est pas forcément  $n!$ . Deux ou plusieurs agencements peuvent être symétriques et il suffit d'en évaluer un seul.

La deuxième formulation est un problème de placement quadratique qui sera examiné ultérieurement.

### **b) Méthodes de résolution.**

Pour résoudre les problèmes d'assignation quadratique, plusieurs algorithmes furent développés :

- les algorithmes «Branch and Bound»,
- les algorithmes «Cutting plane».

#### **1) Les algorithmes «Branch and Bound».**

Les algorithmes «Branch and Bound» évoluent sur la base d'une assignation des postes de travail à des emplacements (Gilmore [Gil 62], Lawer [Law 63]) ou a des paires d'assignations (Land [Lan 63], Gavett et Plyter [Gav 66], Pierce et Crowston [Pie

71])). Les procédures par séparation et évaluation ou «Branch and Bound» explorent l'ensemble des solutions du problème. Elles effectuent une recherche arborescente partielle grâce à l'utilisation d'évaluations astucieuses ou bornes. Lavalle et Roucairol [Lav 85] proposèrent d'utiliser des algorithmes «Branch and Bound» en parallèle pour accélérer la recherche de la solution.

Plusieurs autres algorithmes «Branch and Bound» furent développés dont ceux de Grave et Whinston [Gra 70], Burkard [Bur 83] et Bazaraa [Baz 75]. Mais leur utilisation devient délicate lorsque le nombre de postes de travail augmente (supérieur à douze). C'est pour cela qu'il est conseillé de les interrompre prématurément, et de ce fait les solutions obtenues ne sont plus optimales.

## **2) Les algorithmes «Cutting plane».**

Burkard et Bunninger [Bur 84] utilisent des algorithmes «Cutting plane» pour interrompre la procédure «Branch and Bound», basés sur des limites de temps de recherche ou sur la qualité des sauts les plus fréquents.

Les algorithmes «Cutting plane» présentent les mêmes inconvénients que les algorithmes «Branch and Bound» et n'obtiennent de solutions optimales que pour un maximum de huit postes de travail.

### **2.3.2) Modèles de placement quadratique.**

#### **a) Modèles mathématiques.**

La seconde formulation du problème d'agencement est le placement quadratique (QSP) [Baz 75]. Dans celle-ci la surface

totale de tous les postes de travail est divisée par le nombre de blocs (un bloc est égal à une unité de surface).

Soient :

$q$  : nombre de blocs.

$I(i)$  : nombre d'emplacements virtuels pour le poste de travail  $i$ .

$J_i(j)$  : nombre de blocs occupés par le poste de travail  $i$  s'il est assigné à l'emplacement  $j$ .

$d(j_1, l_k)$  : distance entre les centres des emplacements  $j$  et  $l$  si le poste et travail  $i$  est assigné à l'emplacement  $j$  et si le poste de travail  $k$  est assigné à l'emplacement  $l$ .

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le poste de travail } i \text{ est à l'emplacement } j; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$p_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{si le bloc } t \in J_i(j); \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Le QSP est alors :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{I(i)} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{I(i)} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{I(k)} f_{ik} \cdot d(j_1, l_k) \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (6)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{j=1}^{I(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{I(i)} P_{ijt} \cdot x_{ij} \leq 1 \quad \forall t=1,2,\dots,q \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

$$\forall j=1,2,\dots,I(i)$$

Nous remarquons que la contrainte (7) entraîne l'assignation de chaque poste de travail à un seul emplacement et la contrainte (8), l'occupation de chaque bloc par au plus un poste de travail.

La mesure des distances s'effectuant à partir du centre des emplacements, Bazaraa [Baz 75] propose une nouvelle mesure des flux :

$$f'_{ik} = f_{ik} / S_i \cdot S_k$$

où  $S_i$  et  $S_k$  sont les nombres de blocs occupés par les postes de travail  $i$  et  $k$ , et si  $d'_{jl}$  est la distance entre les blocs  $j$  et  $l$ .

En utilisant cette nouvelle notation, on obtient un QAP généralisé :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^q f_{ik} \cdot d'_{jl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} / S_i \cdot S_k \quad (10)$$

sous les contraintes :

$\mathbf{1}$  :  $P_{ijt}$  inférieur ou égal ( $\leq$ ) à 1

$$\sum_{j=1}^q x_{i,j} = S_i \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} \leq 1 \quad \forall j=1,2,\dots,q \quad (12)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (13)$$

$$\forall j=1,2,\dots,q$$

Cette formulation peut être utilisée pour le problème d'agencement, mais présente l'inconvénient suivant : plus le maillage est serré (unité de surface plus petite), plus le problème devient complexe.

### **b) Méthodes de résolution.**

Le placement quadratique étant, comme nous venons de le voir, transformé en problème d'assignation quadratique, on se reportera aux techniques de résolution applicables à ce dernier.

### **2.3.3) Programmation linéaire en nombre entier.**

#### **a) Modèles mathématiques.**

Hormis les modèles QAP et QSP, il existe plusieurs formulations en programmation linéaire en nombre entier dont Lawer [Law 63] établit la première version, en définissant :

$$y_{i,jk,l} = x_{i,j} \cdot x_{k,l} \quad (14)$$

et en utilisant (1b), (2) à (4) on obtient le modèle :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{i,jk,l} \cdot y_{i,jk,l} \quad (15)$$

sous les contraintes (2) (3) (4) et :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n y_{ijkl} = n^2 \quad (16)$$

$$x_{ij} + x_{kl} - 2 \cdot y_{ijkl} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, l = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

Lawer [Law 63] démontre que le problème ci-dessus et le QAP sont équivalents. Mais le QAP à  $n^2 \cdot x_{ij}$  variables et  $2n$  contraintes tandis que la programmation linéaire en nombre entier a  $n^2 \cdot x_{ij}$  variables,  $n^4 \cdot y_{ijkl}$  variables et  $n^4 + 2n + 1$  contraintes.

Love et Wong [Lov 76] proposèrent un modèle simple de programmation linéaire en nombre entier pour résoudre le QAP dans lequel :

- les emplacements sont les points d'un plan bidimensionnel,
- les coûts de transport sont proportionnels aux distances rectangulaires pondérées.

Si :

$$h_{ik}^r = \begin{cases} \text{distance horizontale entre les postes de travail } i \\ \text{et } k \text{ quand } i \text{ se trouve à droite de } k; \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$$h_{ik}^l = \begin{cases} \text{distance horizontale entre les postes de travail } i \\ \text{et } k \text{ quand } i \text{ se trouve à gauche de } k; \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$1 : x_{ij} + x_{kl} - 2 \cdot y_{ijkl}$  supérieur ou égal ( $\geq$ ) à 0

$$v_{ik}^a = \begin{cases} \text{distance verticale entre les postes de travail } i \\ \text{et } k \text{ quand } i \text{ se situe au-dessus de } k; \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$$v_{ik}^b = \begin{cases} \text{distance verticale entre les postes de travail } i \\ \text{et } k \text{ quand } i \text{ se situe en-dessous de } k; \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$  : emplacement du poste de travail  $i$ .

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ si le poste de travail } i \text{ est assigné à} \\ \text{l'emplacement } j; \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

La formulation du QAP en programmation linéaire en nombre entier s'écrit :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n f_{ik} \cdot (h_{ik}^r + h_{ik}^l + v_{ik}^a + v_{ik}^b) \quad (19)$$

sous les contraintes (2) (3) (4) et :

$$h_{ik}^r - h_{ik}^l = \bar{x}_i - \bar{x}_k \quad \forall i=1,2,\dots,n; k=i+1 \quad (20)$$

$$v_{ik}^a - v_{ik}^b = \bar{y}_i - \bar{y}_k \quad \forall i=1,2,\dots,n; k=i+1 \quad (21)$$

$$\bar{x}_i + \bar{y}_i = \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j + \bar{y}_j) \cdot x_{ij} \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (22)$$

$$\bar{x}_i - \bar{y}_i = \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{y}_j) \cdot x_{ij} \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (23)$$

$$h_{ik}^r, h_{ik}^l, v_{ik}^a, v_{ik}^b \geq 0 \quad \forall i=1,2,\dots,n; k=i+1 \quad (24)$$

$$\overline{x}_i, \overline{y}_i \geq 0 \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (25)$$

Nous pouvons constater que les emplacements sont donnés en coordonnées rectangulaires. Les contraintes (22) et (23) précisent uniquement l'emplacement d'un poste de travail. La formulation ci-dessus possède  $n^2$  variables entières et  $n^2+3n$  contraintes. L'expérience montre qu'elle ne convient pas à des agencements de plus de huit postes de travail.

Les deux autres techniques de résolution pour l'agencement, à savoir la programmation quadratique en variable zéro-un et la théorie des graphes de moindre importance sont exposées à l'annexe A.

## **2.4) Méthodologies d'agencement.**

Après la présentation des principaux modèles mathématiques et de leurs méthodes de résolution, nous abordons maintenant les différentes méthodologies d'agencement et les logiciels développés à ce jour.

### **2.4.1) Méthodologies utilisées.**

#### **a) Diagramme des circuits.**

Introduit par Cameron [Cam 52], repris par Smith(1955), il permet d'aménager et d'analyser la manutention des produits de façon rapide et concise. Il procède de la manière suivante :

- **recueil des données concernant le volume des données et la succession des postes de travail,**
- **choix d'un agencement initial,**
- **calcul de la matrice des distances-flux à partir de**



l'agencement initial,

- analyse de la matrice par la détermination des mouvements critiques et de l'efficacité actuelle de l'agencement,
- évaluation des mouvements et répercussion des améliorations sur l'emplacement des postes de travail,
- poursuite de l'amélioration jusqu'à ce qu'aucun progrès supplémentaire ne soit plus possible.

### **b) Analyse de la succession.**

On se base sur l'analyse de la succession des opérations et des postes de travail pour chaque produit. Les différentes étapes sont :

- recueil des données concernant l'ordre des opérations et des impératifs de production,
- recueil des estimations des besoins en surface,
- résumé de l'ordre des opérations,
- évaluation des flux par unité de temps entre les centres des postes de travail,
- développement systématique de l'agencement amélioré.

### **c) Organisation systématique d'agencement.**

Cette méthode développée par Muther [Muth 61], analyse la totalité des relations entre les postes de travail et peut être décrite comme suit :

- analyse des relations entre les postes de travail,
- établissement des surfaces nécessaires et des confi-

- gurations pour tous les postes de travail,
- report graphique des activités et aménagement de l'espace nécessaire à la formulation d'un modèle,
  - évaluation des agencements par rapport aux contraintes et aux objectifs définis par la direction.

#### d) Autres méthodologies.

- la technique d'exigence d'ordre (Noy 1957)
- l'aménagement en ligne (Reed 1967)
- l'analyse par facteur (Reis et Anderson 1969)

### 2.4.2) Logiciels d'agencement.

#### a) Les programmes de construction.

Utilisés pour générer un nouvel agencement, ils offrent une grande liberté due à l'absence des contraintes sur l'occupation au sol (les allées, les postes de travail fixes, etc...). Voici les plus courants :

- **CORELAP** (*Computerized Relationship Layout Planning: organisation informatisée d'agencement des relations*)

CORELAP, Lee et Moore [Lee 58] [Lee 67], établit un diagramme des relations, figurant les liens entre les postes de travail, puis il calcule le taux total de proximité (Total Closeness Rating : TCR) qui dépend de la proximité désirée de chaque poste de travail. Il place au centre de l'agencement celui qui possède le TCR le plus élevé. Il ajoute ensuite à l'agencement les postes de travail restants, dans l'ordre décrois-

sant de leur TCR (par rapport aux postes déjà assignés), jusqu'à les avoir tous placés. CORELAP aboutit à une solution qui ne peut être considérée comme optimale au sens mathématique strict, cependant il présente l'avantage de considérer la relation qualitative entre les postes de travail.

- **ALDEP** (*Automated Layout Design Program : programme d'agencement automatique*)

ALDEP Seehof et Evans [See 67] sélectionne au hasard un poste de travail et le situe dans la partie supérieure gauche de l'agencement. Il assigne ensuite le poste de travail ayant un nombre de relations égal ou supérieur à une valeur spécifiée par l'analyste. Si plusieurs postes de travail satisfont à cette condition, le programme en choisit un autre au hasard, s'il n'y en a aucun il en détermine un, et ainsi de suite.

Notons que le poste de travail assigné à l'étape  $n$  dépend de sa relation avec celui localisé à l'étape  $n-1$ .

- **PLANET** (*Plant Layout Analysis and Evaluation. Technique d'analyse d'agencement et technique d'évaluation*) .

L'assignation des postes de travail proposée par PLANET (Deisenroth et Apple [Dei 72]) est effectuée en trois étapes. Dans la première, il détermine le coût des unités de flux entre chaque paire de postes de travail, puis l'analyste attribue à chaque poste de travail un numéro de priorité de 1 (le plus grand) à 9 (le plus petit) qui définit l'ordre de son entrée dans

l'agencement. Dans la deuxième étape, l'analyste peut choisir entre trois algorithmes pour sélectionner l'ordre d'entrée d'un poste de travail, basé sur le numéro de priorité combiné au coût de l'unité de flux entre chaque paire de postes de travail. La troisième consiste à placer les postes de travail dans les agencements suivant l'ordre précédemment déterminé.

### **b) Les programmes d'amélioration.**

Ils consistent soit à restructurer tout ou partie de l'atelier lors d'une modification importante dans la production ou lors de la mise en oeuvre d'une nouvelle stratégie, soit à ajouter une nouvelle machine dans un atelier existant. Dans ce dernier cas, de loin le plus fréquent, il convient d'éviter autant que possible la perturbation de l'agencement donné, tout en disposant la machine supplémentaire dans un emplacement augmentant le moins possible les trajets des produits.

- **CRAFT** (*Computerized Relative Allocation of Facilities Technique : technique informatisée d'attribution relative des postes de travail*) .

CRAFT (Buffa et Armor [Buf 64]), part des données relatives aux flux de produits entre les postes de travail et tente de générer un agencement minimisant uniquement les coûts de transport. CRAFT se base sur deux hypothèses :

- \* les coûts de transport sont indépendants du type de matériel,
- \* les coûts de transport sont rapportés linéairement à la distance du transport.

La procédure CRAFT commence par déterminer les centres des postes de travail de l'agencement initial. Ensuite elle calcule la distance rectiligne entre ces centres et génère une matrice des distances. Le coût de transport est déterminé en calculant le produit de la matrice des flux par la matrice des distances. CRAFT prend ensuite en compte les échanges entre les postes de travail qui ont une surface égale ou des limites communes, de façon à minimiser les coûts de transport. Après chaque permutation les coûts sont recalculés. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration possible. Le nombre possible d'échanges par paire est calculé comme étant le nombre de combinaisons de  $r$  postes de travail pris parmi  $n$ .

$$C_n^r = \frac{n!}{r! \cdot (n-r)!}$$

Les types d'échanges pris en compte par CRAFT sont, les échanges par paire, par tierce, par paire suivis d'échanges par tierce ou inversement, mais aussi le meilleur des échanges par tierce ou par paire.

L'échange offrant le coût de transport minimal constitue l'agencement final. Bien que l'heuristique de CRAFT ne garantisse pas une solution optimale, l'expérience a prouvé que les solutions générées peuvent être considérées comme bonnes.

Cependant, la configuration de départ fournie par l'analyste influe grandement sur la qualité de la configuration finale. C'est pourquoi, il peut s'avérer

nécessaire de considérer différents agencements initiaux pour choisir parmi les résultats obtenus le plus compétitif.

- **COFAD** (*Computerized Facilities Design : conception informatisée de postes de travail*)

COFAD (Tompkins et Reed [Tom 76]), est une variante de CRAFT qui inclut les coûts de transport de tous les systèmes de manutention qui doivent être déterminés à chaque agencement. Les données demandées sont les mêmes que celles de CRAFT. L'objectif de COFAD est de sélectionner un système de manutention et un agencement minimal.

De plus, il tient compte du matériel et des allées fixes mais aussi variables. Il calcule les coûts pour des agencements alternés par une procédure identique à CRAFT. Après le choix d'un agencement et du système de manutention, le programme examine l'utilisation de ces équipements.

COFAD-F (Shore et Tompkins [Sho 80]) prend en compte les volumes variants des produits. Il génère des configurations qui peuvent servir à évaluer la flexibilité des agencements.

- **H 63.**

Hillier [Hil 63] a mis au point un algorithme heuristique basé sur une table de mouvements désirés. Cette table est un ensemble de valeurs (déterminées par un agencement initial) qui représentent les changements de coûts entraînés par le déplacement d'un

poste de travail vers un emplacement adjacent.

Il choisit la valeur maximale de la table des mouvements et étudie le déplacement du poste de travail  $i$  correspondant à cette valeur vers l'emplacement indiqué, sinon il étudie d'autres déplacements adjacents et réalise le déplacement entraînant une réduction du coût. S'il n'obtient pas d'amélioration en déplaçant le poste de travail  $i$  vers l'un des emplacements adjacents, il choisit la seconde valeur maximale de la table et il répète la procédure.

L'algorithme ne tient compte que des permutations par paire entre des postes de travail adjacents et ne traite que des problèmes où les postes de travail occupent des surfaces identiques.

Dans les cas de construction comme dans ceux d'amélioration, l'agencement nécessite les données suivantes : les postes de travail, leur surface, leur diagramme des relations et leurs flux.

Le diagramme des relations est constitué d'une matrice qualitative que l'on peut convertir en matrice quantitative en associant des valeurs numériques à une échelle qualitative A, P, O, I, D et N dont un exemple est donné tableau 2.1.

Le flux peut être défini par :

- le nombre de mouvements par unité de temps,
- le nombre de chargements par unité de temps,
- le poids des éléments par unité de temps,
- le volume des éléments par unité de temps.

Valeur	Proximité	Taux de base
A	Absolument nécessaire	> 50 transports/u.t
P	Particulièrement importante	> 40-49 «
O	Ordinaire bonne	> 30-39 «
I	peu Importante	> 20-29 «
D	peu Désirable	> 10-19 «
N	Non désirable	> 0- 9 «

(u.t : unité de temps)

**Tableau 2.1** : Exemple d'échelle qualitative.

D'autres logiciels d'agencement, moins connus, sont présentés à l'annexe B.

## **2.5) Conclusion.**

Après cet examen des formulations mathématiques et des techniques de résolution qu'ils entraînent ainsi que des logiciels déjà existants, nous pouvons dégager quelques caractéristiques d'ensemble concernant la modélisation, la conception ou la restructuration des agencements.

### **2.5.1) Les modèles mathématiques proposés.**

Ils apparaissent souvent peu adaptés à la complexité du problème, si certains intègrent les notions de proximité, de distance ou de flux, ils ne prennent pas en compte les contraintes liées à l'environnement (par exemple aux types de transport). De plus, la plupart travaillent sur des sites prédéterminés, ce qui réduit notablement le champ des possibilités pour l'introduction de contraintes supplémentaires.

### **2.5.2) Les logiciels.**

Le formalisme mathématique utilisé pour la résolution des



modèles n'est pas systématiquement appliqué aux logiciels, car il n'aboutit pas toujours à des résultats de grande qualité (il nécessite la mise en oeuvre d'une puissance de calcul considérable, limite le nombre de postes de travail pouvant être assignés (cf. «Branch and Bound» [Lav 85])). Par conséquent les logiciels tentent de générer un agencement final au fonctionnement aussi efficace qu'économique, indépendamment des modèles et régi en partie par des principes pragmatiques.

De ce fait, ils se caractérisent par une part variable selon les logiciels considérés, mais non négligeable, de hasard (ALDEP). Heuristiques, ils ne peuvent que rarement engendrer des solutions optimales dans toutes les situations. La qualité du résultat obtenu se trouve par ailleurs grandement influencée par la formulation des données que l'analyste détermine et entre dans son programme (CRAFT). Ceci signifie qu'un même logiciel donnera des solutions différentes pour un même agencement initial s'il est géré par des personnes distinctes effectuant des choix non identiques. D'où la référence fréquemment rencontrée dans la littérature quant à l'expérience de l'analyste dont on comprend mieux l'importance ! Lorsque de surcroît, pour traiter un même agencement, on recourt à plusieurs méthodes, on imagine aisément l'éventail des solutions possibles et la différence de qualité pouvant exister de l'une à l'autre.

En outre ces logiciels exigent souvent une mémoire et un temps de calcul élevés (algorithme d'Hillier révisé) pour un agencement relativement limité en ce qui concerne le nombre de postes de travail maximal pouvant être assignés.

Pour contourner ces difficultés, nous disposons actuellement d'un ensemble d'outils mieux à même de faire face à l'ensemble des situations englobant des caractéristiques très variées,

rencontrées dans la pratique industrielle.

Ainsi, le recours à un problème multi-critères plus complet que ceux précédemment utilisés du fait des nouvelles techniques de recherche opérationnelle, dont le recuit simulé, associées aux progrès de la micro-informatique, nous permet la gestion de caractéristiques négligées jusqu'alors, c'est-à-dire celles des moyens de transport, des chevauchements, des pénalisations de proximité, de l'orientation des postes de travail (selon plusieurs critères énoncés ultérieurement) en un temps de calcul relativement rapide et sans encombrer la mémoire.

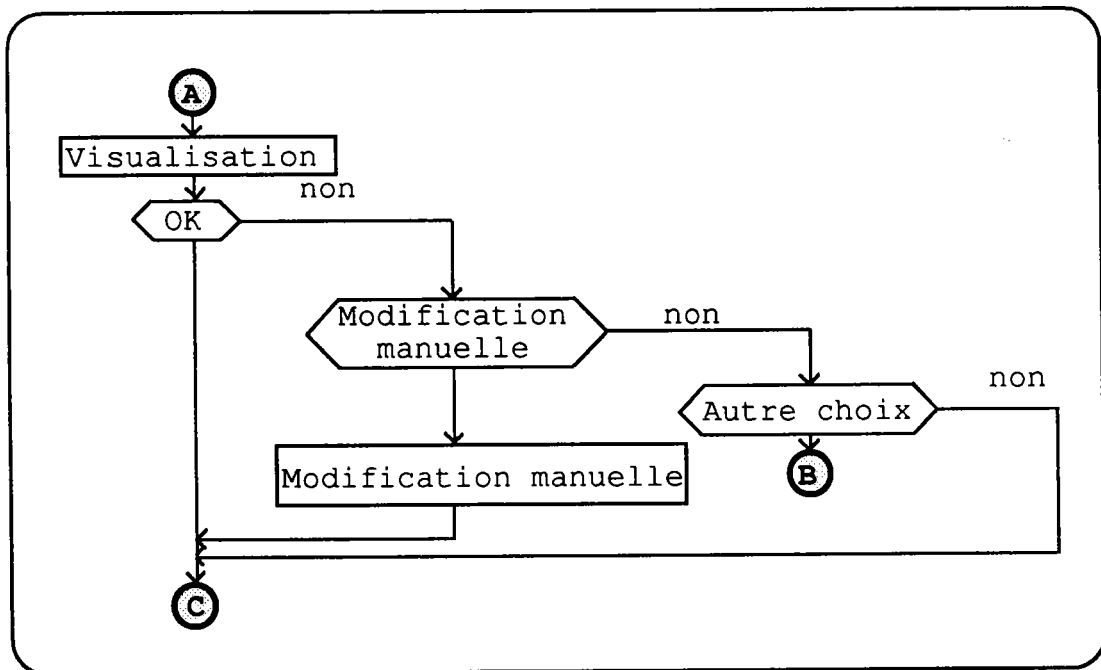
Dans le même but les apports de la Technologie de Groupe (T.G.) nous offrent la possibilité, par l'utilisation du concept de coalescence, de diviser les problèmes de grande taille en plusieurs sous-problèmes plus facilement résolubles, car plus petits.

**CHAPITRE III**  
**NOUVELLE APPROCHE DE**  
**L'AGENCEMENT**

### III) Nouvelle approche de l'agencement.

#### 3.1) Méthodologie générale.

La méthodologie que nous avons développée s'applique plus particulièrement au cas des entreprises fabriquant une grande variété de produits, en petites et moyennes séries répétitives sur des postes de travail. Afin d'organiser la fabrication et en particulier de déterminer un cheminement simple des produits, nous effectuons, à un premier niveau, une analyse en technologie de groupe [Mut 89]. Ce niveau détermine des familles de produits qui utilisent des méthodes de fabrication similaires. Nous regrouperons alors les postes de travail de façon à minimiser les trajets inter-îlots [Anc 88].



**Figure 3.1** : Algorithme de visualisation-modification.

A un second niveau, objet de cette étude, nous recherchons un ou plusieurs agencements optimaux des postes de travail minimisant

les trajets des produits à l'intérieur de chaque îlot. A un troisième niveau, nous agençons les îlots si cela est nécessaire. La figure 3.2 représente la méthodologie générale de l'approche étudiée, tandis que la figure 3.3 montre son déroulement.

**Remarque** : La figure 3.1 représente l'algorithme de visualisation-modification utilisé dans la méthodologie générale (figure 3.2).

### **3.2) Objectifs fixés.**

En plus des objectifs développés au chapitre "état de l'art" (coût de manutention minimum, flexibilité maximale et mobilité maximale), nous nous sommes fixé l'objectif suivant :

- **coût d'installation minimum** : lors de l'élaboration d'un nouvel agencement, il est souhaitable que les coûts d'installation (déplacement, sécurité et nuisance des postes de travail) soient rendus minimum.

### **3.3) Définition des caractéristiques du problème d'agencement.**

Le logiciel d'aide à l'agencement doit permettre de déterminer un ensemble de solutions admissibles des postes de travail dans un espace à deux dimensions (atelier-machines par exemple), ou à trois dimensions (voir annexe A : agencement des magasins de stockage de produits).

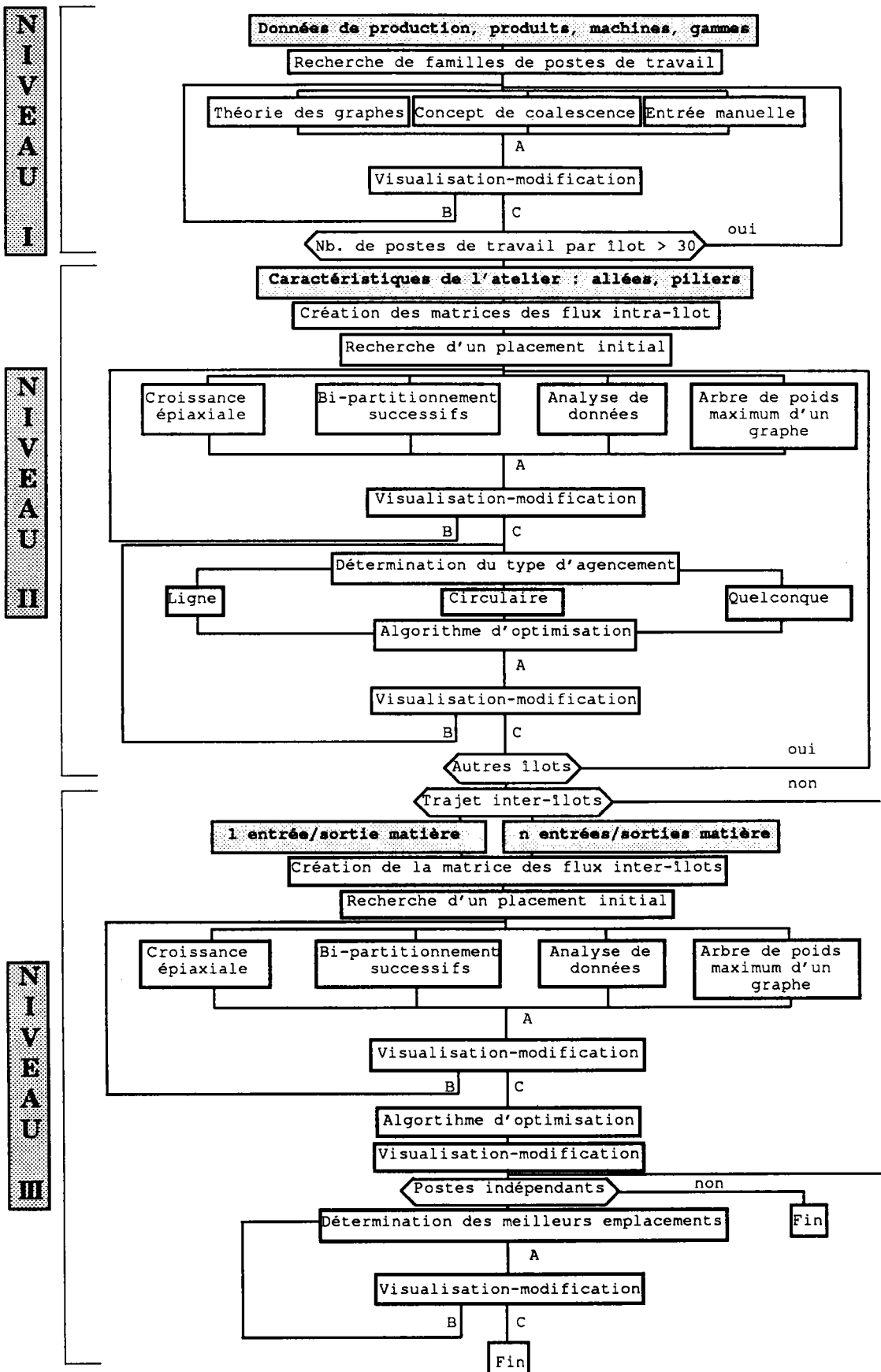
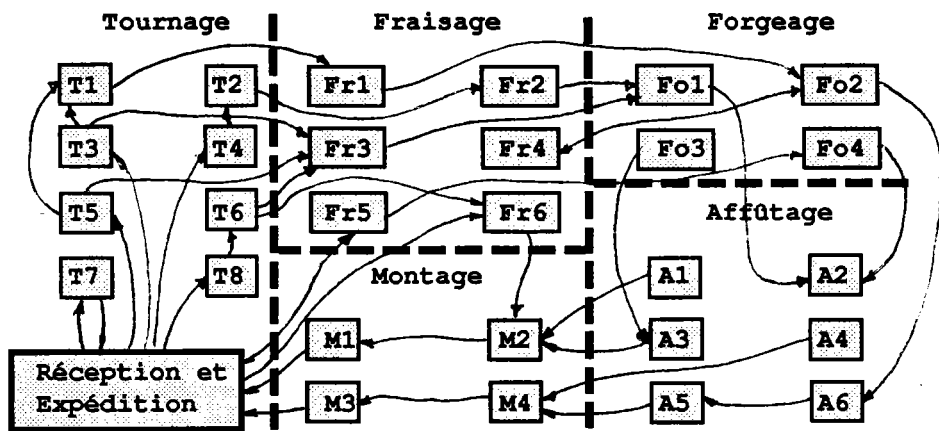
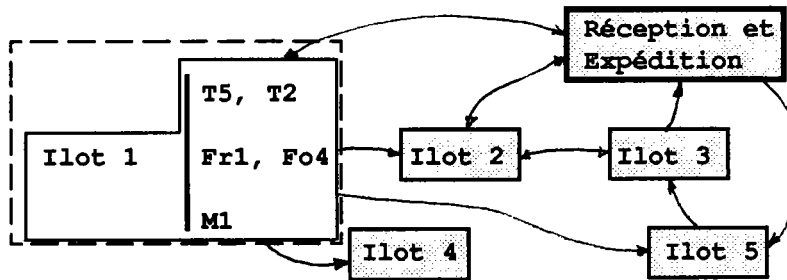


Figure 3.2 : Structure de la méthodologie d'agencement.



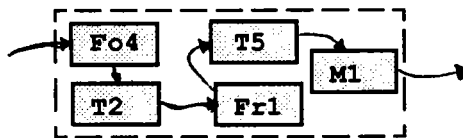
Circulation des pièces dans un atelier implanté en section homogène (x postes de travail; coût C1).

Figure 3.3a : Atelier initial.



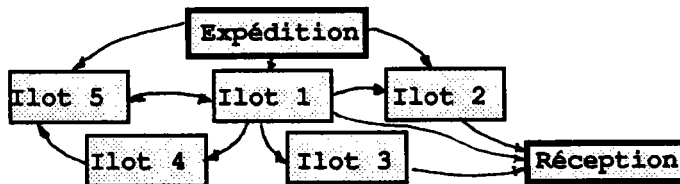
Après implantation de la T.G (y postes de travail [y<x]; coût C2 [C2<C1]).

Figure 3.3b : Recherche d'îlots.



Après agencement des postes de travail de l'îlot 1 (z postes de travail [z<y], coût Cz).

Figure 3.3c : Agencement intra-îlot.



Après agencement des îlots (coût C3<C2).

Figure 3.3d : Agencement inter-îlots.

Figure 3.3 : Evolution de l'approche proposée.

Dans la suite de l'étude nous ne présentons que l'agencement des postes de travail. Cet ensemble de solutions admissibles doit tenir compte du flux de transfert des produits entre postes de travail, et de contraintes du type : moyens de transport, proximité entre postes, etc.... De plus, il est le résultat de la minimisation d'une fonction objectif comprenant deux critères antagonistes :

- **coût de manutention minimum** (critère quantitatif),
- **nuisance de proximité minimum** (critère qualitatif).

L'objectif à atteindre étant un compromis entre ces deux critères, il est nécessaire de définir les données, les contraintes, les paramètres et les inconnues qui vont caractériser le problème d'agencement, en vue de sa formulation mathématique.

### **3.3.1) Les données.**

Les données sont de deux types.

#### **a) Données de production.**

Elles comprennent :

- **la liste des produits avec leur nomenclature et leurs gammes,**
- **la liste des postes de travail,**
- **la liste des moyens de transport possibles.**

Les deux premières listes servent à définir la matrice des flux entre les postes de travail. Celle-ci n'est pas symétrique et ses éléments diagonaux sont nuls. Quant à la troisième



liste, en relation avec la matrice des flux, elle permet de choisir au mieux le moyen de transport reliant deux postes de travail.

### **b) Données d'infrastructure.**

Nous entendons par données d'infrastructure, toutes les caractéristiques géométriques de l'atelier et des postes de travail. Nous avons sélectionné les plus importantes.

#### **1) Sur l'atelier.**

- l'enveloppe extérieure,
- les dimensions,
- la position des allées, des piliers, des arrivées d'énergie, etc...,
- l'entrée et la sortie de la matière.

#### **2) Sur les postes de travail.**

- l'enveloppe extérieure,
- les dimensions,
- l'entrée et la sortie de la matière,
- la position de l'opérateur,
- l'arrivée d'énergie.

#### **3.3.2) Les contraintes.**

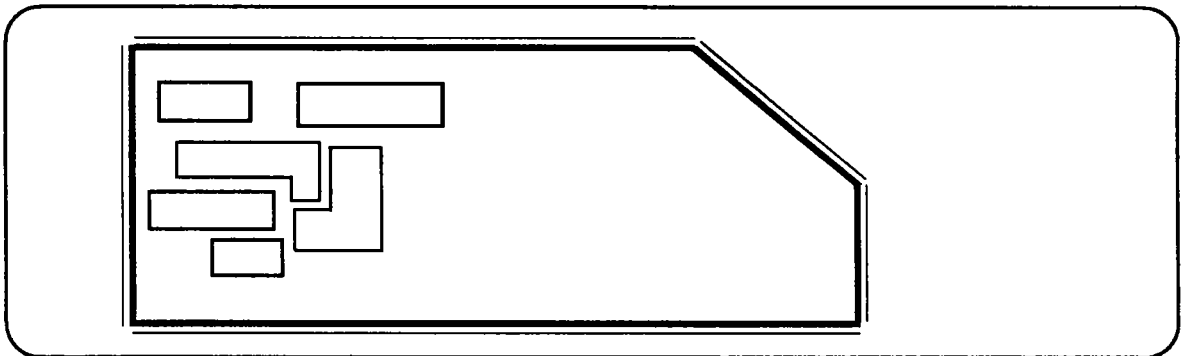
Elles ont pour effet d'introduire des limitations dans la recherche d'une solution optimale. Elles sont du genre :

**a) Contrainte sur l'implantation des postes de travail.**

Dans un atelier de production, il arrive que l'on se heurte à l'impossibilité de déplacer certains postes de travail, qui demeureront donc fixes (par exemple : une fonderie).

**b) Contrainte sur la place disponible.**

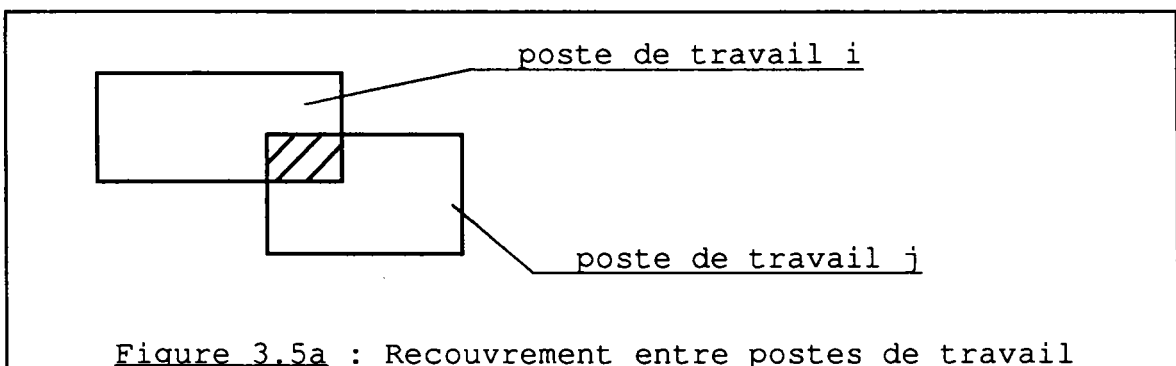
Une réorganisation d'un atelier avec les concepts de technologie de groupe engendre généralement une diminution des postes de travail. Par conséquent, la surface au plancher est supérieure à la superficie totale requise par les postes de travail restants que l'on a intérêt, pour minimiser les coûts de manutention, à regrouper au maximum (figure 3.4).



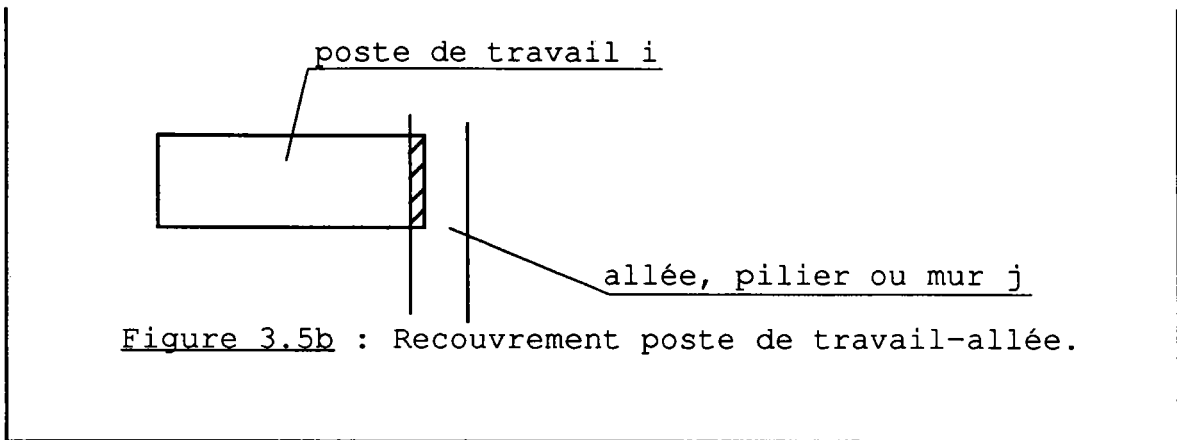
**Figure 3.4** : Regroupement des postes de travail.

**c) Contrainte de chevauchement.**

Il est évident que dans la solution finale, il ne doit pas y avoir de recouvrement entre les postes de travail (figure 3.5).



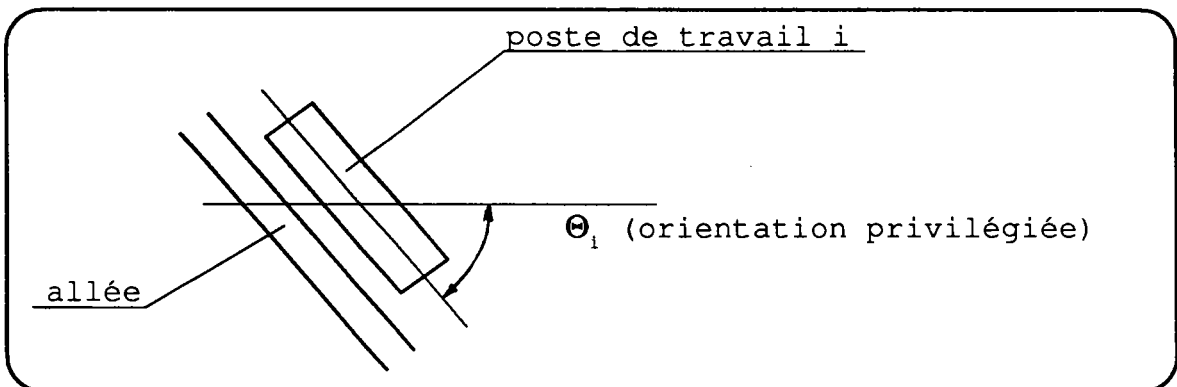
**Figure 3.5a** : Recouvrement entre postes de travail



**Figure 3.5** : Solutions finales à proscrire.

#### **d) Contrainte sur l'orientation des postes de travail.**

Pour des raisons techniques, d'environnement, de sécurité etc..., on peut définir une orientation privilégiée des postes de travail (figure 3.6).



**Figure 3.6** : Orientation privilégiée par rapport à une allée.

#### **e) Contraintes logistiques.**

Lorsque l'atelier existe déjà, certaines contraintes extérieures telles que tuyauterie de fluide (air comprimé,...), outillage,..., peuvent influencer l'agencement final. On peut alors être également amené à éviter des croisements, à imposer un sens de parcours, etc..., aux moyens de transport (figure 3.7).

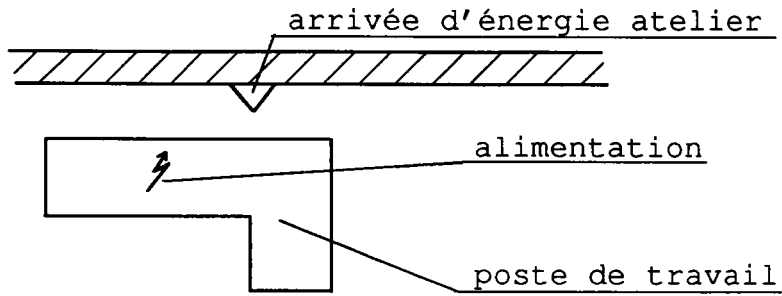


Figure 3.7a : Contrainte logistique arrivée d'énergie.

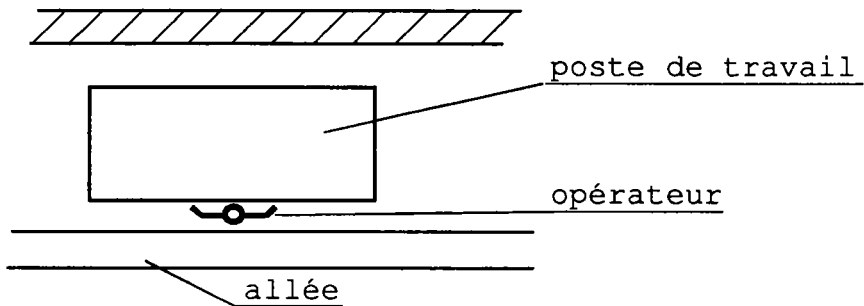


Figure 3.7b : Contrainte logistique position opérateur.

Figure 3.7 : Exemples de contraintes logistiques.

### 3.3.3) Les paramètres.

Ils comprennent la liste des pénalisations de proximité entre les postes de travail. Pour des raisons techniques, de sécurité, d'environnement, etc..., on définit des pénalisations de façon qualitative sur une échelle à trois valeurs :

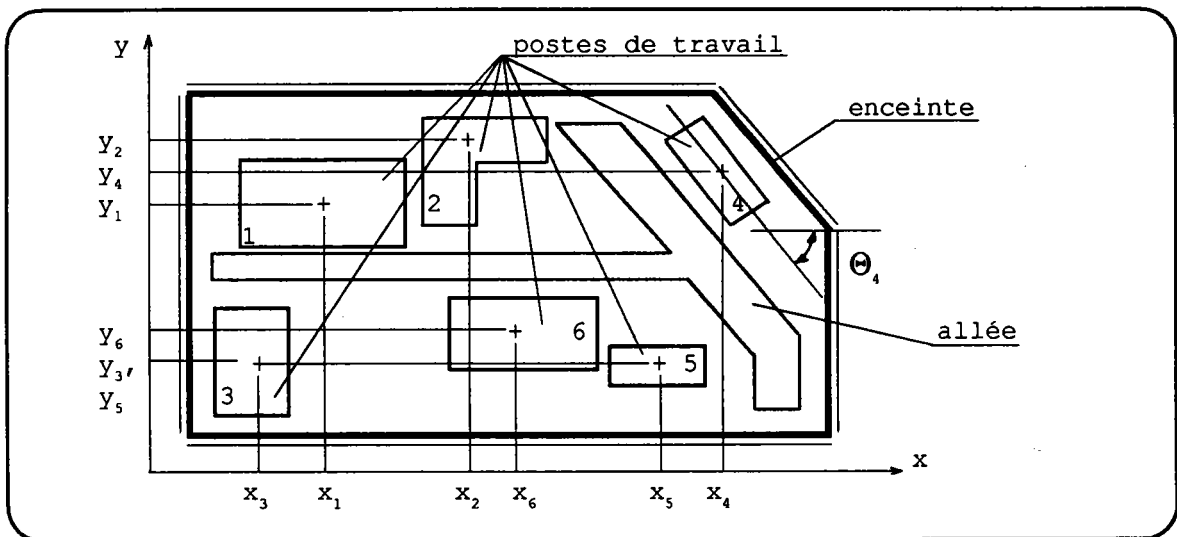
- **A** : proximité **A**bsolument nécessaire entre les postes de travail,
- **O** : proximité **O**rdinaire bonne entre les postes de travail,
- **N** : proximité **N**on désirable entre les postes de travail.

Cette liste nous permet d'établir une matrice symétrique des proximités entre les postes de travail.

### 3.3.4) Les inconnues.

Ce sont les positions des postes de travail dans l'atelier ainsi que leurs orientations (figure 3.8).

Le tableau 3.1 résume les problèmes d'étude d'agencement en termes d'optimisation de systèmes complexes.



**Figure 3.8** : Solution finale.

### 3.4) Détermination de la fonction critère.

Jusqu'alors, les travaux réalisés dans la modélisation d'un atelier de production, en vue d'obtenir un agencement optimal, ne tenaient compte en général, (comme nous l'avons constaté au chapitre "état de l'art") que des données quantitatives (flux de produits d'un poste de travail à l'autre) et de données qualitatives (proximité). Mais tous ces modèles mathématiques négligent l'infrastructure de l'atelier et des postes de travail. Il nous a donc semblé indispensable de définir un modèle, le plus complet possible, tout

en recherchant un compromis entre la complexité de la modélisation d'un tel atelier et le temps de calcul en résultant.

Problème d'optimisation	Problème d'agencement d'ateliers
Fonction objectif	Grandeurs caractéristiques : - distance entre les postes de travail, - flux de matière, - pénalisation de proximité, - moyen de transport.
Contraintes	- emplacements de certains postes de travail imposés (fonderie, mesure,...) - zones de l'atelier interdites (allées, piliers, aires de stockage), - chevauchements des postes de travail interdits, - formes et dimensions de l'atelier et des postes de travail imposées.
Degrés de liberté du problème	Emplacement de tous les postes de travail et chemin de tous les moyens de transport.
Configuration du système.	Schéma d'implantation de l'atelier.

**Tableau 3.1** : Description du problème d'agencement dans les termes d'un problème d'optimisation.

### **3.4.1) Définition du problème.**

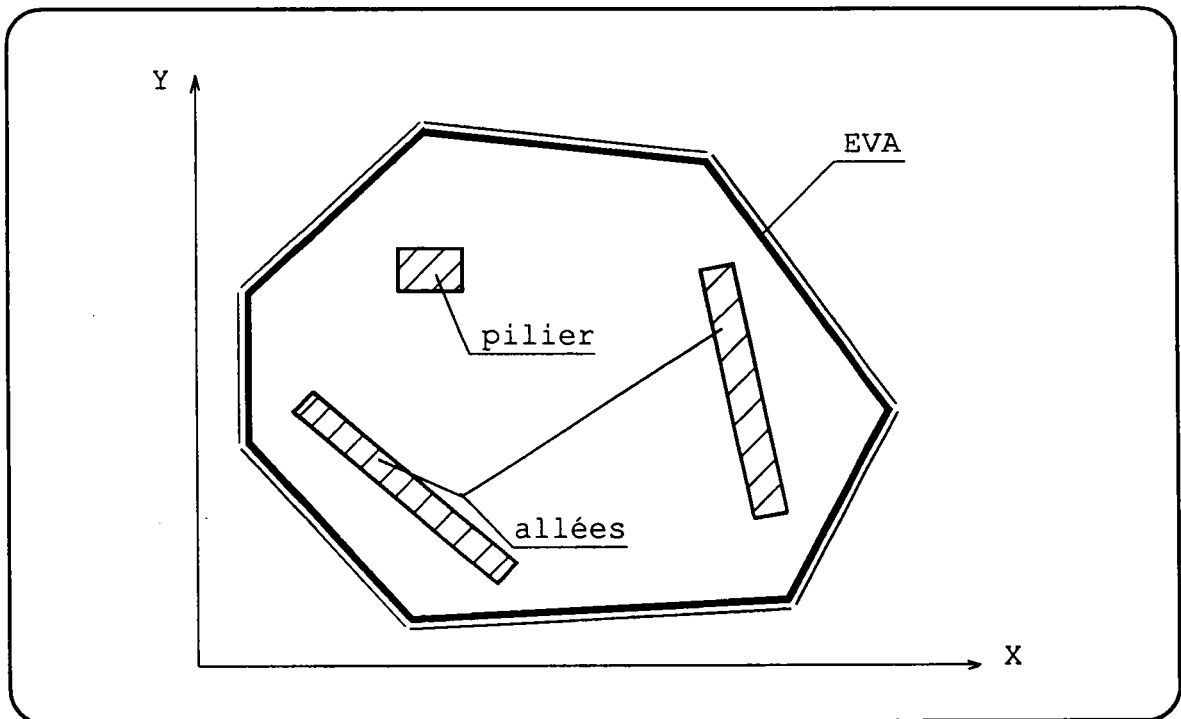
Considérons un atelier de forme quelconque (figure 3.9) défini par :

- une enveloppe extérieure (EVA),
- une surface (S),
- un ensemble de piliers, d'allées, schématisé par un ensemble de postes de travail fictifs intérieurs, noté

$f$  (les surfaces définies par ces postes de travail seront interdites aux postes de travail réels).

et un nombre  $m$  de postes de travail réels (figure 3.10) défini par :

- une enveloppe extérieure ( $EVM_1$ ),
- un centre de gravité ( $xG_1, yG_1$ ),
- une orientation ( $\Theta_1$ ) par rapport à une direction principale  $Z$ ,
- une entrée matière ( $u_{ie}, v_{ie}$ ),
- une sortie matière ( $u_{is}, v_{is}$ ),
- une arrivée d'énergie ( $u_{ia}, v_{ia}$ ),
- une position de l'opérateur ( $u_{io}, v_{io}$ ).



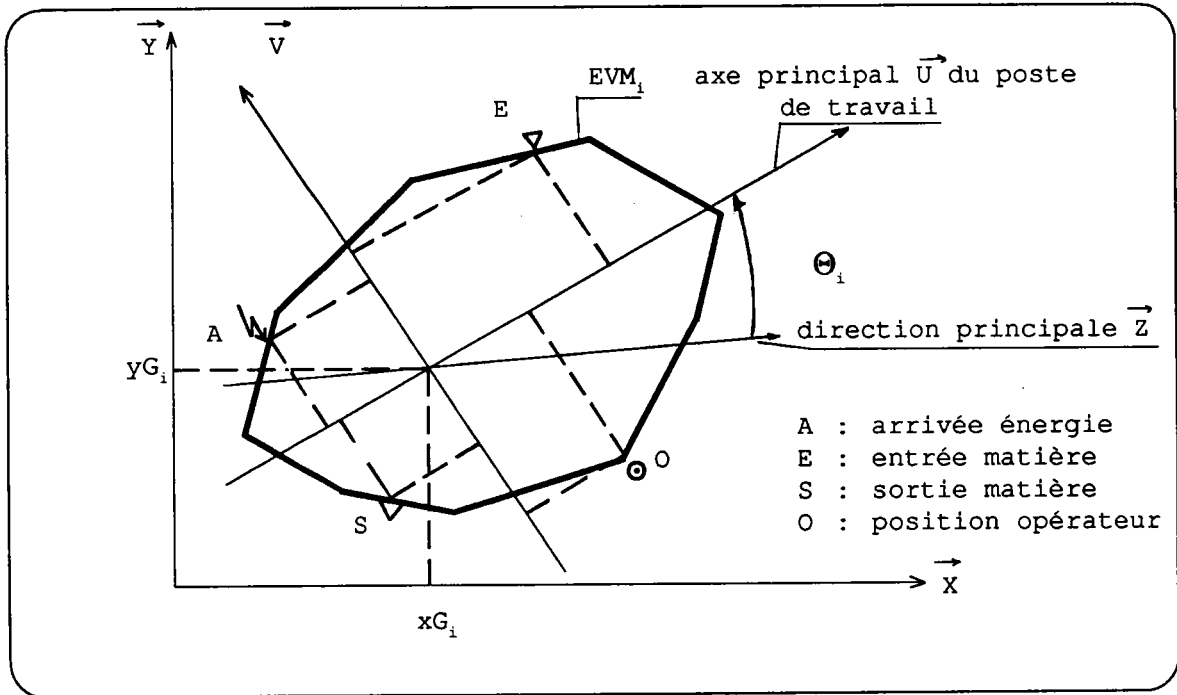
**Figure 3.9** : Modélisation d'un atelier.

De plus, on définit une matrice de rotation du repère poste

de travail/atelier :

$$\begin{array}{c} X \\ Y \end{array} \left| \begin{array}{cc} U & V \\ \cos\Theta_i & -\sin\Theta_i \\ \sin\Theta_i & \cos\Theta_i \end{array} \right|$$

$$\Rightarrow u\vec{U} + v\vec{V} = (u.\cos\Theta_i - v.\sin\Theta_i)\vec{X} + (u.\sin\Theta_i + v.\cos\Theta_i)\vec{Y}$$



**Figure 3.10** : Modélisation d'un poste de travail.

### 3.4.2) Modélisation du problème.

Le problème se ramène à la recherche d'un ensemble M de m triplets de solutions de la forme :

$$M = \{(xG_i, yG_i, \Theta_i)\}$$

où pour tout i l'on connaît la position des points caractéristiques du poste de travail i en X et Y pour  $\Theta_i$  quelconque, c'est-à-dire :  $G_i, E_i, A_i, O_i$ .

Avant de déterminer la fonction objectif, nous allons



définir un certain nombre de grandeurs caractéristiques, indispensables à la modélisation du problème.

a) Définition de distances caractéristiques.

1) Ecart minimal.

On définit une distance (écart) minimale entre les centres de gravité des postes de travail  $i$  et  $j$ , notée  $D_{ij}^1$ , lorsque les postes de travail sont tournés au mieux (figure 3.11.a). Cette distance ne dépend que de  $(xG_i, yG_i)$ ,  $(xG_j, yG_j)$  en ignorant les orientations  $\Theta_i$ ,  $\Theta_j$ .

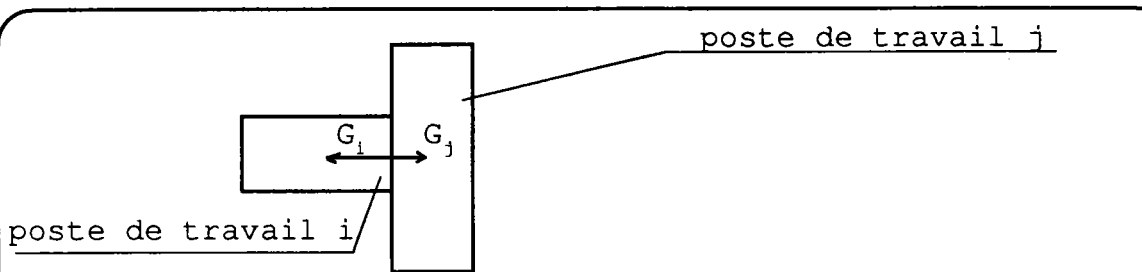


Figure 3.11.a : Ecart minimal entre deux postes de travail.

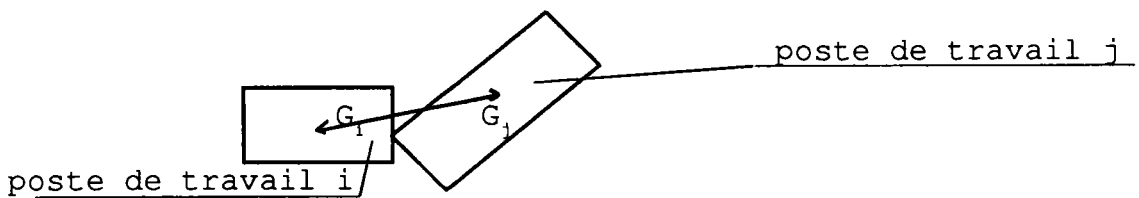


Figure 3.11.b : Ecart maximal entre deux postes de travail.

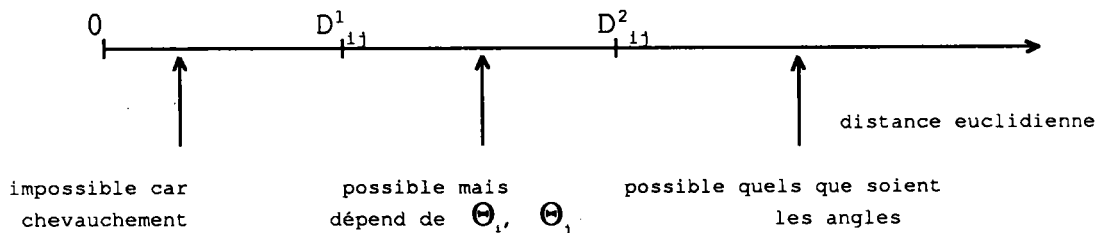


Figure 3.11.c : Echelle de chevauchement des postes de travail.

**Figure 3.11** : Détermination de l'échelle de chevauchement.

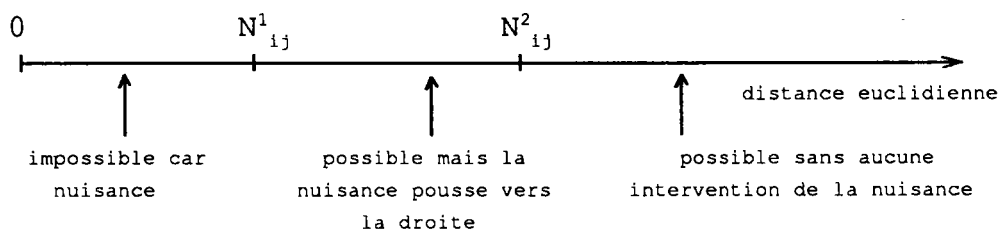
**2) Ecart maximal.**

On définit une distance (écart) maximale, où les deux postes de travail ont encore un point commun noté  $D^2_{ij}$  (figure 3.11.b). Cette distance dépend de  $(xG_i, yG_i, \Theta_i)$ ,  $(xG_j, yG_j, \Theta_j)$ .

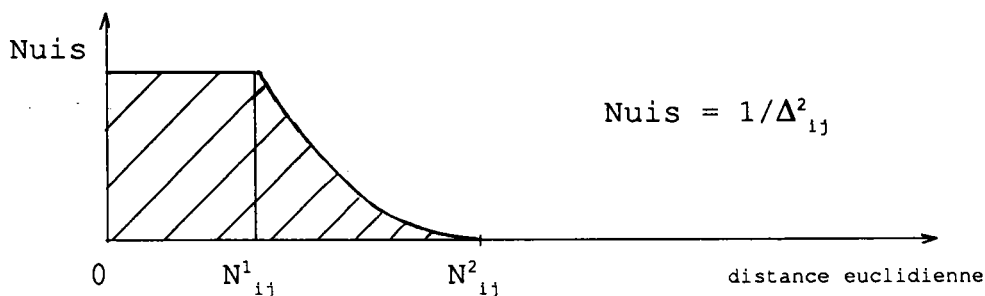
Ces deux distances (écarts) nous permettent de tracer une échelle de chevauchement des postes de travail deux à deux (figure 3.11.c). Ces distances seront des distances euclidiennes entre les centres de gravité des postes de travail  $i$  et  $j$  notées  $\Delta_{ij}$ .

**3) Echelle de nuisance.**

De la même manière nous définissons un seuil de nuisance  $N^1_{ij}$  et un seuil de non nuisance  $N^2_{ij}$ . Ces deux seuils dépendent des distances euclidiennes entre les centres de gravité des postes de travail et nous permettent de tracer une échelle des nuisances (figure 3.12).



**Figure 3.12.a :** Echelle des nuisances des postes de travail.



**Figure 3.12.b :** Représentation de l'évolution de la nuisance en fonction de la distance euclidienne.

**Figure 3.12 :** Détermination de l'échelle de nuisance.

**b) Détermination des moyens de transport.**

Soient :

- $k$  un moyen de transport appartenant à la liste des moyens de transport  $K$ ,
- $e_k$  le coût unitaire de déplacement du moyen de transport  $k$ .

On définit une valeur binaire  $w_{ijk}$  telle que :

$$w_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'on utilise le moyen de transport} \\ & k \text{ pour le transport de } i \text{ à } j; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Deux cas peuvent se présenter :

- si les  $w$  sont connus, alors ils doivent vérifier la relation

$$\left. \begin{array}{l} \forall i, j \\ i <> j \\ f_{ij} <> 0 \end{array} \right\} \implies \sum_{k=1}^K w_{ijk} = 1 \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, m$$

avec  $f_{ij}$  : flux de produit du poste de travail  $i$  au poste de travail  $j$ .

- si les  $k$  sont inconnus, alors ils doivent apparaître dans la formulation mathématique sous la forme de contrainte du type :

- $k$  est une fonction de (distance, charge, encombrement)

tel que :

$$\sum_{k=1}^K w_{ijk} = 1 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \forall i, j=1, 2, \dots, m \\ i <> j \\ f_{ij} <> 0 \end{array} \right.$$

**c) Détermination de la contrainte de chevauchement.**

Définissons un paramètre supplémentaire  $ch$ , représentant le chevauchement. Ce paramètre est défini comme une valeur binaire  $ch_{ij}$  telle que :

$$ch_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si chevauchement des postes de} \\ & \text{travail } i \text{ et } j; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

**d) Détermination de la distance reliant deux postes de travail.**

On définit une distance reliant deux postes de travail  $i$  et  $j$  notée  $d_{ijk}$ , où  $k$  représente le moyen de transport. Celui-ci nous permet de déterminer le choix du calcul de la distance (circulaire, euclidienne, city-bloc (figure 3.13)).

**e) Détermination des contraintes de proximité maximales.**

Deux contraintes de proximité maximales peuvent être définies. L'une permet d'imposer que l'opérateur soit le plus près possible d'une allée, elle sera notée  $O_{ij}$ , où  $i$  représente un poste de travail réel et  $j$  un poste de travail fictif (allée). L'autre indique que la position d'arrivée d'énergie d'un poste de travail  $i$  doit être proche d'une alimentation de l'atelier (cas de machines spéciales fonctionnant à l'air comprimé par exemple). Cette distance sera notée  $A_{ij}$ .

La contrainte  $O_{ij}$  est une distance city-bloc tandis que  $A_{ij}$  est euclidienne. Ces deux distances doivent être les plus courtes possibles, voire nulles.

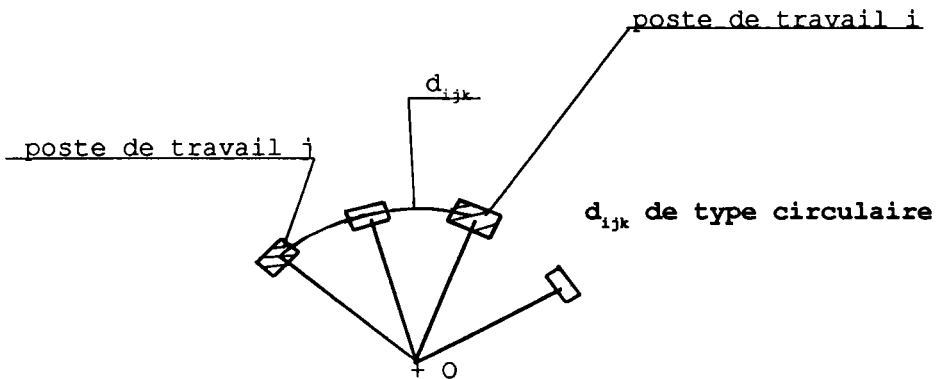


Figure 3.13.a : Cas d'un robot desservant un ensemble de postes de travail disposés en cercle.

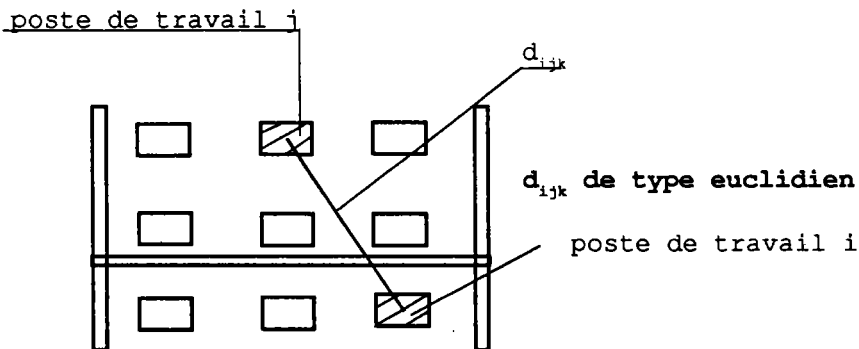


Figure 3.13 b : Cas d'un robot portique.

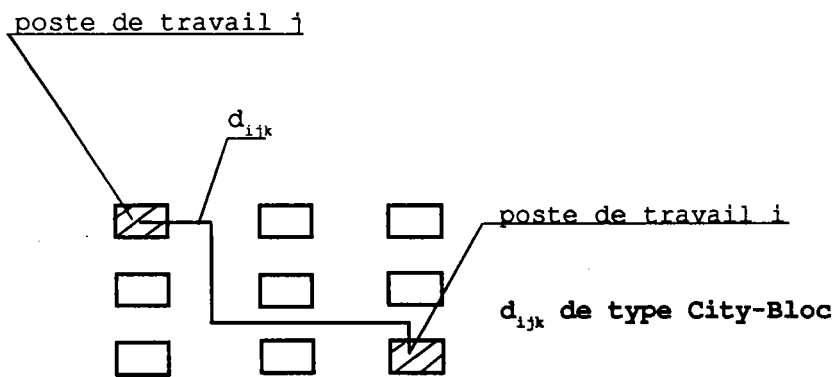


Figure 3.13.c : Cas d'un moyen de transport filoguidé.

**Figure 3.13** : Différents types de calcul de distance en fonction du moyen de transport.

**3.4.3) Formulation mathématique.**

**a) Contraintes :**

- écartement minimal des centres de gravité :

$$\Delta_{ij}(\mathbf{E}) > \max(D_{ij}^1, N_{ij}^1) \quad \forall i, j=1, 2, \dots, n; 1, 2, \dots, p$$

(i, j postes de travail réels ou fictifs intérieurs)

- chevauchement interdit :

$$ch_{ij}(\mathbf{E}) = 0 \quad \forall i, j=1, 2, \dots, n; 1, 2, \dots, p$$

(i, j postes de travail réels ou fictifs, inutile si les postes de travail sont des cercles).

- proximité maximale :

$$O_{ij}(\mathbf{E}) = \min(d_{ij}) \quad \forall i, j=1, 2, \dots, n; 1, 2, \dots, p$$

$$A_{ij}(\mathbf{E}) = \min(\Delta_{ij}) \quad \forall i, j=1, 2, \dots, n; 1, 2, \dots, p$$

(i poste de travail réel, j poste de travail fictif).

**b) Fonction objectif.**

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^K f_{ij} \cdot e_k \cdot w_{ijk} \cdot d_{ijk}(\mathbf{E}) + P_{ij} \cdot \text{Nuis}_{ij}(\mathbf{E}) \right]$$

Diagram annotations:

- $f_{ij}$ : sans dimension
- $e_k$ : sans dimension
- $w_{ijk}$ : facteur de pondération de la nuisance
- $d_{ijk}(\mathbf{E})$ : déplacement
- $P_{ij}$ : sans dimension
- $\text{Nuis}_{ij}(\mathbf{E})$ : sans dimension

Units for terms:

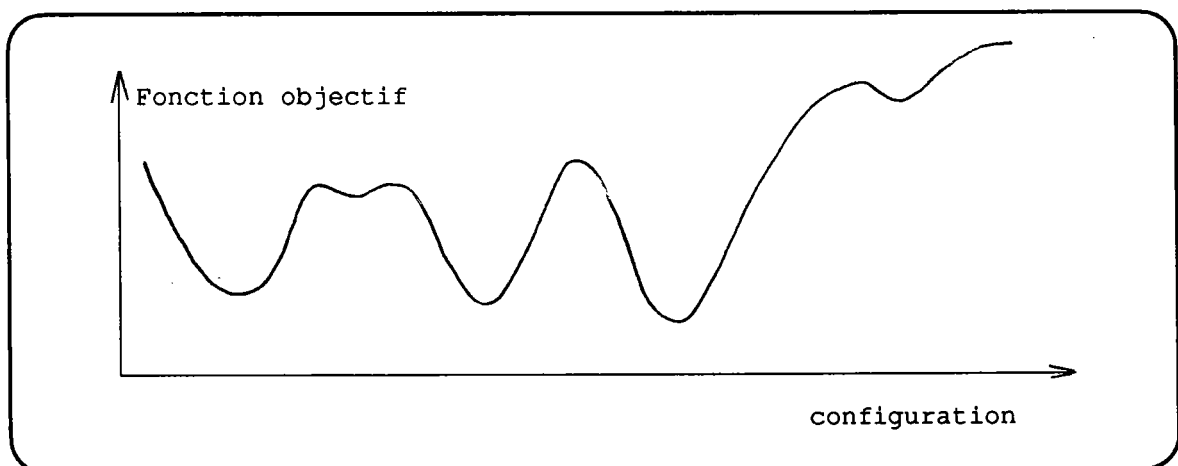
- $\sum_{i=1}^n$ : coût/horizon
- $\sum_{j=1}^n$ : flux de produits/horizon
- $\sum_{k=1}^K$ : coût/produit.unité de déplacement
- Overall  $C$ : coût/horizon

**3.4.4) Méthode de résolution.**

Une telle fonction présente en général un très grand nombre de minima locaux (typiquement de l'ordre de  $\exp(N)$ , si l'on désigne par N le nombre de degrés de liberté du problème); son allure en

fonction d'un paramètre caractéristique de la configuration peut être celle de la figure 3.14.

Lorsque l'espace de toutes les configurations possibles présente une structure aussi complexe, il peut être difficile de trouver le minimum global. On démontre que la recherche du minimum absolu est un problème N.P-complet (N.P signifiant "non déterministic polynomial-time"), ce qui implique que la résolution n'est pas possible en un temps polynomial à  $N^n$  ( $n$  désignant un entier indépendant de  $N$ ). Comme nous l'avons vu précédemment, l'objectif n'est pas de trouver le minimum absolu, mais seulement un ensemble de solutions admissibles et l'assurance qu'il n'en existe pas de sensiblement meilleures. Pour atteindre ce but au bout d'un temps de calcul raisonnable, il est intéressant de recourir à des méthodes stochastiques, c'est-à-dire à des méthodes qui, face à l'impossibilité d'explorer la totalité des configurations du système, permettent d'évoluer vers une solution en envisageant un nombre limité de configurations dont le choix est guidé en partie par le hasard.



**Figure 3.14** : Allure de la fonction objectif d'un problème complexe en fonction de la configuration du système.

C'est pour ces diverses raisons que notre choix s'est porté sur la méthode du recuit simulé, dont l'algorithme est [Kir 83] :

```

1 : Fixer la «température» T à une valeur élevée
2 : Définir une configuration de départ  $C_a$  d'énergie  $W_a$ 
3 : Répéter
  - pour T donné, tant que  $n < x.N$  ou  $m < y.N$ ,
    31 : Générer aléatoirement une configuration voisine  $C_v$  d'énergie  $W_v$  de la configuration actuelle  $C_a$ .
    32 : Poser  $W = W_v - W_a$ 
    33 : Tirer au hasard un nombre R compris dans l'intervalle [0,1].
    34 : Accepter  $C_v$  comme nouvelle configuration actuelle suivant la condition :
      -  $C_a \leftarrow C_v$  si  $W > 0$ ,
      -  $C_a \leftarrow C_v$  si  $W < 0$  et  $\exp(W/T) > R$ ,
  - fin,
  - baisser T d'un pas jusqu'à T proche de 0.
4 : Fin.

```

avec :

- $n$  : nombre d'acceptations pour un palier de température,
- $m$  : nombre de refus pour un palier de température.

Pour les besoins de cet algorithme, nous avons pénalisé la fonction objectif  $C$ , de telle sorte que la contrainte de chevauchement soit incorporée dans la nouvelle fonction coût  $Z$  :

$$Z = C + M.C_0.S$$

avec :

- $M$  : facteur de pénalisation.



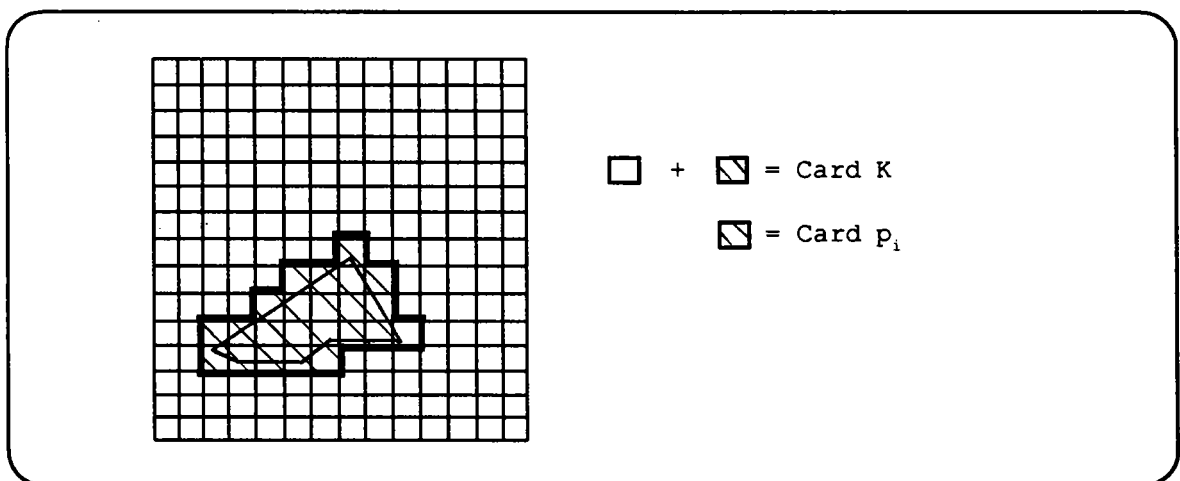
- $C_0$  : coût initial de la fonction coût  $C$ ,
- $S$  : surface de recouvrement.

### **3.5) Méthode d'évaluation de la fonction coût.**

La méthode de résolution du problème d'agencement formulé en QAP, nous contraint à un nombre de calculs relativement importants. Par conséquent, nous avons été amenés à développer plusieurs algorithmes spécifiques permettant d'accélérer les calculs, donc de diminuer le temps de résolution d'un problème.

#### **3.5.1 Discrétisation du plancher de l'atelier.**

Le QAP du problème d'agencement, défini en continu, impose une infinité de solutions potentielles. Pour en réduire le nombre, nous avons discrétisé l'atelier de production par l'adjonction d'un ensemble  $K$  d'emplacements rectangulaires recouvrant au mieux la surface au plancher de l'atelier. Ainsi un poste de travail (réel ou fictif) sera caractérisé par un sous-ensemble  $p$  de  $K$  (figure 3.15) tel que :



**Figure 3.15** : Discretisation de l'atelier sous forme d'un maillage.

$$\sum_{i=1}^n \text{Card}(p_i) = \text{Card}(K)$$

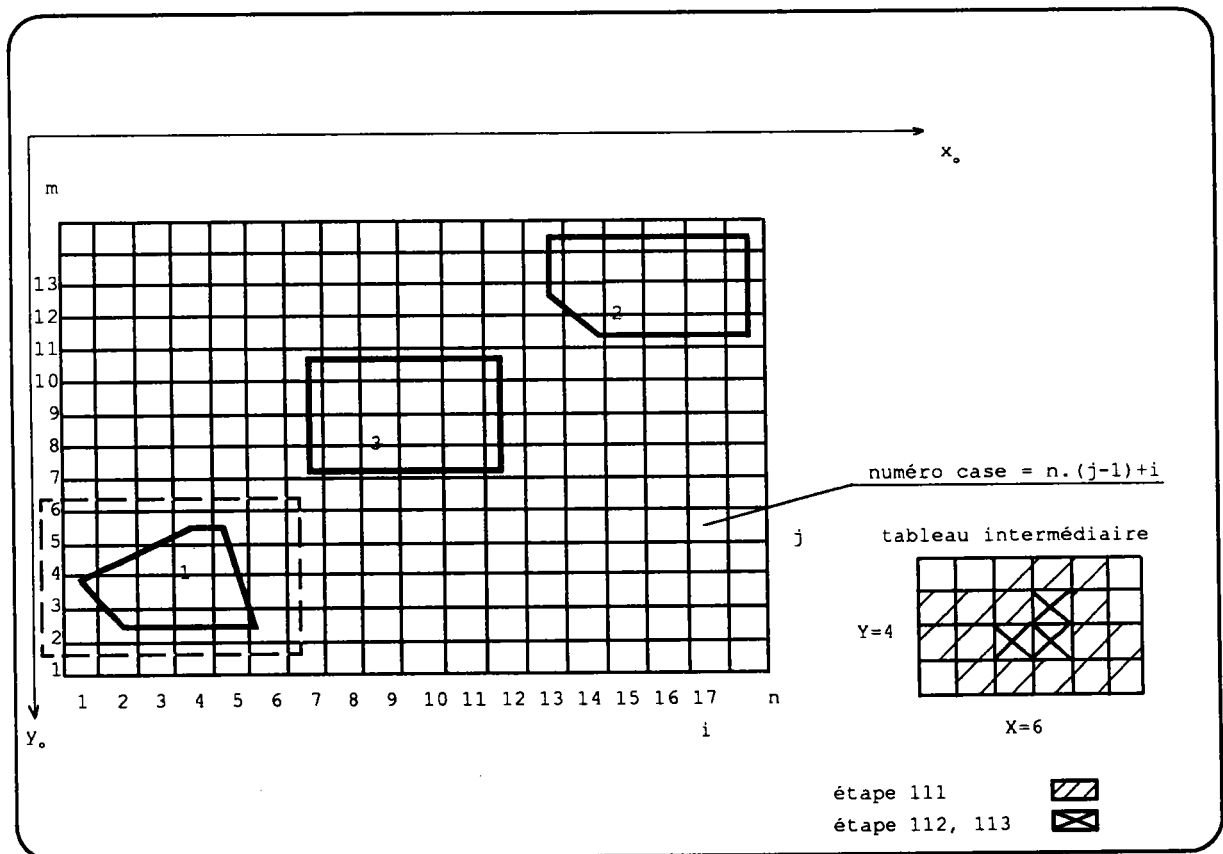
$$p_i \neq p_j \quad \forall i, j=1, 2, \dots, n$$

$$\forall i, j=1, 2, \dots, n$$

**3.5.2) Détermination et remise à jour des recouvrements.**

**a) Introduction.**

Nous modélisons chaque poste de travail  $i$  par une succession de rectangles-unité dont nous connaissons a priori le numéro, ce qui nous permet, d'une part de calculer le nombre d'unités de recouvrement, et de l'autre de déterminer rapidement les sous-ensembles  $p_i$  des postes de travail. Ceux-ci doivent vérifier les propriétés suivantes :



**Figure 3.16** : Partitionnement de l'ensemble  $K$  en  $n$  sous-ensembles  $p_i$ .

**1** :  $p_i$  différent ( $\neq$ ) de  $p_j$

- l'enveloppe de chaque poste de travail peut être quelconque,
- pour tout  $i$ ,  $p_i \in K$ .

### **b) Algorithme de détermination des recouvrements.**

Soit  $n$  postes de travail répartis sur l'ensemble  $K$

(figure 3.16) :

- 1 : Pour chaque poste de travail  $i$ , il faut :
  - 11 : Déterminer la dimension  $T_i[j,k]$  d'un tableau intermédiaire, correspondant au nombre de mailles suivant  $x_0, y_0$  du poste de travail  $i$  (ex : poste de travail n°1 :  $T_1[1...6, 1...4]$ ) puis mise à zéro de ce tableau.
    - 111 : Déterminer par un suivi de contour les cases appartenant au poste de travail  $i$  et mise à 1 des valeurs correspondantes dans  $T_i$ .
    - 112 : Mettre à 1 les valeurs de  $T_i$ , des cases se trouvant à l'intérieur de l'enveloppe définie en 111 (balayage suivant  $x_0$ ).
    - 113 : Idem à 112 avec balayage suivant  $y_0$ .
    - 114 : Déterminer, à partir des valeurs non nulles de  $T_i$ , le sous-ensemble  $p_i$ , appartenant au poste de travail  $i$  et le stocker dans une liste dynamique.
- 2 : Balayer les numéros des cases occupées par les postes de travail et déterminer le nombre d'unités de recouvrement.
- 3 : Fin procédure.

### **c) Algorithme de remise à jour des recouvrements.**

Soient la liste dynamique  $L_d$  créée par l'algorithme de détermination de recouvrement, et un poste de travail  $i$  à mouvoir (tourner ou translater) :

- 1 : Pour le poste de travail  $i$ , il faut :
  - 11 : Détruire toutes les références relatives au poste de travail  $i$ .
  - 12 : Si le mouvement est une translation, effectuer

- l'étape 114 de l'algorithme de détermination, sinon effectuer l'étape 11 de l'algorithme de détermination.
- 2 : Balayer les numéros des cases occupées par les postes de travail et déterminer le nombre d'unités de recouvrement.
- 3 : Fin procédure.

#### **d) Intérêts de ces deux algorithmes.**

L'algorithme de détermination des recouvrements nous permet de calculer uniquement les numéros des cases de l'ensemble  $K$  occupées par les postes de travail. De plus, les  $n$  sous-ensembles  $p_i$  ne sont définis simultanément qu'une seule fois grâce à l'utilisation de l'algorithme de remise à jour des recouvrements qui permet de détruire toutes les informations relatives au poste de travail  $i$  et de les régénérer après un mouvement élémentaire. Deux cas peuvent alors se présenter :

- **1er cas** : si le mouvement est une translation, il est inutile de recalculer toutes les informations relatives au tableau intermédiaire  $T_i[j,k]$ , car un simple changement de repère suffit.
- **2ème cas** : si le mouvement est une rotation, il est alors nécessaire de redéterminer les caractéristiques du tableau intermédiaire  $T_i[j,k]$ .

**Remarque 1** : Lors d'un mouvement de translation, le déplacement, quelle qu'en soit la direction, se fait d'un nombre entier de mailles suivant

les axes  $x_0$ ,  $y_0$ , comme nous l'expliciterons ultérieurement.

**Remarque 2** : Dans l'algorithme de détermination des recouvrements, lors du remplissage à 1 des valeurs de  $T_1$ , nous distinguons deux étapes (112 et 113) identiques mais l'une balaie suivant l'axe  $x_0$  et l'autre suivant l'axe  $y_0$ . Nous avons été amenés à les développer car il est primordial de bien remplir l'enveloppe (définie à l'étape 111), tâche d'autant plus délicate que la forme des postes de travail peut se révéler complexe.

### **3.5.3) Stratégie de déplacement.**

#### **a) Introduction.**

Lorsque l'algorithme du recuit simulé choisit un mouvement de translation, il s'avère nécessaire de déterminer la direction du déplacement du poste de travail. Cette direction pourrait être définie aléatoirement, mais la rapidité de convergence de l'algorithme du recuit simulé s'en trouverait affectée et à la fin du traitement, il est fortement probable que des postes de travail se superposeraient. Nous avons donc défini une stratégie de déplacement permettant d'accélérer la convergence de l'algorithme du recuit simulé par un choix approprié des directions de déplacement.

#### **b) Algorithme de stratégie de déplacement.**

Soient un poste de travail  $i$  à traduire, la liste

dynamique des recouvrements  $L_d$  et les tableaux intermédiaires  $T$ , l'algorithme consiste à :

- 1 : Balayer  $L_d$  pour déterminer si  $i$  possède des unités de recouvrement ( $ur_i$ ).
- 2 : Si  $ur_i=0$ 
  - déterminer le centre de gravité  $G$  des postes de travail excepté le poste de travail  $i$ ,
  - déterminer la droite de déplacement reliant  $G$  au centre de gravité  $g$  du poste de travail  $i$ ,
  - déplacer  $i$  suivant cette droite de manière à diminuer l'écart ( $g, G$ ).
- Sinon,
  - déterminer le poste de travail  $j$  ayant le plus d'unités de recouvrement avec  $i$ ,
  - découper  $T_i$  et  $T_j$  en quatre zones,
  - déterminer la (les) zone(s) commune(s) à  $T_i$  et  $T_j$
  - déplacer  $i$  de manière à diminuer les recouvrements.
- 3 : Fin procédure.

### **c) Intérêt de l'algorithme.**

L'algorithme de stratégie de déplacement permet de traiter tous les cas possibles que l'on peut regrouper en deux familles.

#### **1) Absence de recouvrement ( $ur_i=0$ ).**

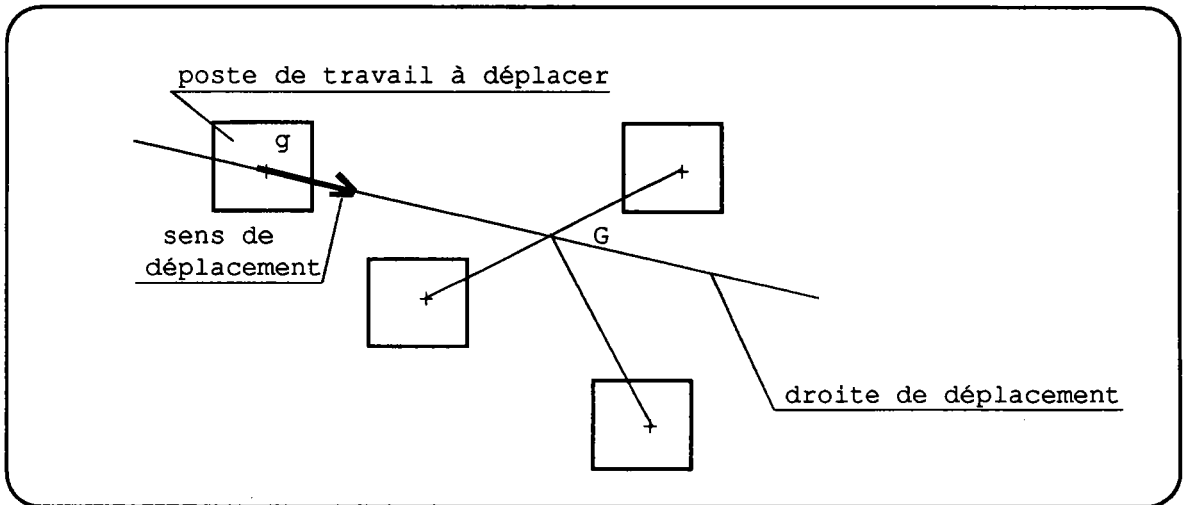
On détermine une droite et un sens de déplacement (figure 3.17).

#### **2) Recouvrements ( $ur_i \leq 0$ ).**

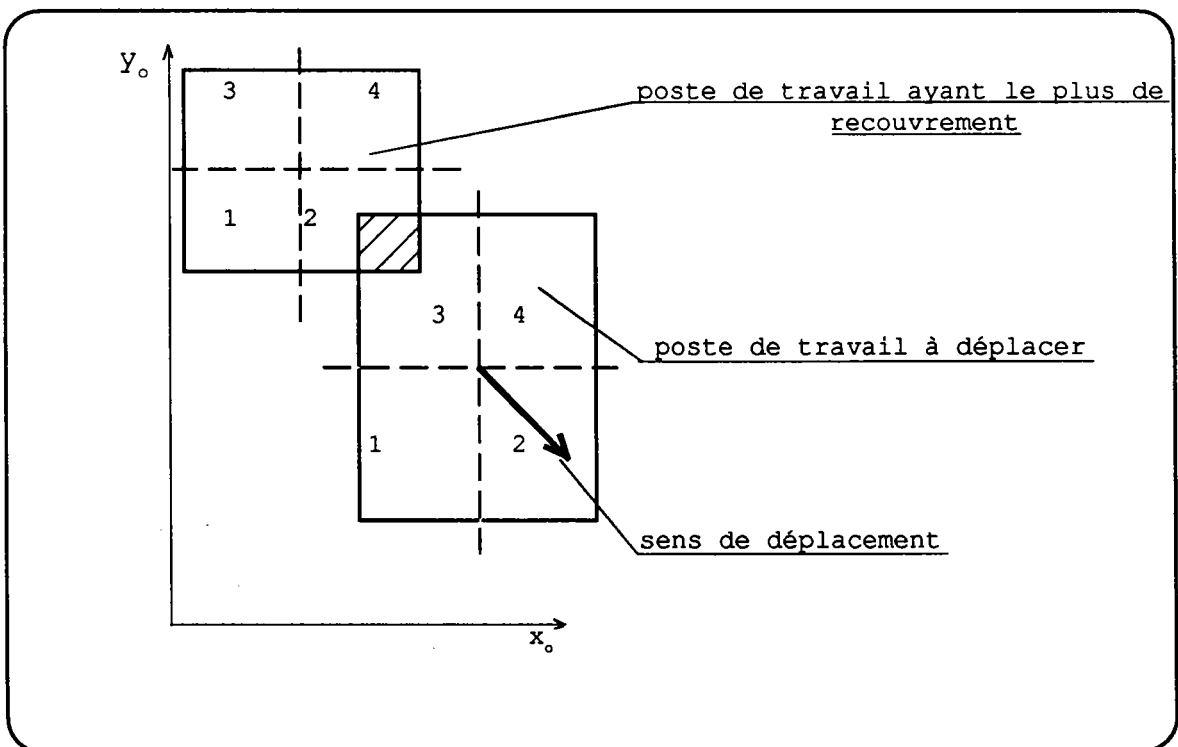
Plusieurs cas peuvent se présenter. Ceux-ci sont résumés dans le tableau 3.2 et un exemple en est présenté (figure 3.18).

**Remarque** : Quelle que soit la stratégie de déplacement

utilisée (avec ou sans recouvrement), le nombre de cases de déplacement suivant les axes  $x_0$  et  $y_0$  est toujours un entier, afin de ne pas recalculer les tableaux intermédiaires T.



**Figure 3.17** : Stratégie de déplacement sans recouvrement.



**Figure 3.18** : Exemple de stratégie de déplacement avec recouvrement.

figure 3.18

zone de recouvrement				deplac <sup>t</sup>		sens
1	2	3	4	xo	yo	
0	0	0	1	-1	-1	↙
0	0	1	0	+1	-1	↘
0	1	0	0	-1	+1	↖
1	0	0	0	+1	+1	↗
0	0	1	1	0	-1	↓
0	1	0	1	-1	0	←
1	1	0	0	0	+1	↑
1	0	1	0	+1	0	→
1	1	0	1	+1	-1	↘
1	0	1	1	-1	+1	↖
1	1	1	0	-1	-1	↙
0	1	1	1	+1	+1	↗

**Tableau 3.2** : Stratégie de déplacement suivant les zones de recouvrement.

**3.5.4) Détermination et remise à jour de la matrice des distances.**

**a) Introduction.**

Puisque l'algorithme du recuit simulé perturbe continuellement l'agencement des postes de travail, il s'avère nécessaire de déterminer la matrice des distances initiales entre ceux-ci et de ne remettre à jour que les valeurs correspondant au(x) poste(s) de travail déplacé(s) (par permutation, translation ou rotation).

**b) Algorithme de détermination de la matrice des distances.**

Soient les centres de gravité G, l'entrée E et la sortie S des postes de travail :

- 1 : Pour chaque poste de travail i faire :
  - 11 : Pour tous postes de travail j <> i faire :
    - 111 : Si emplacements déterminés faire :
      - $d_{ij} = xoG_i - xoG_j + yoG_i - yoG_j$ ,



			$- d_{ji} = d_{ij},$ Sinon faire : $- d_{ij} = xoE_i - xoS_j + yoE_i - yoS_j,$ $- d_{ji} = xoE_j - xoS_i + yoE_j - yoS_i,$
--	--	--	---

2 : Fin procédure.

### c) Algorithme de remise à jour de la matrice des distances.

Soient la matrice des distances  $M_0$  et le poste de travail  $i$  à déplacer (tourner, translater) ou les postes de travail  $i$  et  $j$  à permuter :

	1 : Si sites prédéterminés, il faut :
	11 : Calculer pour tous postes de travail $k \neq i$ et $j$
	$- d_{ik} = xoG_i - xoG_k + yoG_i - yoG_k,$ $- d_{jk} = xoG_j - xoG_k + yoG_j - yoG_k,$ $- d_{ij} = xoG_i - xoG_j + yoG_i - yoG_j,$ $- d_{ki} = d_{ik}; d_{kj} = d_{jk}; d_{ji} = d_{ij},$
	Sinon,
	11 : Calculer pour tous postes de travail $k \neq i$
	$- d_{ik} = xoE_i - xoS_k + yoE_i - yoS_k,$ $- d_{ki} = xoS_i - xoE_k + yoS_i - yoE_k,$

2 : Fin procédure.

### d) Intérêt de l'algorithme.

Cet algorithme de remise à jour de la matrice des distances permet de calculer  $4n$  valeurs au lieu de  $n^2$  ( $n$  : nombre total de postes de travail).

## 3.6) Etude expérimentale de la technique d'optimisation.

Pour déterminer l'ensemble des agencements admissibles nous avons procédé de la manière suivante :

- déterminer des postes de travail définis par:
  - \* une forme carrée,

- \* la position du centre de gravité,
- faire un déplacement initial,
- appliquer l'algorithme du «recuit simulé», sur sites prédéterminés, en permutant les centres de gravité des postes de travail et en ignorant les recouvrements,
- appliquer l'algorithme du «recuit simulé» sur les postes de travail réels, en les translatant et en les tournant de manière à supprimer les recouvrements.

Dans ce qui suit, nous analysons quantitativement l'effet de la configuration initiale sur la vitesse de convergence de l'algorithme du recuit simulé sur sites prédéterminés par l'étude de la température initiale. Pour ce faire, nous étudions un problème test, où les postes de travail sont reliés exclusivement par des flux, le critère d'optimisation choisi étant :

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} \cdot d_{ij}(E)$$

avec  $d_{ij}$  : distance city-bloc du poste de travail  $i$   
au poste de travail  $j$ .

De plus, en choisissant convenablement les liens entre les postes de travail, nous connaissons a priori les minima globaux du problème, ce qui facilite l'étude de la convergence de l'algorithme.

### **3.6.1) Placement des postes de travail sur des sites prédéterminés.**

Nous avons étudié tout d'abord un ensemble de 20 postes de

travail à placer sur des sites prédéterminés, qui sont les noeuds d'un réseau carré plan. La liste des liens est telle que, dans la configuration optimale, chaque poste de travail est relié seulement à ses proches voisins.

La décroissance de la température est effectuée selon la loi :

$$T_{(k+1)} = D \cdot T_k$$

avec : D de l'ordre de 0,9 ([Kir 83], [Rom 84], [Jep 83]).

Avant de nous intéresser au comportement du système à partir de situations initiales différentes, nous présentons l'algorithme du recuit simulé sur sites prédéterminés.

### **a) Algorithme du recuit simulé sur sites prédéterminés.**

#### **1) Introduction.**

Etant donné un placement initial quelconque I, d'énergie CI, on dira que F (configuration finale d'énergie CF) est une bonne configuration si F vérifie les propriétés suivantes :

- **quelle que soit la configuration F, CF doit être inférieure à CI,**
- **pour tout couple (i, j) de postes de travail, i est placé à côté de j si le flux  $f_{ij} < 0$ .**

Quelle que soit la configuration initiale du réseau plan carré, il existe quatre configurations finales vérifiant les propriétés précédentes. Ces solutions sont les symétries par

rapport aux axes  $x_0$  et  $y_0$ .

## 2) Algorithme du recuit simulé.

Soient la configuration initiale I et la matrice

des flux :

- (1) 1 : Exécuter l'algorithme de détermination de la matrice des distances.
- (2) 2 : Déterminer la température initiale  $T_i$ .
- (3) 21 : Tant que  $k < 10.n$  :
- (4) 211 : Déterminer au hasard deux postes de travail i et j.
- (5) 212 : Perturber i et j (i sur l'emplacement de j et j sur celui de i).
- (6) 213 : Exécuter l'algorithme de remise à jour de la matrice des distances.
- (7) 214 : Calculer le coût  $C_k$  correspondant.
- (8) 215 :  $k \leftarrow k + 1$ .
- (9) 216 : Revenir à la configuration initiale.
- (10) 217 : Exécuter l'algorithme de remise à jour de la matrice des distances.
- (11) 22 : Calculer l'écart quadratique moyen.
 
$$\nabla(c) = T_i = \left[ \frac{\sum (C_k)^2}{n} - (C_k)^2 \right]$$
- (12) 3 : Déterminer les paramètres du recuit simulé (nombre d'acceptations (Na), de refus (Nr), décroissance maximum de la température (D) et température minimum ( $T_{min}$ )).
- (13) 4 : Répéter :
- (14) Si  $(n > Na)$  ou  $(m > Nb)$  faire : (test 1)
- (15) -  $T_{(k+1)} \leftarrow D_k \cdot T_k$
- (16) si  $T_{(k+1)} > T_{min}$  (test 11)
- (17) | -  $n \leftarrow 0$  ;  $m \leftarrow 0$  ;  $T_k \leftarrow T_{(k+1)}$ ,
- (18) | - charger la meilleure configuration obtenue  $F_k$
- (19) sinon,
- (20) | aller en 5.
- (21) Sinon,
- (22) | - déterminer au hasard deux postes de travail i et j,
- (23) | - permuter i et j (nouvelle configuration  $F_{(k+1)}$ ),
- (24) | - exécuter l'algorithme de remise à jour de la matrice des distances,
- (25) | - calculer le coût  $C_{(k+1)}$ ,
- (26) | - si  $C_{(k+1)} \leq C_k$  faire : (test 12)
- (27) | | - si  $F_{(k+1)} \neq F_k$  faire : (test 121)
- (28) | | | -  $F_k \leftarrow F_{(k+1)}$ ,
- (29) | | | -  $n \leftarrow n+1$ ,
- (30) | | | - aller en 4,
- (31) | | - sinon,

```

(32) | | | | - permuter i et j,
(33) | | | | - exécuter l'algorithme de remise à jour
      | | | | de la matrice des distances,
(34) | | | | - aller en 4,
(35) | | | | sinon,
(36) | | | | - calculer  $A = \exp [-(C_{(k+1)} - C_k)/T_k]$ ,
(37) | | | | - tirer au hasard un nombre R compris dans
      | | | | l'intervalle [0, 1],
(38) | | | | - si  $R \leq A$  faire : (test 122)
(39) | | | | | -  $F_k \leftarrow F_{(k+1)}$ ,
(40) | | | | | -  $n \leftarrow n+1$ ,
(41) | | | | | - aller en 4,
(42) | | | | sinon,
(43) | | | | | - permuter i et j,
(44) | | | | | - exécuter l'algorithme de remise à jour
      | | | | | de la matrice des distances,
(45) | | | | | - aller en 4.
(46) | 5 : Fin procédure.

```

### **3) Description de l'algorithme.**

Dans un premier temps nous déterminons la matrice des distances et la température initiale  $T_1$ . Celle-ci est définie de manière aléatoire à partir de la configuration initiale, par le tirage de  $l$  configurations ( $l$  est pris de l'ordre de  $n*10$ , où  $n$  représente le nombre de postes de travail). Cette procédure permet de déterminer  $T_1$  suffisamment élevée pour que, à l'issue du premier palier, toutes les configurations du système puissent être obtenues avec la même probabilité et pour éviter que le processus d'optimisation ne soit piégé dans un minimum local.

Puis, nous entrons les paramètres de l'algorithme du recuit simulé (étape 3). Ceux-ci permettent de déterminer la durée des paliers de température, la vitesse de décroissance de celle-ci et le critère d'arrêt de l'algorithme.

L'étape 4 est l'algorithme du recuit simulé adapté à l'agencement des postes de travail. Le test n°1 permet de savoir si la durée du palier de température est atteinte. Dans ce cas nous abaissons la température du système et nous testons si le

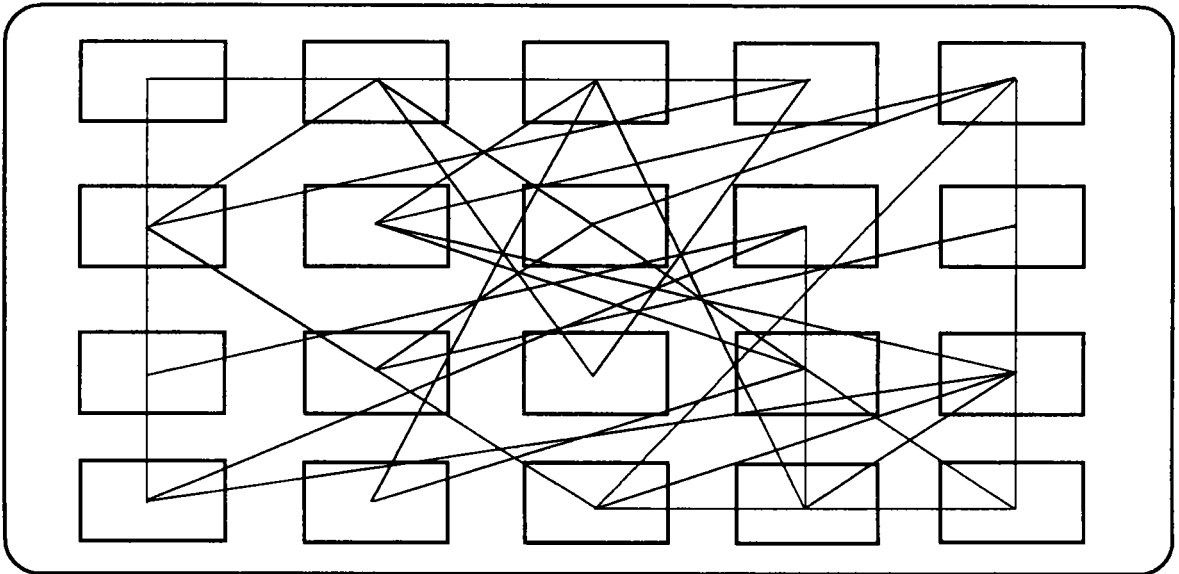
minimum de la température est atteint (test 11); s'il l'est nous arrêtons la procédure, s'il ne l'est pas nous réinitialisons les variables (durée du palier) et nous chargeons la meilleure configuration obtenue par le processus d'optimisation. Si la durée du palier de température n'est pas atteinte (test 1), nous cherchons aléatoirement deux postes de travail à permuter. Si le coût de la nouvelle configuration est inférieur au coût précédent (test 12), alors nous regardons si cette nouvelle configuration n'a pas déjà été trouvée (test 121), si c'est le cas elle devient la configuration courante et la durée du palier d'acceptation augmente d'une unité, sinon nous la rejetons. Si le coût de la configuration obtenue est inférieur au coût précédent (test 12), nous déterminons l'exponentielle de Boltzman ( $A$ ), tirons un nombre aléatoire  $R$  compris entre 0 et 1 et testons (test 122) si ce nombre est inférieur ou égal à  $A$ . S'il l'est, alors la nouvelle configuration  $F_{(k+1)}$  devient la configuration courante malgré que son coût soit supérieur, sinon nous la rejetons et la durée du palier de refus augmente d'une unité.

### **3.6.2) Influence de la configuration initiale sur la convergence.**

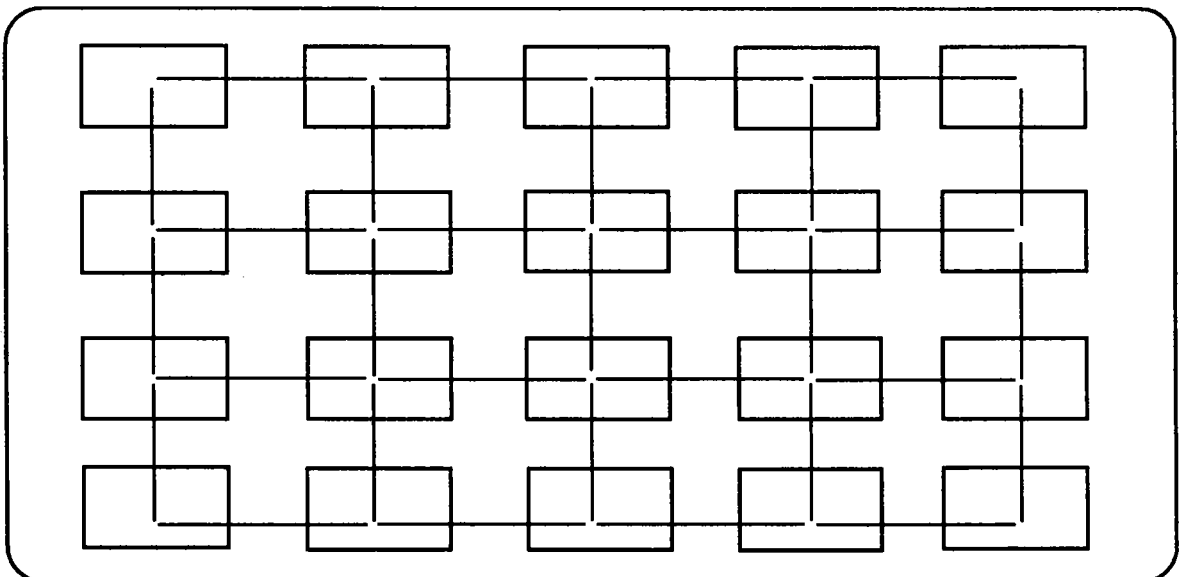
Le point de départ de l'algorithme est un état désordonné généré aléatoirement (figure 3.19).

Cet état est déterminé, pour les besoins de l'expérience de l'algorithme, à partir de la configuration optimale du réseau carré plan (figure 3.20), où l'on a effectué  $n$  permutations aléatoires des postes de travail. Pour déterminer l'influence de la configuration initiale sur la convergence de l'algorithme, nous avons fait décroître  $n$  de manière à passer d'un état complètement désordonné à un état partiellement ordonné et nous en avons extrait les données suivantes :

- nombre de permutations ( $n$ ),
- température initiale ( $T_i$ ),
- coût de la configuration initiale ( $C_i$ ),
- coût de la configuration finale ( $C_f$ ),
- température finale ( $T_f$ ),
- pourcentage température initiale sur coût initial ( $\%T_i$ ).



**Figure 3.19** : Exemple de configuration désordonnée.



**Figure 3.20** : Configuration optimale.

Le tableau 3.3 résume l'ensemble des résultats obtenus statistiquement par l'étude de 20 configurations différentes pour chaque nombre de permutations ( $n$ ).

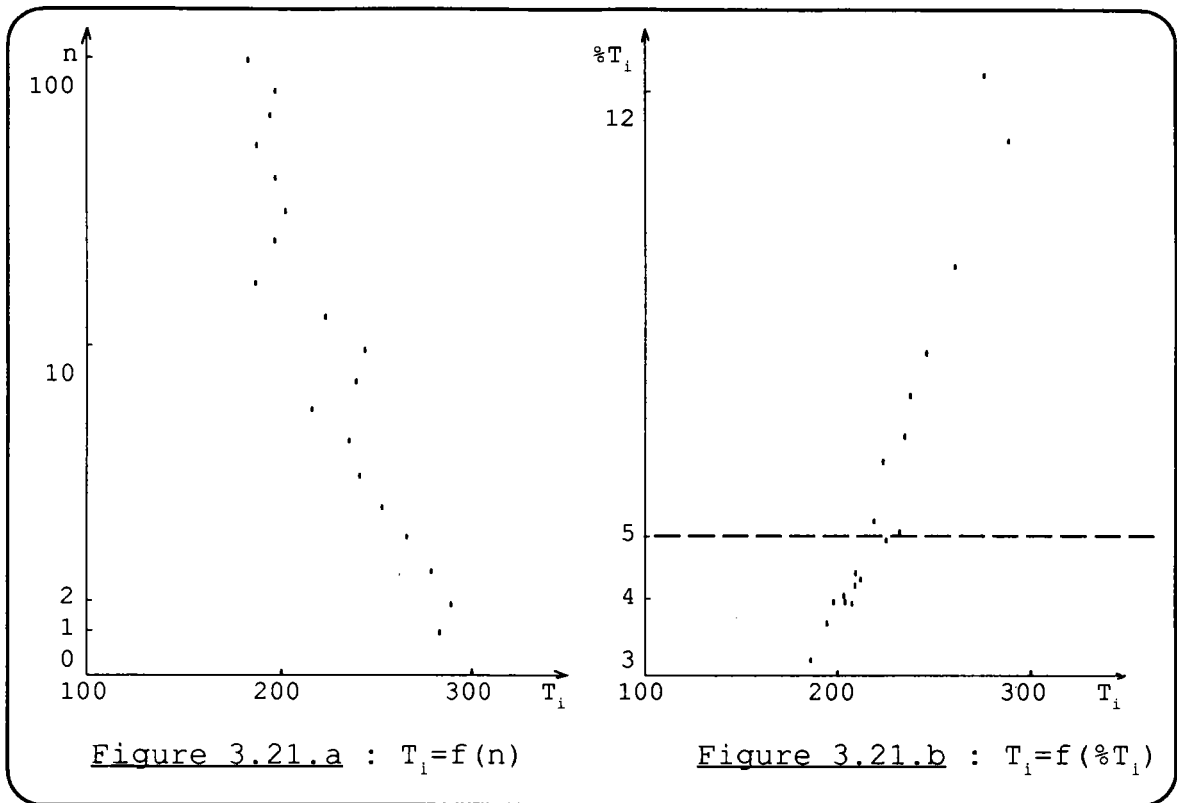
Pour interpréter ces résultats, nous avons tracé deux courbes. La première (figure 3.21.a) représente l'évolution de la température initiale ( $T_i$ ) en fonction du nombre de permutations ( $n$ ), et la seconde (figure 3.21.b) montre l'évolution de la température initiale ( $T_i$ ) en fonction du pourcentage température initiale sur coût initial ( $\%T_i$ ).

Nous constatons, figure 3.21.a, que plus l'agencement est ordonné, plus la température initiale augmente, puisque que chaque permutation engendre un accroissement important du coût. Cette température initiale étant élevée, le temps de calcul de l'algorithme croît lui aussi par l'augmentation du nombre de paliers. De même, figure 3.21.b, plus la température initiale augmente, plus le pourcentage température initiale sur coût initial croît.

N	$T_i$	$C_i$	$C_f$	$T_f$	$\%T_i$
100	193	4345	2130	34	4
90	212	4310	2060	25	4,2
80	205	4575	2125	23	4,1
70	191	4835	2190	10	3,6
60	210	4665	2170	20	3,9
50	213	4680	2175	15	4,2
40	202	4540	2220	10	4
30	178	4540	2270	20	3,4
20	215	4450	2125	15	4,5
10	240	4200	1750	34	5,1
9	233	4280	2340	12	5
8	213	3750	2220	24	5,2
7	235	3600	2125	20	6,1
6	245	3680	2220	18	6,4
5	247	3430	1930	44	7
4	267	3150	1890	31	8
3	286	2850	2010	11	9,6
2	295	2470	1650	40	11,4
1	281	2180	1810	28	12,6

**Tableau 3.3** : Résultats obtenus par génération aléatoire.





**Figure 3.21** : Evolution de la température initiale  $T_i$  en fonction de différents paramètres.

### **3.6.3) Placement des postes de travail en l'absence de sites prédéterminés.**

L'algorithme du recuit simulé en l'absence de sites prédéterminés est identique à celui sur sites prédéterminés, mais avec les modifications suivantes sur les lignes :

- (1) Exécuter l'algorithme de remise à jour de la matrice des distances et algorithme de détermination des recouvrements,
- (4) Déterminer au hasard le poste de travail  $i$  à translater ou tourner,
- (5) Translater ou tourner le poste de travail  $i$ ,
- (6) Exécuter l'algorithme de remise à jour de la matrice

- des distances et l'algorithme de remise à jour des recouvrements,
- (24) Exécuter l'algorithme de remise à jour de la matrice des distances et l'algorithme de remise à jour des recouvrements,
  - (32) Translater ou tourner le poste de travail  $i$ ,
  - (33) Exécuter l'algorithme de remise à jour de la matrice des distances et l'algorithme de remise à jour des recouvrements,
  - (43) Translater ou tourner le poste de travail  $i$ ,
  - (44) Exécuter l'algorithme de remise à jour de la matrice des distances et l'algorithme de remise à jour des recouvrements.

#### **3.6.4) Conclusion**

Nous pouvons donc obtenir un gain important sur le temps de calcul de la démarche proposée par la suppression de l'étape «algorithme d'optimisation du recuit simulé sur sites prédéterminés». Cette suppression sera effectuée lorsque le pourcentage température initiale sur coût initial sera supérieur à 5% (solution initiale proche de l'optimale).

**CHAPITRE IV**  
**LOGICIEL ADAMP ET**  
**APPLICATION**  
**INDUSTRIELLE**

## **IV) Logiciel ADAMP et application industrielle.**

Afin de pouvoir appliquer les niveaux II et III de la méthodologie générale définie précédemment, nous avons développé un logiciel d'Agencement Des Ateliers et des Magasins de Production (ADAMP).

### **4.1) Présentation du logiciel.**

ADAMP est un logiciel développé sur une station de travail Apollo, composé de trois parties distinctes et relativement indépendantes, réparties sur six niveaux (figures 4.1, 4.2, 4.3). Cette structure modulaire, d'utilisation très souple, nous permet de définir presque tous les cas possibles d'agencement. Dans la version actuelle, les parties des menus suivis d'un astérisque (\*) ne sont pas encore développées, mais le seront ultérieurement. De plus, la structure du logiciel permet de définir aisément d'autres menus par l'utilisation d'une bibliothèque utilitaire gérant automatiquement les menus et l'écran graphique défini figure 4.4.

La description succincte des différentes parties d'ADAMP que nous abordons maintenant, fait partie intégrante du logiciel par l'utilisation de la fonction «aide» accessible à tout moment.

#### **4.1.1) Module Saisie des données.**

Ce module permet de définir toutes les données techniques nécessaires à une application. Ces données doivent être entrées dans l'ordre indiqué ci-dessous, car le logiciel ADAMP ne reconnaît une application que si le fichier machine existe (extension .mch). Les données à fournir sont donc :

**- les caractéristiques des postes de travail (impératif**

pour la suite d'une application) :

- \* réels ou fictifs,
  - \* nom,
  - \* numéro de la cellule d'appartenance,
  - \* différents composants (couleur, position relative),
  - \* auxiliaires (entrée-sortie matière, position opérateur, arrivée d'énergie),
  - \* enveloppe.
- le fichier où seront stockées les données postes de travail sera appelé par la suite fichier maître,
  - les matrices des flux,
    - \* les flux intra-flot,
    - \* les flux inter-flot.
  - les matrices de proximité,
    - \* la matrice des seuils,
    - \* les proximités intra-flot,
    - \* les proximités inter-flot.

#### **4.1.2) Module Exploitation.**

Ce module permet à partir d'une application N (figure 4.5) de résoudre le problème d'agencement. Avant de pouvoir exécuter l'algorithme d'optimisation, il est nécessaire d'effectuer plusieurs opérations, à savoir :

- charger une application (nom du fichier maître N.mch),
- faire un placement initial (en ligne, circulaire ou quelconque),
- définir les postes de travail fixes et (ou) les

- ensembles de postes de travail, s'il y a lieu,**
- exécuter l'algorithme d'optimisation.**

L'algorithme d'optimisation se déroule en deux étapes. Dans la première tous les postes de travail sont assimilés à des carrés définis à partir des extrémités de leur enveloppe. L'algorithme se déroule comme si nous étions sur des sites prédéterminés, sans se soucier des recouvrements possibles, et n'effectue que des permutations. Dans la deuxième étape, les postes de travail réels sont injectés à leur emplacement défini à la première étape, et l'algorithme n'effectue alors que des translations et des rotations visant à diminuer le coût et à supprimer les recouvrements.

#### **4.1.3) Module visualisation.**

Ce module permet de visualiser, comparer et modifier les solutions obtenues par l'algorithme d'optimisation. Les étapes à suivre sont :

- charger une application (nom du fichier maître N.mch),**
- définir la solution à visualiser (solution initiale ou solution modifiée),**
- effectuer les modifications.**

Lors de l'étape de modification, l'utilisateur, grâce à la zone des mouchards, voit l'évolution de la fonction coût.

Figure 4.1 : Hiérarchie des menus page 1/3.

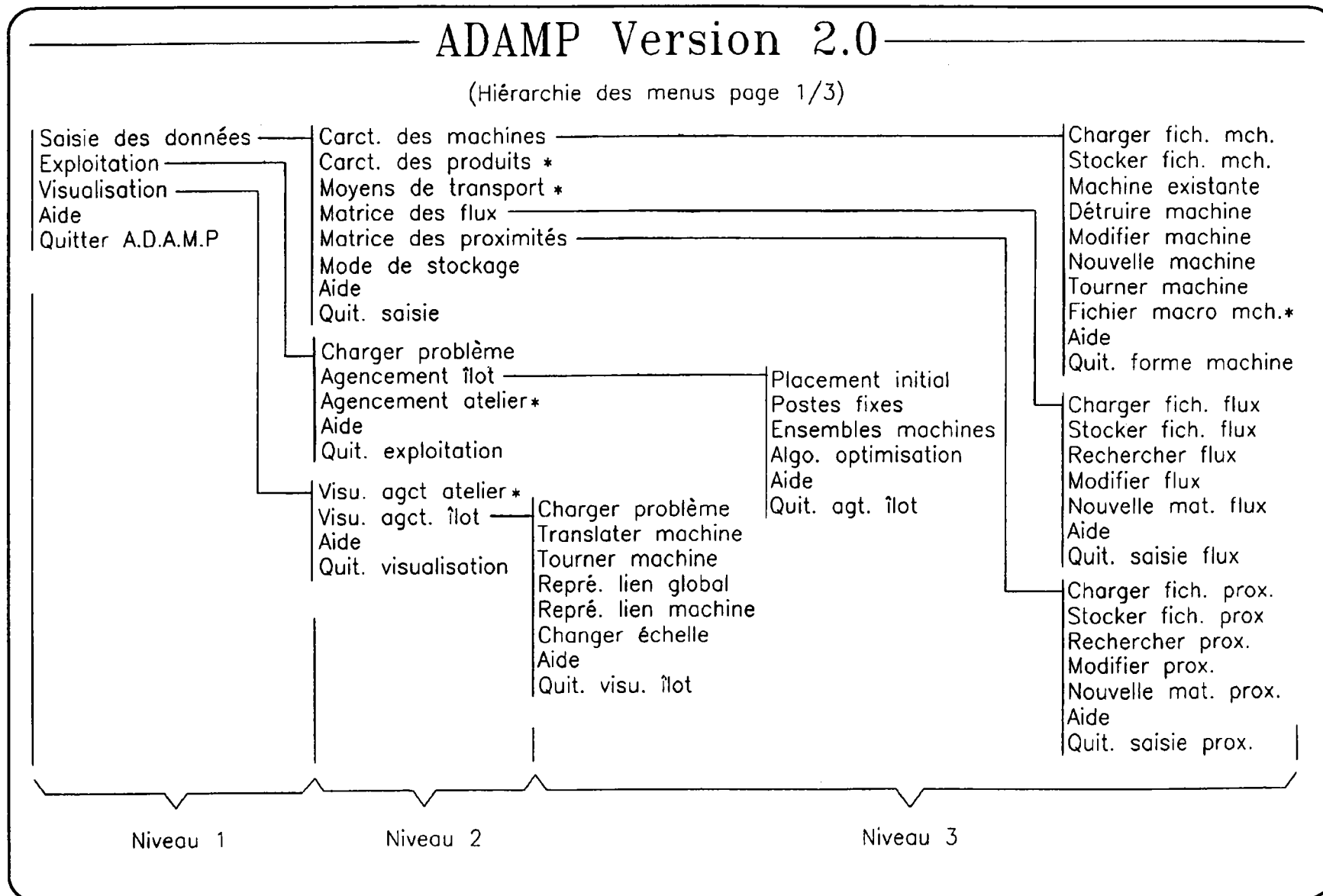


Figure 4.2 : Hiérarchie des menus page 2/3.

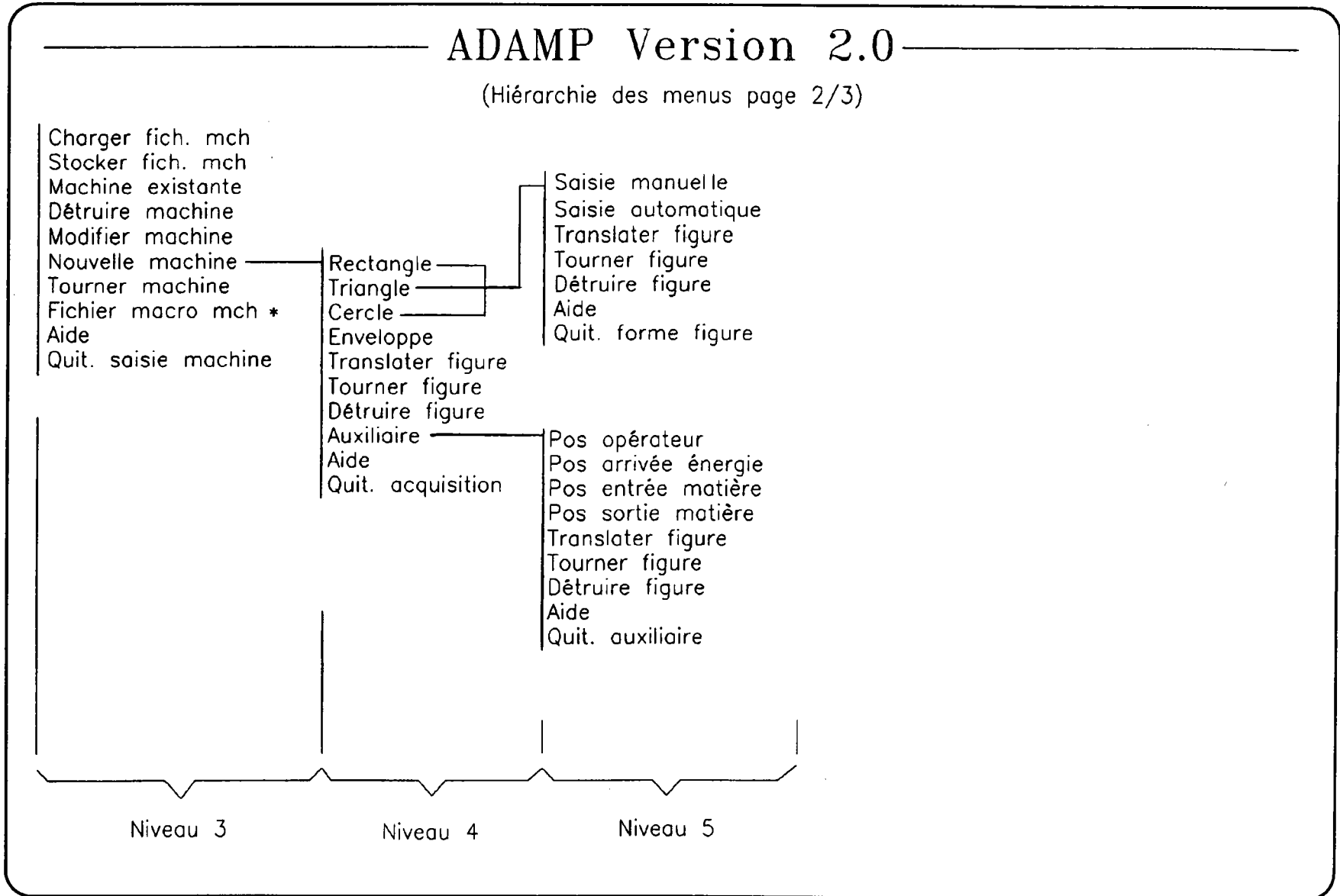
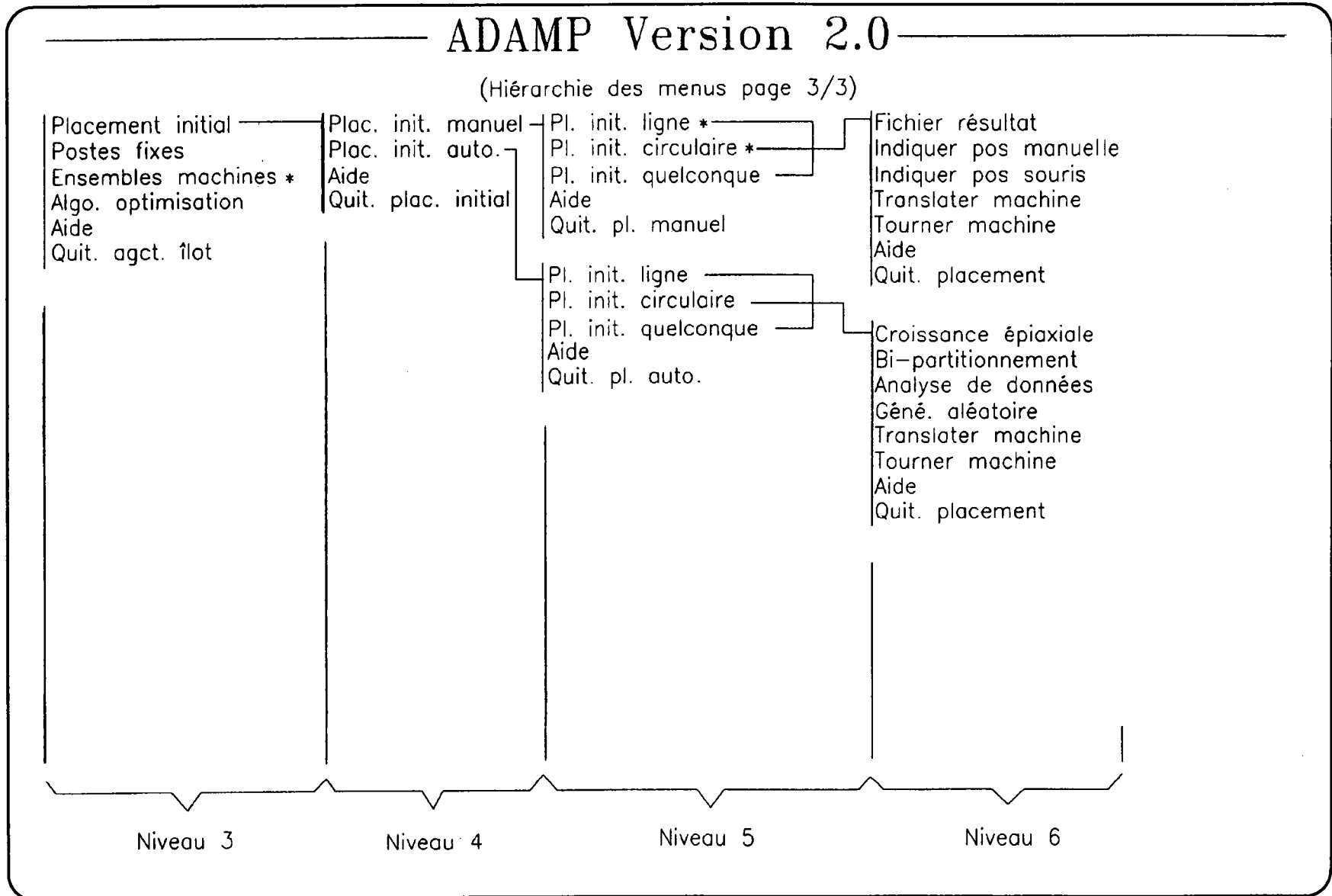


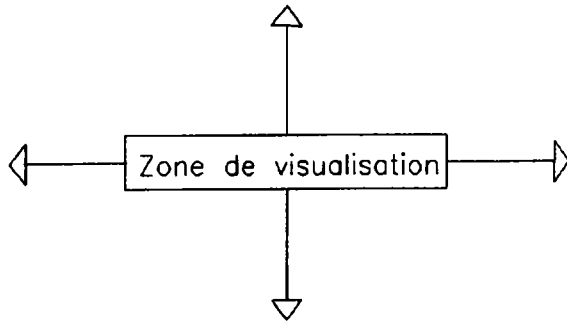


Figure 4.3 : Hiérarchie des menus page 3/3.

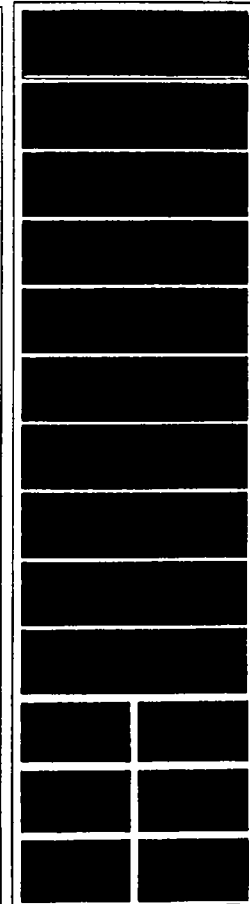


# ADAMP Version 2.0

(écran de visualisation du logiciel ADAMP)



Zone des menus déroulants  
Maximum 10/menu



Zone des mouchards

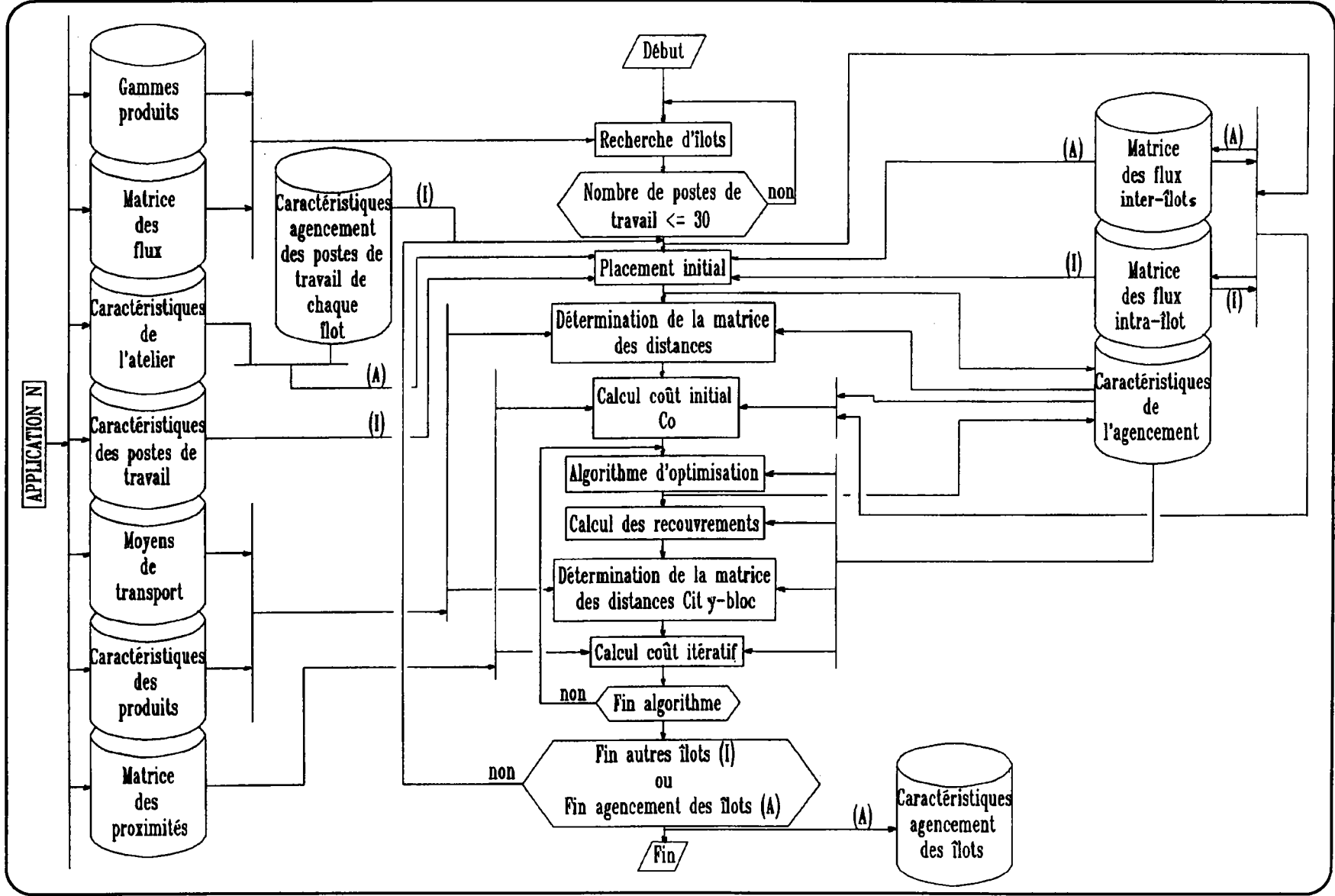
Zone d'acquisition des commandes

Commande --->

Copyright LAEI Version 2.0

Figure 4.4 : Ecran de visualisation.

Figure 4.5 : Algorithme de la méthode d'optimisation.



## 4.2) Présentation d'un cas industriel.

Dans l'exemple suivant, le logiciel ADAMP réagence partiellement l'atelier d'une société de montage de compteurs à gaz (J. B. Rombach), qui confrontée à une augmentation de la demande de compteurs, connaît des problèmes de circulation dans son atelier. Afin de pouvoir y faire face, elle a décidé de réorganiser spatialement son unité de montage.

### 4.2.1) Caractéristiques et production des compteurs.

La chaîne de montage fabrique quatre types de compteurs: G 10 ou G 16, G 25, G 40 et G 65, qui se distinguent les uns des autres par le volume de gaz qu'ils peuvent absorber et par leur taille (tableau 4.1). La production 87/88 et la production prévisionnelle pour chaque type de compteurs sont donnés par le tableau 4.2.

Compteur	Dimensions extérieures (l*L*h) (mm <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Débit maxi. (m <sup>3</sup> /h)
G 16	250*395*450	12	25
G.25	329*443*550	24	40
G.40	410*500*780	57	65
G.65	515*640*860	85	100

**Tableau 4.1** : Caractéristiques physiques des différents compteurs.

Compteur	Production 87/88	Prévision 88/89	Production journ. 88/89
G.10-G.16	5124	6610	27,7
G.25	1612	1950	8,43
G.40	753	980	4,41
G.65	723	890	1,8

**Tableau 4.2** : Production prévisionnelle.

### 4.2.2) La circulation des produits - Les opérations poste par poste.

Les tableaux données en annexe D représentent la succession

des opérations pour le montage de chaque compteur. Les compteurs G.40 et G.65 ainsi que les compteurs G.10 et G.16 sont regroupés dans les mêmes tableaux, car leurs opérations de montage sont identiques.

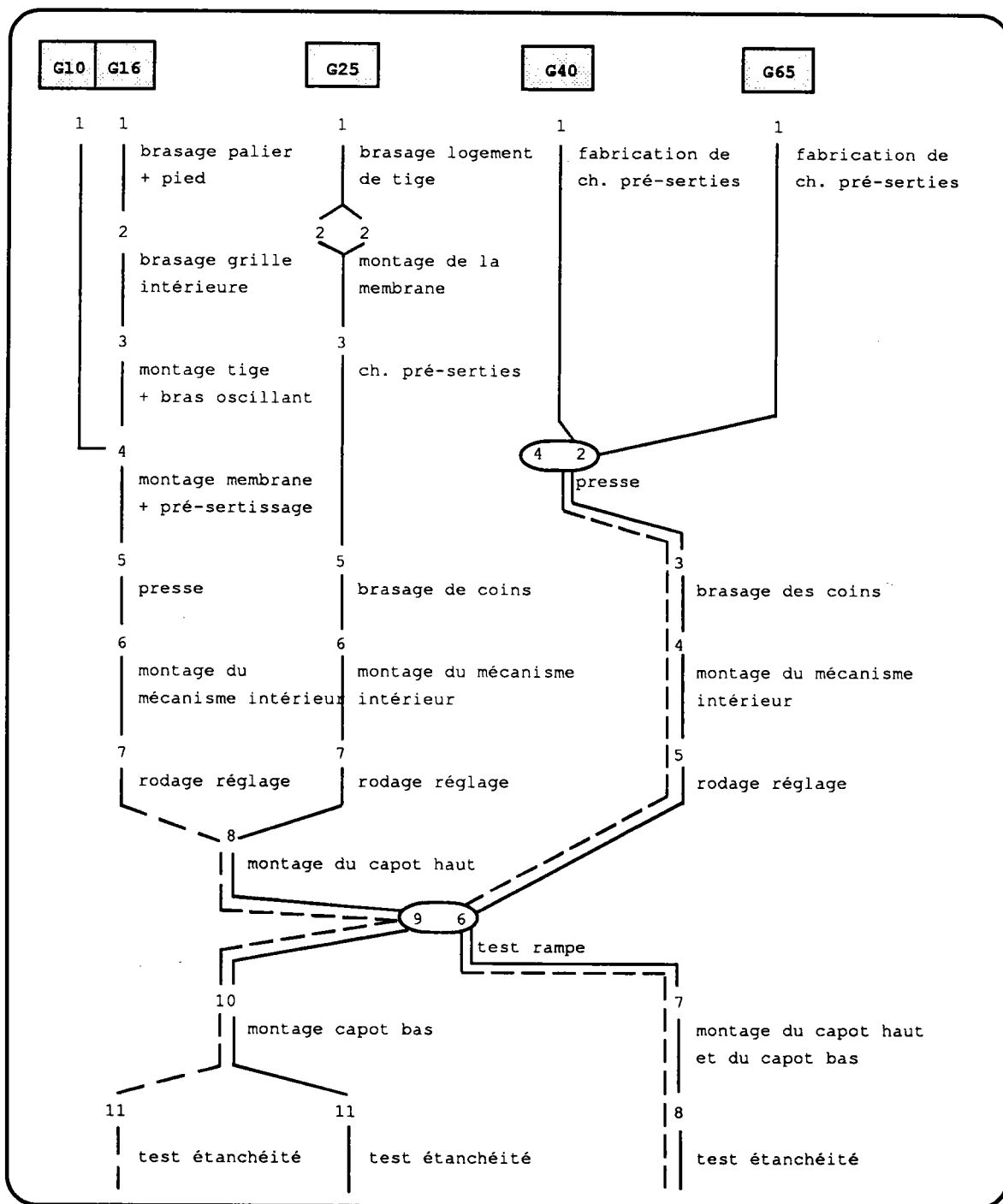


Figure 4.6 : Succession des postes de travail pour chaque compteur.

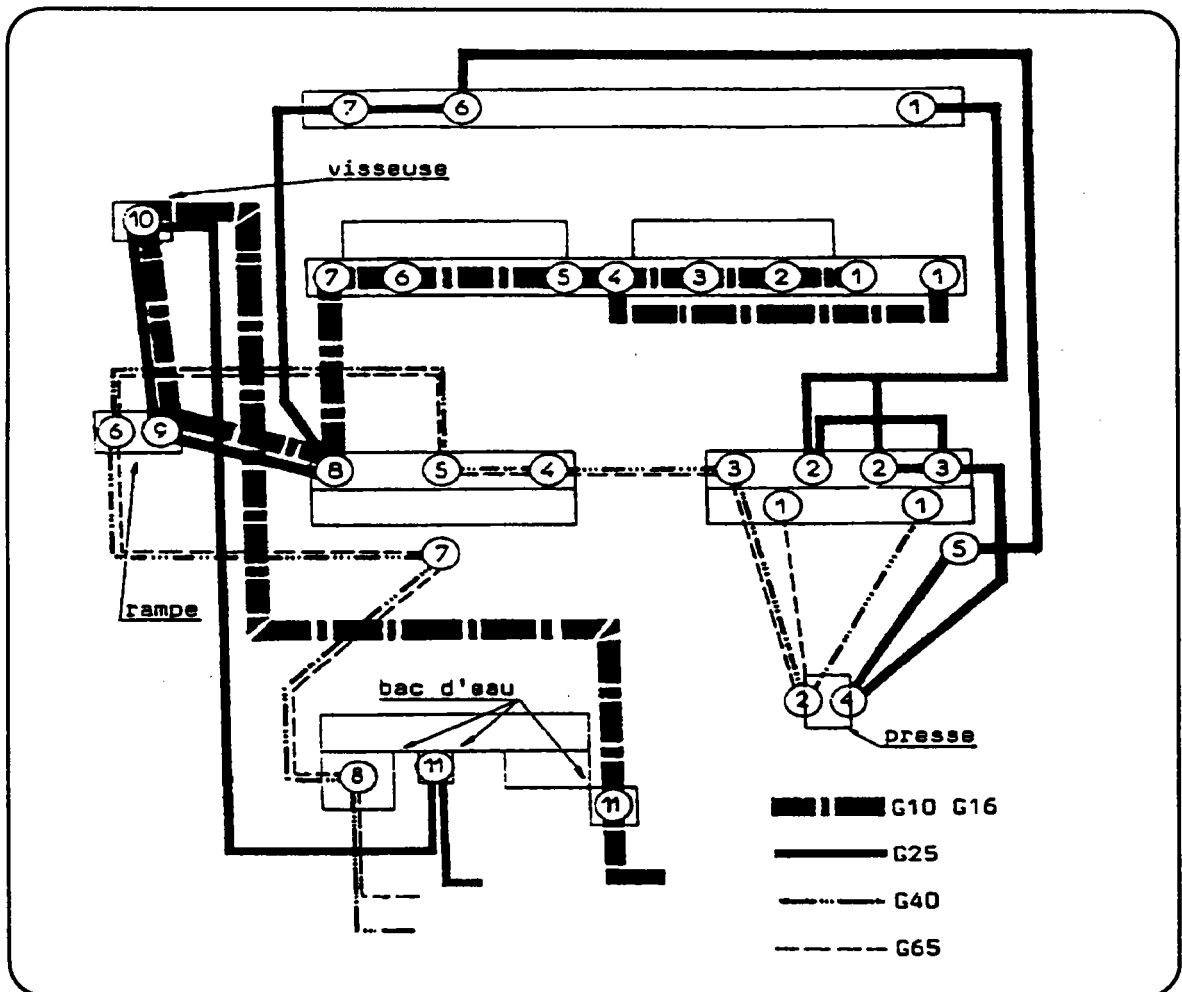


### 4.2.3) La succession des postes de montage.

La figure 4.6 résume les tableaux précédents et elle permet de connaître la succession des postes de travail ainsi que ceux où transitent plusieurs types de compteurs. Nous avons exclu de cette figure tous les postes de travail qui réalisent des éléments pour chaque type de compteurs, ou encore ceux qui alimentent la chaîne de fabrication d'un compteur en différents points.

### 4.2.4) Répartition spatiale initiale.

La figure 4.7 représente la disposition spatiale actuelle des différents postes de travail, où l'épaisseur des traits est proportionnelle au flux de compteurs.



**Figure 4.7** : Répartition spatiale initiale.

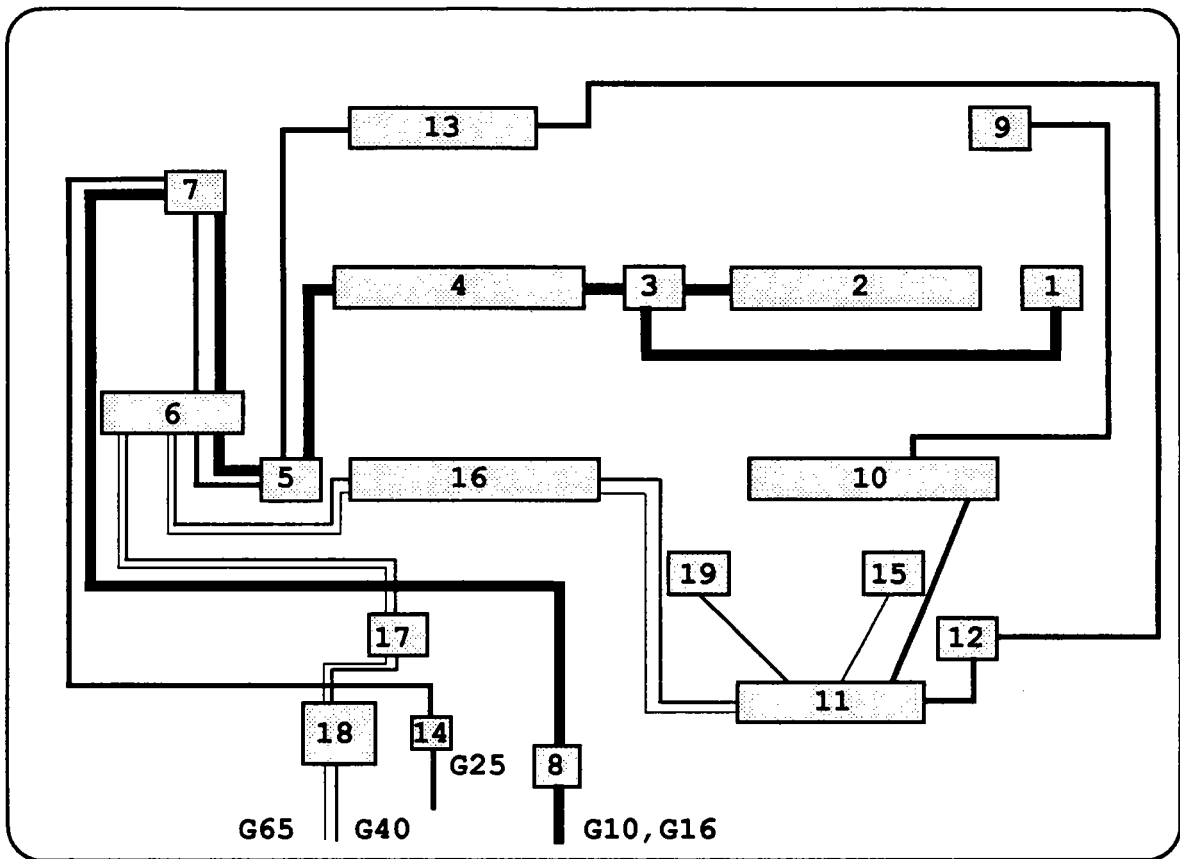
#### 4.2.5) Diminution du nombre de postes de montage.

D'après les figures 4.6 et 4.7, on constate que le regroupement de certains postes de travail est possible, par exemple les postes de travail 5, 6 et 7 de la ligne de montage des compteurs G10-16. Le tableau 4.3 récapitule les postes de travail restants et permet de faire une répartition spatiale initiale simplifiée (figure 4.8).

Nouveau poste de travail n°	Type de compteurs	Anciens postes de travail
1	G10	1
2	G10 et G16	1, 2, 3
3	G10 et G16	4
4	G10 et G16	5, 6, 7
5	G10, G16 et G25	8
6	tous les compteurs	9
7	G10, G16 et G25	10
8	G10 et G16	11
9	G25	1
10	G25	2, 2, 3
11	G25, G40 et G65	2, 4
12	G25	5
13	G25	6, 7
14	G25	11
15	G40	1
16	G40 et G65	3, 4, 5
17	G40 et G65	7
18	G40 et G65	8
19	G65	1

**Tableau 4.3** : Regroupement de postes de montage.

**Remarques** : Les presses 2 et 4 de la figure 4.7 ne forment plus qu'un seul poste de travail car elles doivent toujours rester ensemble. Il en est de même pour les rampes 6 et 9.



**Figure 4.8** : Répartition spatiale initiale simplifiée.

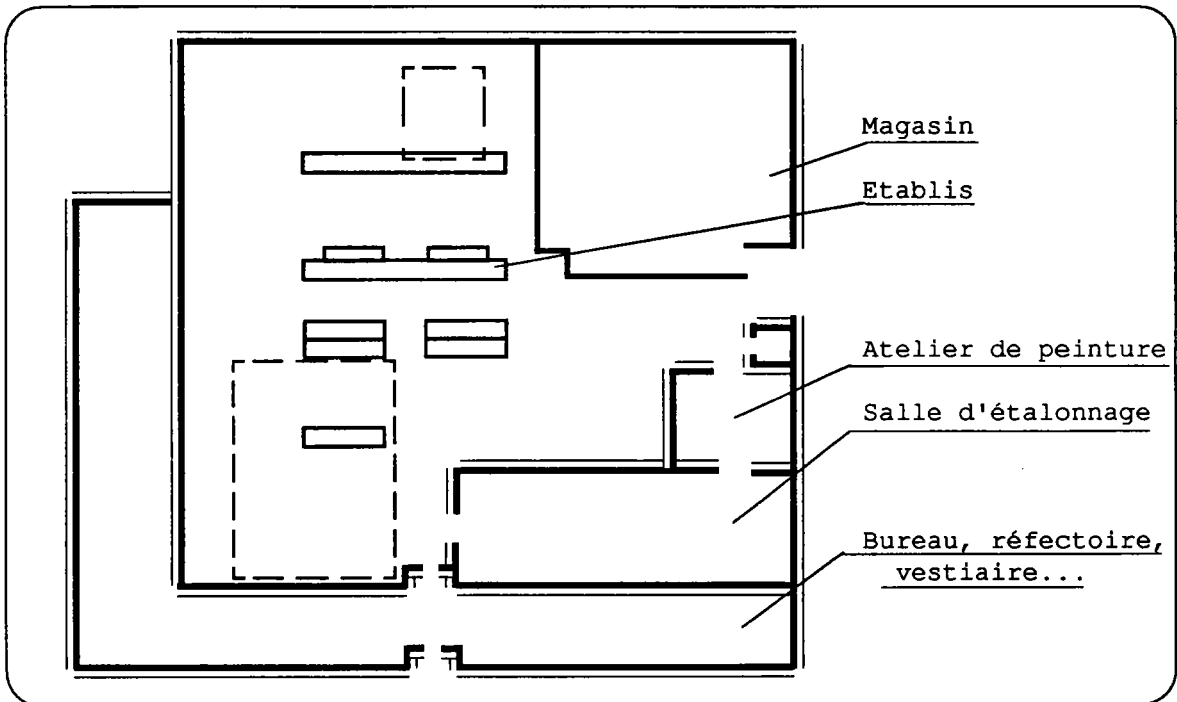
#### **4.2.6) Caractéristiques logistiques de l'atelier de montage.**

Cette réorganisation spatiale de l'atelier de montage est assujettie à un certain nombre de contraintes physiques du type :

- zones interdites aux postes de travail,
- la position du magasin de matière première ainsi que celle du magasin des compteurs finis (salle d'étalonnage) sont fixes,
- éloigner au maximum la presse de la salle d'étalonnage,
- positionner le montage des gros compteurs dans les zones desservies par les ponts roulants,
- les lignes de montage (établis) ne peuvent être déplacées, car elles sont le support de nombreux



tuyaux et canalisations. De plus, toutes les gaines d'aération ont été installées en fonction de ces lignes de montage.



**Figure 4.9** : Schématisation des contraintes logistiques.

**Remarque** : Les postes de travail fixes, c'est-à-dire le magasin et la salle d'étalonnage seront respectivement référencés 20 et 21.

La figure 4.9 résume l'ensemble de ces contraintes implantées dans l'atelier de montage.

#### **4.2.7) Matrice des flux.**

Les flux de matière entre les postes de travail sont donnés tableau 4.4. Cette matrice est notée  $[F]$  d'élément  $f_{ij}$ .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1			14																			
2			14																			
3				28																		
4					28																	
5						36																
6							36										6					
7								28						9								
8																						27
9										9												
10											9											
11												9										
12													9									
13				9																		
14																						9
15											5											
16							6															
17																		6				
18																						6
19											2											
20	14	14														5					2	
21																						

Les valeurs sont obtenues à partir du tableau 4.2 et de la figure 4.8 (par exemple : la valeur encadrée 36 = G10 + G25).

**Tableau 4.4** : Matrice des flux.

**Remarque** : Toutes les intersections non valuées sont des zéros.

#### **4.2.8) Matrice des nuisances.**

De la même manière nous définissons une matrice des nuisances entre postes de travail (tableau 4.5). Cette matrice est notée [N] d'élément  $n_{ij}$ .

Pour pouvoir construire cette matrice, il est nécessaire de déterminer le diagramme des relations, défini par l'échelle qualitative donnée au tableau 4.6.

Valeur	Proximité	Distance (m)	
		mini.	maxi.
A	Absolument nécessaire	0	3
O	Ordinaire bonne	2	5
N	Non désirable	5	10

**Tableau 4.6** : Diagramme des relations.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	A																			A
2	A	0	A																		A
3		A	0	A																	
4			A	0																	
5					0																
6						0															
7							0														
8								0													A
9									0	A											A
10									A	0											
11											0										N
12												0	A								
13												A	0								
14														0							A
15															0						A
16																0					
17																	0				
18																		0			A
19																			0	A	
20	A	A							A						A				A	0	
21								A			N			A				A			0

**Tableau 4.5** : Matrice des proximités.

**Remarque** : Toutes les intersections non valuées sont des proximités «Ordinaire bonne» (O).

**4.2.9) Modélisation de l'atelier de montage.**

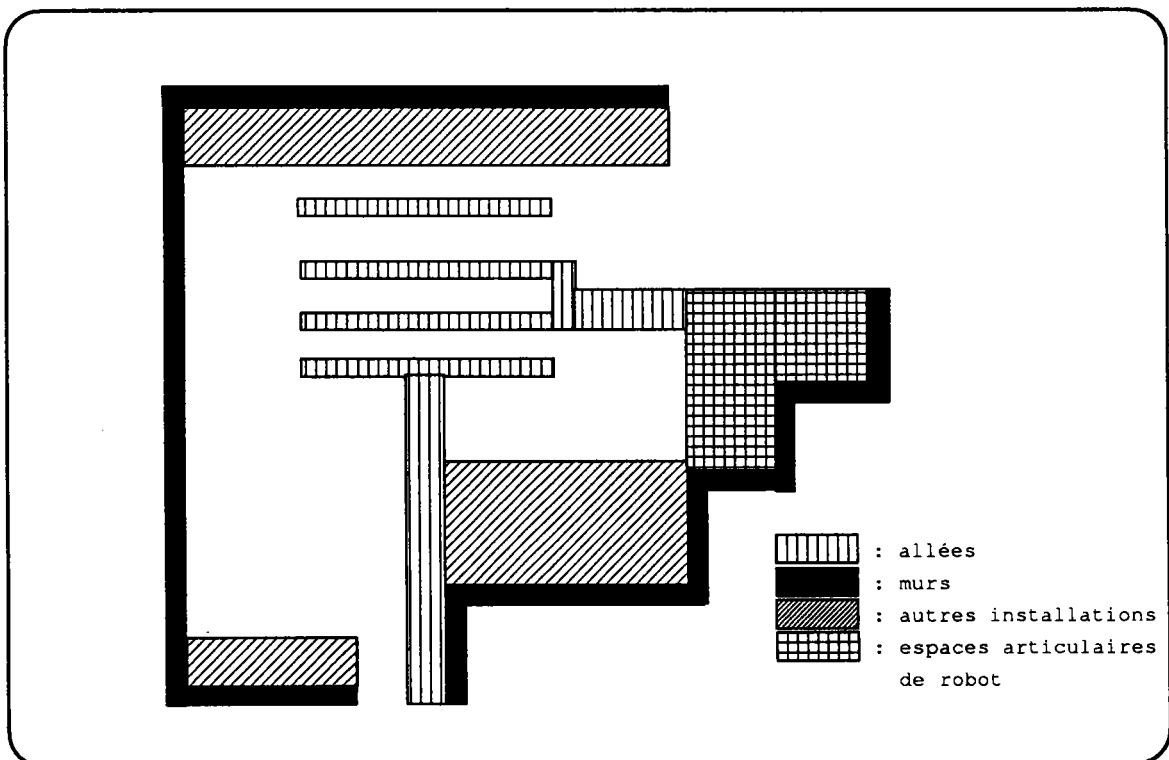
**a) Différenciation des contraintes physiques.**

Dans le paragraphe 4.2.6 nous avons été amenés à définir plusieurs zones interdites aux postes de montage. Celles-

ci peuvent se décomposer comme suit :

- un ensemble d'allées,
- un ensemble de murs,
- un ensemble de zones occupées par d'autres installations n'intervenant pas directement dans la réorganisation spatiale,
- un ensemble d'espaces articulaires réservés au robot de manutention.

La répartition spatiale de ces ensembles, à l'échelle, est donnée à la figure 4.10.



**Figure 4.10** : Différents types de contraintes pris en compte.

### **b) Modélisation des postes de montage.**

Nous pouvons distinguer plusieurs familles de postes

de montage représentées graphiquement dans le tableau 4.7.

n°	nom du poste	n°	nom du poste	n°	nom du poste
1	brasage-palier	6	test-rampe	2	brasage palier-grille
3	montage-membrane	11	presse	4	presse-rodage
5	montage-capot-1			10	montage membrane
7	montage-capot-2			16	brasage rodage
9	brasage-logement-tige				
12	brasage-coins				
15	fabrication-chambre-1				
17	montage-capot-3				
19	fabrication-chambre-2				
n°	nom du poste	n°	nom du poste	n°	nom du poste
8	test-étanchéité	14	test-étanchéité-2	18	test-étanchéité-3
n°	nom du poste	n°	nom du poste		
21	salle-étalonnage	20	magasin-général		

**Tableau 4.7** : Différents types de postes de montage.

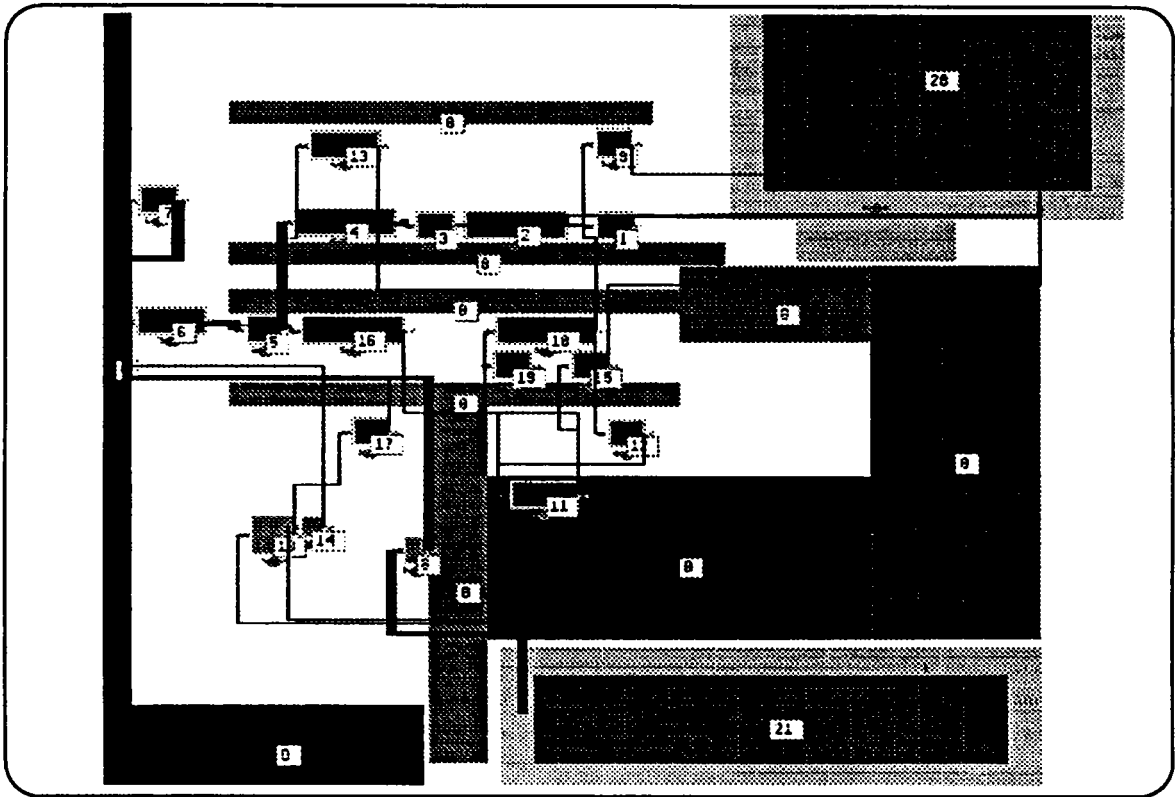
### 4.3) Résultats.

Dans les résultats présentés dans ce paragraphe, le modèle mathématique ne tient pas compte de la :

- proximité opérateur-allée,
- position de l'arrivée d'énergie.

### 4.3.1) Solution initiale.

La solution initiale du logiciel ADAMP est donnée figure 4.11, où sont représentés les numéros de postes de montage, ainsi que les flux de produits.



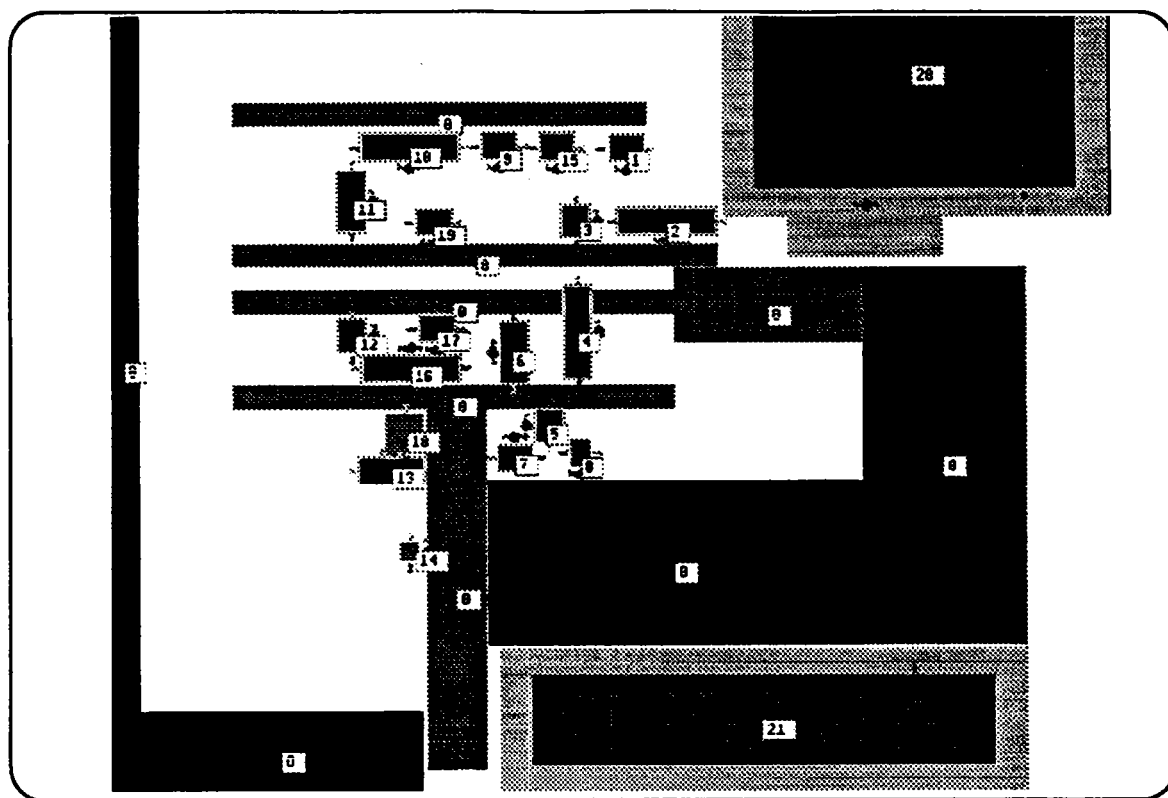
**Figure 4.11** : Solution initiale.

### 4.3.2) Solutions proposées.

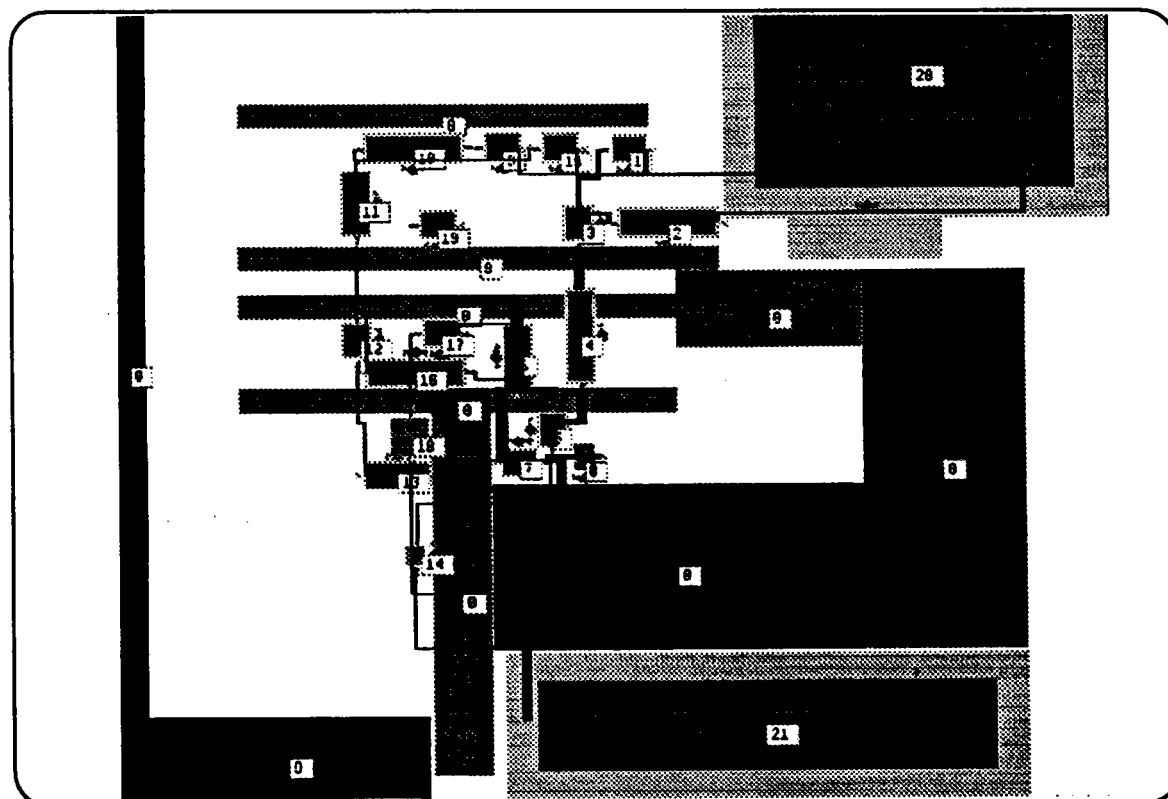
Les figures 4.12, et 4.14, représentent les solutions obtenues après l'algorithme du recuit simulé.

### 4.3.3) Interprétation des résultats.

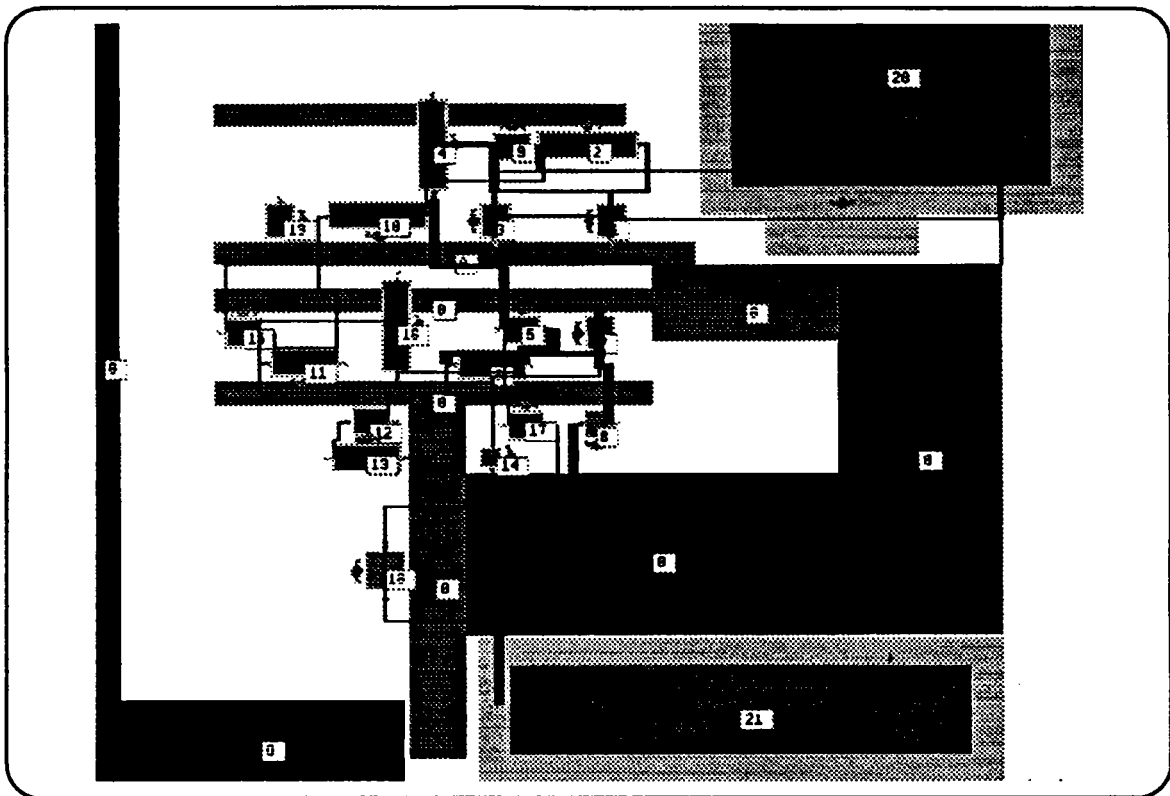
Le placement initial est le placement manuel (coût de cette solution 3547), qui est actuellement implanté dans l'usine de montage des compteurs à gaz de ROMBACH (figure 4.11) : il s'agit d'un placement de qualité médiocre car les presses (numéro 11) se trouvent près de la salle d'étalonnage (numéro 21). Le meilleur résultat



**Figure 4.12** : Solution numéro 1.



**Figure 4.13** : Solution numéro 1 avec représentation des flux.



**Figure 4.14** : Solution numéro 2.

obtenu est présenté figure 4.12 (coût de 2847) : la réduction du coût correspondant est d'environ 20%, et le temps CPU de 20mn. Le taux de décroissance de la température a été calculé pour chaque palier en fixant une décroissance maximum de 0.9. La qualité de ce placement peut être vérifié en comparant la matrice des nuisances et la représentation spatiale initiale des postes de montage à la solution obtenue. Nous constatons, d'une part, que les presses sont éloignées du poste d'étalonnage, et d'autre part, comme le montre la figure 4.13, que les flux de produits sont plus clairs, avec un regroupement des postes de montage.

Une autre solution est présentée figure 4.14 avec un taux de décroissance de 0.7. Cette solution de moindre qualité (coût de 3077), est néanmoins obtenue plus rapidement (temps CPU de 15mn). Les presses se trouvent toujours éloignées du poste d'étalonnage et



la répartition spatiale est moins compacte que dans la solution précédente.

Les quelques recouvrements résiduels peuvent être supprimés et la solution améliorée par l'utilisation du menu visualisation-modification du logiciel ADAMP.

**CHAPITRE V**  
**CONCLUSION**

## **V) CONCLUSION.**

Dans cette étude, nous avons d'abord souligné la nécessité d'améliorer la productivité des ateliers à forte valeur ajoutée par une diminution des stocks, des défauts, des délais, des pannes et surtout de la manutention des produits, ce qui impose une restructuration spatiale de l'unité de production. Puis nous avons montré que l'agencement s'appuie actuellement sur quatre principaux modèles : les chaînes de transfert, les sections homogènes, les îlots de fabrication et l'agencement modulaire. Notre attention s'est portée sur la restructuration spatiale des ateliers, implantés en sections homogènes, par un concept de technologie de groupe permettant, par l'étude des données techniques de production, de déterminer des familles de produits auxquelles on associe un ensemble de postes de travail, appelés îlots de fabrication.

Nous avons présenté ensuite l'état de l'art, en exposant d'une part les divers modèles mathématiques utilisés à ce jour, et d'autre part les principaux logiciels d'agencement. Nous avons montré que les analyses théoriques ne tenaient pas compte de la complexité du problème d'agencement. En effet, la plupart ne sont développées que pour des agencements sur sites prédéterminés, et font abstraction des caractéristiques physiques de l'atelier. Quant aux logiciels, ils n'utilisent que rarement des modèles mathématiques complexes, car les calculs, trop élevés, nécessitent une place mémoire importante et un temps de résolution trop long.

Dans la troisième partie, nous avons développé un modèle mathématique intégrant au mieux des caractéristiques physiques jusqu'alors négligées, telles que : les allées, les piliers et les chevauchements entre postes de travail réels ou fictifs. De plus, il prend en compte divers moyens de transport, les flux de produits

et les nuisances de proximité. Nous avons résolu ce modèle multicritères par une méthode du type «recuit-simulé». Nous avons mis l'accent sur les moyens entrepris pour réduire les temps de calcul, qui demeurent dans certains cas, l'inconvénient de la méthode. En effet, nous avons présenté une étude expérimentale de certains paramètres de l'algorithme, entre autres, l'influence de la configuration initiale sur la vitesse de convergence du «recuit-simulé» par l'étude de sa température initiale, appliquée au problème du placement de blocs. Cette étude a débouché notamment sur la mise au point d'une méthodologie bien adaptée aux problèmes d'agencement.

Dans la dernière partie, nous avons présenté l'application de la méthodologie proposée, à un problème d'assemblage de compteurs à gaz. Après avoir modélisé cet atelier de montage, nous avons exposé les résultats obtenus ; nous avons montré en particulier que la méthode permet de prendre en considération un ensemble de contraintes propres au problème et qu'elle se prête bien à l'introduction de nouvelles contraintes liées à l'évolution de la technologie.

En plus de notre travail, dans le cadre du projet régional PARODI (Prélèvement Automatique et Remplissage Optimisé pour la Distribution Industrielle), cette méthodologie basée sur un concept de technologie de groupe a été appliquée à la réorganisation spatiale de magasins d'articles [Mut 88], [Mut 89]. Le modèle mathématique est présenté à l'annexe C et il est proche de celui développé pour l'agencement des postes de travail, à la différence qu'il évolue sur des sites prédéterminés. Nous constatons que la structure du modèle peut s'adapter aisément à toutes sortes de problèmes d'assignation quadratique par l'adjonction de contraintes spécifiques.

Cependant des progrès devraient être obtenus dans trois directions : accroissement de la complexité du modèle mathématique,

développement du niveau III de la méthodologie et prise en compte de nouvelles méthodes proposées en recherche opérationnelle.

En ce qui concerne le premier point, le modèle utilisé ne tient compte que des contraintes logistiques de l'atelier et physiques des postes de travail indépendants les uns des autres. Ainsi, il serait judicieux, pour se rapprocher encore plus de la réalité des ateliers, de pouvoir définir des lignes de production rectilignes ou circulaires, sur lesquelles les postes de travail seraient assujettis à se déplacer et de définir des ensembles de postes de travail devant toujours rester groupés, mais dont la position relative pourrait changer. De plus il serait intéressant de déterminer automatiquement le(s) moyen(s) de transport, de telle sorte que ceux-ci optimisent le nombre des trajets en fonction des caractéristiques des produits.

Une autre voie de recherche est l'étude théorique du niveau trois de la méthodologie (agencement des îlots). Actuellement, celui-ci peut être résolu simplement en considérant que l'îlot de fabrication est équivalent à un poste de travail. Cette approche est réaliste dans le sens où après l'application de la technologie de groupe, nous avons diminué au maximum les trajets inter-îlots. Mais il serait judicieux de définir un modèle mathématique permettant d'agencer ces îlots de manière à tenir compte de  $n_i$  points d'entrée et  $m_i$  points de sortie matière pour l'îlot  $i$ . Il serait également souhaitable, pour accélérer la recherche d'une solution, de «seuiller» la matrice des flux de manière à supprimer les postes de travail ayant une faible liaison avec tous les autres, ce qui diminuerait encore la taille des îlots. Ces postes de travail, indépendants, seraient injectés dans l'agencement final à la fin de l'optimisation, selon un modèle qui reste à définir.

Enfin, il existe dans la même famille d'heuristiques que le «recuit-simulé», la méthode tabou [Glo 87] permettant de diminuer le nombre de recherches par l'interdiction de revenir, sur un intervalle donné, à une configuration déjà calculée. De plus, on peut penser que les problèmes d'optimisation peuvent encore bénéficier de l'analogie avec la physique, dans la mesure où la connaissance des milieux désordonnés est elle-même susceptible de progresser.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- [Ade 83] : ADEPA, «Dossier : organisation et gestion de production»; Adepa actualités, n° 16, décembre 1983.
- [Anc 88] : D. Anciaux et B. Mutel, «Layout method of manufacturing workshop»; 8ième conférence internationale sur l'analyse et l'optimisation des systèmes, Antibes, Springer-Verlag, 1988.
- [Arm 63] : G.C. Armour et E.S. Buffa, «A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities»; Management Science, vol. 9; n° 2, pp. 294-300, 1963.
- [Baz 75] : M.S. Bazarraa, «Computerized layout design : A Branch and Bound approach»; AIIE Transaction, vol. 7, n° 4, pp. 432-437, 1975.
- [Baz 80] : M.S. Bazarra et M.D. Sherali, «Benders' partitioning scheme applied to a new formulation of the quadratic assignment problem»; Naval Research Logistics Quartely, vol. 27 (1), pp. 29-41, 1980.
- [Ben 71] : O.S. Benhi, «A review of approaches to the solution of some ill-structured problems»; Unpublished, 1971.
- [Bena 86] : J.Benassy, «L'usine intégrée par ordinateur»; Hermes, Paris, 1986.
- [Benc 85] : G. Benchimal et al, «La conception des usines de demain»; Hermes, Paris, 1985.
- [Blo 78] : T.E. Block, «FATE : A new construction algorithm for facilities layout»; Journal of Engineering Production, Vol. 2, pp. 111-120, 1978.
- [Bon 87] : R. Bonetto, «Les ateliers flexibles de production»; Hermes, Paris, 1987.
- [Buf 64] : E.S. Buffa, G.C. Armour et T.E. Vollman, «Allocating facilities with CRAFT»; Harvard Business Review, vol. 42, n° 2, pp. 136-159, 1964.

- [Bur 83] : R.E. Burkard et T. Bonniger, «A heuristic for quadratic boolean program with application to the quadratic assignment problems»; European Journal of Operational Research, vol. 13, pp. 374-386, 1983.
- [Bur 84] : R.E. Burkard, «Location with spatial interaction-Quadratic assignment problem»; in : R.L. Francis and P.B. Mirchandani (eds), Discrete Location Theory, Academic Press, New-York, 1984.
- [Bur 85] : S.L. Burdbridge, «Production flow analysis and the design of FMS»; APMS Compcntrol, vol. 1, Budapest, 1985.
- [Cam 52] : D.C. Cameron, «Travel-charts, a tool for analyzing material movement problems»; Journal of Industrial Engineering, vol. 12, n° 1, 1952.
- [Dei 72] : M.P. Deisenroth et J.M. Apple, «A computerized plant layout analysis and evaluation technique»; Technical paper, Annual AIIE Conference, Norcross, GA, 1972.
- [Dut 83] : K.N. Dutta et S. Sahu, «Comments on : a note multi-goal heuristic for facilities design problems»; IJPR, vol. 21, n° 3, pp. 441-442, 1983.
- [Edw 70] : H.K. Edwards, B.E. Gillett et M.C. Hale, «Modular allocation technique (MAT)»; Management Science, vol. 17, n°3, pp. 161-169, 1970.
- [Els 77] : A.N Elshafei, «Hospital layout as a quadratic assignment problem»; Operations Research Quarterly, Vol. 28, n°1, pp. 167-179, 1977.
- [For 85] : J.C. Fortenberry et J.F. Cox, «Multiple criteria approach to the facilities layout problem»; IJPR, vol. 23, n° 4, pp. 773-782, 1985.
- [Fou 76] : L.R. Fould et D.F. Robinson, «Graph theoretic heuristics for the plant layout problem»; IJPR, vol. 16, n° 1, pp. 27-30, 1976.
- [Fra 74] : R.L. Francis et J.A. White, «Facility layout and location on analytical approach»; Prentice-Hall, Inc., New-Jersey, 1974.
- [Fra 87] : A.R. François, «Manuel d'organisation»; Les éditions d'organisation, Paris, 1987.
- [Gav 66] : J.W. Gavett et N.V. Plyter, «The optimal assignment of facilities to location by Branch and Bound»; Operations Research, vol. 14, pp. 210-232, 1966.
- [Gil 62] : P.C. Gilmore, «Optimal and suboptimal algorithms for the quadratic assignment problem»; Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 10, pp. 305-313, 1962.



- [Glo 87] : F. Glover, «Tabu search», ORSA/TIMS joint national meeting, St. Louis, M.O., Octobre, 1987.
- [Gra 70] : G.W. Graves et A.B. Whinston, «An algorithm for the quadratic assignment problem»; Management Science, vol. 17, n° 7, pp. 453-471, 1970.
- [Heg 86] : S. Hegaru et A. Kusiak, «A construction algorithm for the facility layout problem»; Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Manitoba, Canada, 1986.
- [Hil 63] : F.S. Hillier, «Quantitative tools for plant layout analysis»; Journal of Industrial Engineering, vol. 14, pp. 33-40, 1963.
- [Hil 66] : F.S. Hillier et M.M. Connors, «Quadratic assignment problem algorithms and the location of indivisible facilities»; Management Science, vol. 13, pp. 42-57, 1966.
- [Jep 83] : D.W. Jepsen et C.D. Gelatt Jr, «IEEE Prod. Int. Conf. on computer design»; Port Chester, 1983.
- [Kau 78] : L. Kaufman et Broeckx, «An algorithm for the quadratic assignment problem using Benders' decomposition»; European Journal of Operational Research, vol. 2, pp. 204-211, 1978.
- [Kha 73] : T.M. Khalil, «Facilities relative allocation technique (FRAT)»; IJPR, vol. 11, n°2, pp. 183-184, 1973.
- [Kir 83] : S. Kirkpatrick et C.D. Gelatt Jr, M.P. Vecchi, sciences 220, pp. 271, 1983.
- [Koo 57] : T.C. Koopmans et M Beckmann, «Assignment problems and the location of economic activities»; Econometrica, vol. 25, pp. 53-76, 1957.
- [Lam 87] : P. Lamy, «Moyen, besoins, délais, manuel pratique de gestion de production»; Hermes, Paris, 1987.
- [Lan 63] : A.H. Land, «A problem of assignment with interrelated costs»; Operations Research Quaterly, vol. 14, pp. 185-198, 1963.
- [Lav 85] : I. Lavallo et C. Roucairol, «Parallel branch and bound algorithm»; Euro VIII, Bologne, Italie, 1985.
- [Law 63] : E.L. Lawler, «The quadratic assignment problem»; Management Science, vol. 19, pp. 586-599, 1963.
- [Lee 58] : R.C. Lee et J.M. Moore, «CORELAP Computerized Relationship Layout Planning»; Journal of Industrial Engineering, vol. 9, n° 3, 1958.

- [Lee 67] : R. Lee et J.M. Moore, «CORELAP-computerized relationship layout planning»; Journal of Industrial Engineering, vol. 18, pp. 195-200, 1967.
- [Lov 69] : R.F. Love et J.W. Wong, «Solving quadratic assignment problem with rectilinear distances out integer programming»; Naval Research Logistics Quarterly, vol. 23, pp. 623-627, 1969.
- [Mit 60] : S.P. Mitrofanow, «Wissenschaftliche Grundlagen der Gruppentechnologie»; VEB Verlag Technik, Berlin, 1960.
- [Muth 61] : R. Muther, «Systematic layout planning»; Industrial Education Institute, Boston, 1961.
- [Muth 70] : R. Muther et K. Mc Pherson, «Four approaches to computerized layout planning»; Industrial Engineering, pp. 39-49, 1970.
- [Mut 88] : B. Mutel et D. Anciaux, «Etude d'organisation de magasins d'articles», 2ème Congrès International de Génie Industriel, GGI, express-tirage, pp. 411-420, 1988.
- [Mut 89] : B. Mutel et D. Anciaux, «Study of storage and picking policies of items in large delivery-type warehouse», Institute of Industrial Engineers, ICAW Proceedings, Dallas, 1989.
- [Mut 89] : B. Mutel et R. de Guio, «Recognition of cellular manufacturing under management constraints», Anal of the CIRP, vol. 38, pp. 451-454, 1989.
- [New 69] : A. Newell, «Heuristic programming, ill-structured problems progress in OR»; Aronofsky, ed. John et Son, New-York, 1969.
- [Obr 80] : C. O'Brien et Abdel Barr, Z.E.R., «An interactive approach to computer aided facility layout»; IJPR vol. 18, n°2, pp. 201-211, 1980.
- [Pic 84] : C.J. Picone et W.E. Wilhelm, «Perturbation scheme to improve Hillier's solution to the facilities layout problem»; Management Science, Vol. 30, n°10, pp. 1238-1249, 1984.
- [Pie 71] : J.F. Pierce et W.B. Crowston, «Tree-search algorithms for quadratic assignment problems»; Naval Research Logistics Quarterly, vol. 18, pp. 1-13, 1971.
- [Pro 86] : J.M. Proth, H. Quentin de Gomard, «Systèmes flexibles de production, conception préliminaire»; Masson, Paris, 1986.
- [Pru 86] : J.C. Pruvost, «Point en productique»; Technique et documentation, Paris, 1986.

- [Ray 70] : El-Rayad, T.E. et R.H. Hollier, «A review of plant design technique»; IJPR, vol. 8, n° 3, pp. 263-278, 1970.
- [Rom 84] : F. Romea, A.L. Sangiovanni-Vincenlelli et C. Sechen «IEEE Prod. Int. Conf. on computer design»; Part Chester, 1984.
- [Ros 79] : M.J. Rosenblatt, «The facilities layout problem, a multigoal approach»; IJPR, vol. 17, pp. 323-332, 1979.
- [Sch 86] : H.J. Schneider, «Systems of the fifth generation and their impact on the qualification, training and retraining of management»; Robotics vol. 2, pp. 345-355, 1986.
- [Scr 85] : M. Scriabin et R.C. Virgin, «A cluster-analytic approach to facility layout»; Management Science, Vol. 31, n°1, pp. 33-49, 1985.
- [See 67] : J.M. Seehof et W.O. Evans, «Automated layout design program»; Journal of Industrial Engineering, vol. 18, n° 2, pp.690-695, 1967.
- [Shi 83] : Shigeo Shingo, «Maîtrise de la production et méthode Kanban, le cas Toyota»; Les éditions d'organisation, Paris, 1983.
- [Sho 80] : R.H. Shore et J.A. Tompkins, «Flexible facilities design»; AIIE Transaction, vol. 12, n° 2, pp. 37-50, 1980.
- [Tom 76] : J.A. Tompkins et R. Reed, «An applied method for the facilities design problem»; IJPR, vol. 14, n° 5, pp. 583-595, 1976.
- [Voi 85] : W. Voisin, «Les usines de demain»; Hermes, Paris, 1985.
- [Vol 68] : T.E. Vollman, C.E. Nugent et Zartler, «A computerized model for office layout»; Journal of Industrial Engineering, Vol. 19, pp. 321-327, 1968.
- [Zol 72] : K. Zoller et K. Adendorff, «Layout planning by computer simulation»; AIIE Transaction, vol. 4, n°2, pp. 116-125, 1972.

**ANNEXE A**  
**MODELES MATHEMATIQUES**

**TABLE DES MATIERES**

	<b>page</b>
<b>I MODELE D'ASSIGNATION QUADRATIQUE.....</b>	<b>128</b>
1.1 Modèle d'assignation linéaire (LAP).....	128
1.2 Problème du voyageur de commerce (TSP).....	128
1.3 Modélisation sur sites prédéterminés.....	129
1.3.1 Modèle de Rosenblatt.....	129
1.3.2 Modèle de Fortenberry et Cox.....	131
<b>II MODELE QUADRATIQUE EN VARIABLE ZERO-UN.....</b>	<b>132</b>
<b>III THEORIE DES GRAPHS.....</b>	<b>134</b>

Tous les modèles présentés dans cette annexe sont des modèles sur sites prédéterminés, c'est à dire que le nombre de postes de travail égale le nombre d'emplacements.

# I) Modèle d'assignation quadratique.

## 11) Modèle d'assignation linéaire (LAP).

Si les  $f_{ik}$  sont nuls ou identiques la fonction objectif se réduit

à :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_{ij} \quad (1)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

## 12) Problème du voyageur de commerce (TSP).

Les équations (2)-(4) impliquent que si les  $x_{ij}$  sont représentés sous forme matricielle, alors la matrice résultante  $X = [x_{ij}]$  sera une matrice de permutation, c'est-à-dire une matrice dans laquelle chaque ligne et colonne possède une seule valeur non nulle. La fonction objectif, (1d) avec les contraintes (2)-(4) et une contrainte supplémentaire pour que la matrice soit cyclique, peut être utilisée pour le problème du voyageur de commerce. Une matrice de permutation cyclique est présentée figure A.1.

$$X = [x_{ij}] = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

**Figure A.1** : Matrice de permutation cyclique.

### 1.3) Modélisation sur sites prédéterminés.

#### 1.3.1) Modèle de Rosenblatt [Ros 79].

Ce modèle combine deux fonctions, l'une  $Zx$  minimise les coûts de manutention des produits, l'autre  $Zy$  doit aboutir à des pénalisations de proximité maximum.

$$Zx = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijkl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (5)$$

$$Zy = \text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n w_{ijkl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (6)$$

sous les contraintes (2), (3) et (4).

avec :

$$a_{ijkl} = \begin{cases} f_{ik} \cdot d_{jl} & \text{si } i \neq k \text{ ou } j \neq l \\ f_{ii} \cdot d_{jj} + C_{ij} & \text{si } i=k \text{ et } j=l \end{cases}$$

$$w_{ijkl} = \begin{cases} r_{ik} & \text{si l'emplacement } j \text{ et } l \text{ sont voisins;} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

où

- $c_{ij}$  : coût par unité de temps attribué au poste de travail  $i$  à l'emplacement  $j$ .
- $d_{jl}$  : distance de l'emplacement  $j$  à l'emplacement  $l$ .
- $f_{ik}$  : flux de produits du poste de travail  $i$  au poste de travail  $k$ .
- $r_{ik}$  : pénalisation de proximité entre les postes de travail  $i$  et  $k$ , définie par Francis et White [Fra 74] et Lee et Moore [Lee 58].

Comme les équations (5) et (6) sont présentées sous forme d'un problème d'assignation quadratique (QAP) et que toutes deux sont définies sur les mêmes ensembles de variation d'indice, elles peuvent être combinées. Cela se traduit par une formulation «multi-objectifs» dans laquelle la fonction objectif comprend deux buts contradictoires (minimisation des flux, maximisation des proximités).

Voici la formulation «multi-objectifs» :

$$Z = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (\alpha_2 \cdot a_{ijkl} - \alpha_1 \cdot w_{ijkl}) \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (7)$$

sous les contraintes (2), (3), (4) et :

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (8)$$

$$\alpha_1 ; \alpha_2 \geq 0 \quad (9)$$

ou  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  désignent les poids respectifs affectés au coût total du flux et à la performance totale des proximités, et où  $Z$  représente



le compromis entre les deux fonctions.

Si les  $\alpha$  satisfont à la condition  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , alors le problème peut être ramené à un QAP, par l'élimination de  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  d'où la nouvelle fonction objectif :

$$Z = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n m_{ijkl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (10)$$

où :

$$m_{ijkl} = \alpha_2 \cdot a_{ijkl} - \alpha_1 \cdot w_{ijkl} \quad \forall i, j, k, l = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Dutta et Sahu [Dut 83] proposèrent un modèle similaire.

### **1.3.2) Modèle de Fortenberry et Cox [For 85].**

Ce modèle combine les deux approches vues précédemment pour obtenir une fonction objectif qui sera la factorisation des flux de produits entre les postes de travail et des pénalisations de proximité. Le modèle est formulé de la manière suivante :

$$Z = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijkl} \cdot b_{ijkl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \quad (12)$$

sous les contraintes (2), (3) et (4),

où :

$$- a_{ijkl} = f_{ik} \cdot d_{jl}$$

$$- b_{ijkl} = r_{ik}$$

Toutes ces formulations, basées sur le même concept, divergent cependant sur certains points. Entre la formulation de Rosenblatt et celle de Dutta et Sahu nous constatons deux différences fondamentales. Premièrement l'algorithme de Rosenblatt utilise un programme existant tel qu'ALDEP pour générer des agencements au hasard, tandis que la méthode de Dutta et Sahu utilise un algorithme d'échange par paire de postes de travail pour améliorer l'agencement existant. Deuxièmement Rosenblatt ajoute des pénalisations de proximité si les postes de travail possèdent des limites communes ou des coins communs, tandis que Dutta et Sahu ne le font que dans le cas où les postes de travail possèdent des limites communes.

Le modèle de Fortenberry et Cox, quant à lui, est multiple. Les valeurs des pénalisations de proximité influencent par conséquent le coût de l'agencement. Mais elles ne prennent pas en compte les limites adjacentes, les coins communs des postes de travail, ou bien les distances qui les séparent. Notons que le système de calcul des pénalisations de proximité est de +6 à +1 pour les méthodes de Rosenblatt et Dutta-Sahu, tandis que la méthode de Fortenberry et Cox utilise un système de +5 à -1, défini selon l'échelle représentée au chapitre II, paragraphe 2.4.2. D'après eux, une valeur de -1 pour une évaluation de proximité «N» engendre un meilleur travail de séparation que la valeur +1.

## **II) Modèle quadratique en variables zéro-un.**

Kaufman et Broeckx [Kau 78] développèrent un problème de programmation quadratique en variables zéro-un possédant le plus petit nombre de variables et de contraintes parmi toutes les formulations de programmation linéaire en nombre entier du QAP. Ils définissent :

$$w_{ij} = x_{ij} \cdot \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{ijkl} \cdot x_{kl} \quad (13)$$

$$e_{ij} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{ijkl} \quad (14)$$

La fonction objectif est :

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{ijkl} \cdot x_{ij} \cdot x_{kl} \\ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \left( \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{ijkl} \cdot x_{kl} \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \end{aligned} \quad (15)$$

sous les contraintes (2), (3), (4) et :

$$e_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{ijkl} \cdot x_{kl} - w_{ij} \leq e_{ij} \quad (16)$$

$$w_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

Kaufman et Broeckx ainsi que Burkard [Bur 84] prouvent l'équivalence du problème ci-dessus (15)-(17) et (2)-(4), et du QAP. Notons que cette formulation possède  $n^2$  variables zéro-un et  $n^2$  variables continues et  $n^2 + 2n$  contraintes. Il existe plusieurs autres modèles de ce type dont celui de Bazaraa et Sherali [Baz 80] qui définissent :

$$g_{ijkl} = [a_{ij} + a_{kl} / (m-1)] + f_{ik} \cdot d_{jl} + f_{kl} \cdot d_{ij} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 y'_{ijkl} = x_{ij} \cdot x_{kl} \quad \text{pour} \quad & i = 1, 2, \dots, n-1 \\
 & k = i+1, \dots, n \\
 & l, j = 1, 2, \dots, n ; l <> j
 \end{aligned} \tag{19}$$

Le problème quadratique en variables zéro-un équivalent au QAP est :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n \sum_{k=i+1}^n \sum_{l=1}^n g_{ijkl} \cdot y'_{ijkl} \tag{20}$$

sous les contraintes (2), (3), (4) et :

$$\sum_{k=i+1}^n \sum_{\substack{l=1 \\ l <> j}}^n y'_{ijkl} - (n-i) \cdot x_{ij} = 0 \quad \forall i=1, 2, \dots, n-1 \\
 \forall j=1, 2, \dots, n \tag{21}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j <> l}}^n y'_{ijkl} - (k-1) \cdot x_{kl} = 0 \quad \forall k=2, \dots, n \\
 \forall l=1, 2, \dots, n \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 y'_{ijkl} & \leq 1 & \forall i=1, 2, \dots, n-1 \\
 & & \forall k=i+1, \dots, n \\
 & & \forall j, l=1, 2, \dots, n ; j <> l
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 y'_{ijkl} & \geq 0 & \forall i=1, 2, \dots, n-1 \\
 & & \forall k=i+1, \dots, n \\
 & & \forall j, l=1, 2, \dots, n ; j <> l
 \end{aligned} \tag{24}$$

Nous remarquons que les équations (2)-(4) et (20)-(24) ont  $n^2$  variables zéro-un,  $n^2(n-1)^2/2$  variables continues et  $2n^2$  contraintes.

### III) Théorie des graphes.

Dans la formulation par la théorie des graphes, on suppose que

l'opportunité de placer chaque paire de postes de travail adjacents l'un à l'autre est connue [Fou 76]. Si :

- $G = (V, E)$  : un graphe valué avec :
  - \*  $V$  : ensemble de sommets (postes de travail),
  - \*  $E$  : ensemble d'arcs (flux).
- $w_{ij}$  : le taux de proximité indiquant le désir de placer le poste de travail  $i$  adjacent au poste de travail  $j$ .
- $N$  : ensemble des paires de postes de travail qui doivent être obligatoirement adjacents.
- $F$  : ensemble des paires de postes de travail qui ne doivent pas être adjacents.

$E' = \{ (i, j) : x_{ij}=1, (i, j) \in E \}$  avec

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le poste de travail est adjacent à } j; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

alors la formulation par la théorie des graphes est :

$$\text{Max } \sum_{i \in E} \sum_{j \in E} w_{ij} \cdot x_{ij}$$

sous les contraintes :

$$x_{ij} = 1$$

$$\forall (i, j) \in N$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall (i, j) \in F$$

$(V, E' \cup N)$  est un graphe plan.

**ANNEXE B**  
**LOGICIELS D'AGENCEMENT**

## TABLE DES MATIERES.

	page
<b>I LOGICIELS DE CONSTRUCTION.....</b>	<b>139</b>
1.1 RMA Comp 1.....	139
1.2 HC66.....	139
1.3 MAT.....	140
1.4 LSP.....	140
1.5 FATE.....	141
1.6 INLAYT.....	141
1.7 FLAT.....	142
<b>II LOGICIELS D'AMELIORATION.....</b>	<b>143</b>
2.1 HC63-66.....	143
2.2 COL.....	143
2.3 FRAT.....	144
2.4 Algorithme révisé d'Hillier.....	145
<b>III LOGICIELS MIXTES.....</b>	<b>146</b>
3.1 FLAC.....	146
3.2 Méthode de Elshafei.....	146

Nous présentons dans cette annexe un ensemble de logiciels moins connus car d'utilisation moins fréquente.



## **I) Logiciels de construction.**

### **1.1) RMA Comp I**

Comme CORELAP, RMA Comp 1 (Muther et Mc Pherson [Muth 70]) place le poste de travail possédant un taux de proximité le plus élevé au centre de l'agencement. Les postes de travail aux taux de proximité les plus élevés sont ensuite ajoutés à l'agencement en fonction de leurs relations avec les postes de travail assignés et non assignés. Par exemple, lorsque l'on place le poste  $i$  dans l'agencement, il subsiste suffisamment d'espace à gauche pour le poste de travail  $j$ , non encore placé et qui possède un taux de proximité élevé avec  $i$ . A chaque étape une carte des réseaux de relations est établie pour s'assurer de la nécessité (ou de la non nécessité) de placer deux postes de travail l'un à côté de l'autre (ou non) est satisfaite.

### **1.2) HC 66.**

Hillier et Connors [Hil 66] ont suggéré l'élaboration d'un algorithme HC66 de construction et d'amélioration basé sur un algorithme de Hillier (63) (HC 66 modifie l'algorithme de Gilmore [Gil 62]), dans les deux cas, à chaque étape  $k$ ,  $k$  postes de travail sont assignés à  $k$  emplacements. Ces  $k$  assignations données, l'algorithme calcule le saut le plus bas et assigne en même temps chacun des postes de travail  $i$ , non placés ( $n-k$ ), à chacun des emplacements libres de  $j$ . Chacun de ces sauts les plus bas est entré comme élément d'une matrice  $H$  dont les lignes représentent les postes de travail non placés et les colonnes les places libres. Pendant qu'il effectue la  $(k+1)$ ème assignation, on sélectionne un élément  $(i, j)$  de la matrice  $H$  et l'on attribue au poste de travail  $i$  l'emplacement  $j$ . La différence entre les algorithmes de Gilmore et HC 66 réside dans le critère de choix de  $(i, j)$  dans la matrice  $H$ . HC 66 utilise

le critère proposé par la méthode approximative de résolution des problèmes de transport de Vogel alors que Gilmore en utilise deux. Dans le premier cas, on détermine le minimum de chaque ligne et colonne de  $H$ , et l'on sélectionne le maximum de ces minimum. Dans le second critère, on résoud le problème d'assignation pour  $H$  et la solution est le plus grand des  $(n-k)$  éléments de  $H$  apparaissant dans le problème d'assignation.

### **1.3) MAT.**

MAT (Edwards et al [Edw 70]) range les paires de postes de travail selon leurs valeurs de flux et les emplacements selon leurs distances. Ils utilisent ces informations pour déterminer un agencement. Il appartient à l'utilisateur d'assigner les postes de travail aux emplacements souhaités. Les concepteurs du MAT ont trouvé qu'en combinant les résultats de MAT à ceux de CRAFT (algorithme d'amélioration), on obtient des solutions de meilleure qualité en un temps de calcul réduit (pour 8 problèmes test communément utilisés dans la littérature), par rapport à celles de CRAFT : MAT permet donc d'améliorer CRAFT.

### **1.4) LSP.**

LSP (Zoller et Adendorff [Zoll 72]) est un simulateur de l'ordre de succession dans lequel les postes de travail doivent être placés dans l'agencement et un mode de construction qui détermine un agencement bidimensionnel pour la succession générée par le simulateur.

Celui-ci est un générateur de nombres pseudo-aléatoires et sa sortie est convertie en une succession de postes de travail. Le mode de construction convertit l'ordre de succession des postes de travail

en un agencement qui est ensuite évalué. Des vérifications déterminent si l'on peut stopper le programme. Par certains aspects LSP ressemble à ALDEP et permet d'évaluer la flexibilité. Cependant celle-ci s'obtient au prix d'un nombre important de calculs.

### **1.5) FATE.**

FATE (Block [Blo 78]) a été élaboré en étendant les principes d'agencement de MAT qui range les paires de postes de travail sur la seule base des valeurs de leur flux. Il en résulte que MAT se révèle incapable de différencier les paires de postes de travail possédant des valeurs de flux identiques et les range aléatoirement. Ce qui aboutit souvent à une solution médiocre. FATE dépasse cette difficulté par l'utilisation de deux critères de rangement des postes de travail, à savoir les valeurs des flux et les taux de proximité.

### **1.6) INLAYT.**

INLAYT est un des algorithmes utilisés dans l'heuristique de O'Brien et Abdel Barr [Obr 80]. Cette heuristique se sert de l'algorithme de construction INLAYT pour générer un agencement initial qui est ensuite amélioré par un algorithme nommé S-ZAKY. L'utilisateur peut accepter, rejeter ou modifier la sortie d'INLAYT et S-ZAKY en utilisant un crayon optique relié à un terminal graphique.

INLAYT groupe les postes de travail par des valeurs de flux évaluées (c'est-à-dire le nombre d'unités de flux multiplié par le coût de transport de l'unité de flux) et éclate les groupes sur un terminal graphique avec un arrêt sur chaque emplacement possible. L'utilisateur répond ensuite en assignant les postes de travail du premier groupe aux emplacements souhaités. La même procédure est

répétée sur les groupes suivants jusqu'à ce que tous les postes de travail aient été placés.

### **1.7) FLAT.**

FLAT (Hegaru et Kusiak [Heg 86]) est un algorithme nécessitant un temps de calcul relativement bas et menant à des résultats de bonne qualité, plus particulièrement en ce qui concerne les problèmes d'agencement où les postes de travail possèdent des surfaces inégales. FLAT utilise la matrice des flux  $[f_{ij}]$ , où  $f_{ij}$  est le flux entre les postes de travail  $i$  et  $j$  et la matrice des distances  $[d_{ij}]$ , où  $d_{ij}$  représente la distance minimale entre les postes de travail  $i$  et  $j$  lorsqu'ils se situent aussi près que possible l'un de l'autre, pour calculer une nouvelle matrice nommée matrice des flux ajustée  $[t_{ij}]$  où  $t_{ij} = f_{ij} \cdot d_{ij}$ . L'algorithme comprend deux phases. Dans la première, un nombre de triplets avec un poids maximum correspondant est sélectionné. Chaque triplet est formé de trois arcs, où chaque sommet représente un poste de travail. Le poids d'un triplet renvoie à la somme des valeurs des flux entre chaque paire de sommets appartenant à un triplet. Le nombre de triplets choisi dépend du nombre de postes de travail qui sont représentés comme étant les sommets des triplets. Les triplets sont ensuite rangés dans une liste  $L$  selon leur poids décroissant. Dans la seconde phase, les assignations des postes de travail sont donnés par l'utilisation de la liste  $L$  et d'un vecteur d'assignation correspondant à chaque poste de travail. Celui-ci indique si le poste de travail  $i$  doit être assigné à un emplacement spécifique, s'il doit être adjacent avec d'autres postes de travail (critères technologiques) et si sa forme peut être modifiée dans l'agencement final. L'assignation des postes de travail est définie comme suit. Les triplets rangés dans la liste

I sont sélectionnés l'un après l'autre, en commençant par le premier. Les sommets de ces triplets sont ensuite placés dans l'agencement selon le flux entre les sommets du triplet et seulement si certains de ces sommets ont déjà été assignés.

## **II) Logiciels d'amélioration.**

### **2.1) HC 63-66.**

Hillier et Connors [Hil 66] ont proposé une modification du H 63. Dans le nouvel algorithme,  $k$  mouvements du poste de travail ( $1 \leq k \leq n$  où  $n$  représente le nombre de postes de travail) sont permis. Contrairement à H 63 qui permet la seule permutation des postes de travail adjacents, HC 63-66 permet également la permutation de postes de travail non adjacents en même temps qu'il limite ces permutations à des postes de travail disposés sur une ligne verticale, horizontale ou diagonale. En commençant par le  $(k-1)$ ième mouvement, l'algorithme évolue en faisant décroître la valeur de  $k$  lorsqu'aucune réduction de coût n'est trouvée. Quand  $k=1$  et qu'il n'y a pas de déplacement entraînant une réduction de coût, la procédure est stoppée ou répétée autant que nécessaire. Comme H 63, HC 63-66 ne s'applique qu'aux problèmes où les postes de travail occupent la même surface.

### **2.2) COL.**

Vollman et al [Vol 68] détermine pour chaque poste de travail  $i$  le coût  $p_i$  du flux du poste de travail  $i$  à tous les autres, situés à  $\alpha$  ou plus d'unités de  $i$  ( $\alpha$  est fixé par l'utilisateur). Ce coût  $p_i$  constitue le point de départ pour sélectionner deux postes de travail  $(m, n)$  qui sont les plus sujets à des échanges. Puis il étudie les échanges entre  $m$  et tous les autres postes de travail pour déterminer la réduction du coût. Si celle-ci est possible, on effectue

l'échange. Lorsque l'on a étudié les échanges de  $m$  on examine ceux de  $n$ .

Comme précédemment si la condition d'infériorité de coût est réalisée, on procède à l'échange. Les  $p_i$  sont alors recalculés et l'on répète le cycle jusqu'à ce que l'on trouve un ensemble de  $p_i$  pour lequel les échanges des postes de travail  $m$  et  $n$  aboutissent à de meilleures solutions. Lorsque la procédure est terminée, une subroutine vérifie toutes les permutations pour déterminer si l'on peut encore améliorer le coût. Dans le cas contraire le programme est terminé. La procédure COL donne des solutions aussi rapidement que HC 66 et nécessite moins de mémoire.

### **2.3) FRAT.**

FRAT (Khalil [KHA 73]) est un algorithme qui utilise les principales structures d'autres algorithmes tels HC 63-66, CRAFT, COL, etc... Il détermine la différence  $d$ , entre les distances les plus longues et les plus courtes, de deux postes de travail de l'agencement initial. Ensuite l'algorithme exécute deux procédures, l'une détermine le coût total, l'autre l'échange de postes de travail. Dans la première, il calcule le coût total  $p_i$  du flux du poste de travail  $i$  à tous les autres qui se situent à  $d$  ou plus d'unités. Les deux postes de travail  $m$  et  $n$  correspondant aux premiers et deuxièmes coûts les plus importants de  $p_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) sont considérés comme candidats à la procédure d'échange. Celle-ci est définie comme étant la réduction maximale du coût de l'échange de chacun des postes de travail avec  $m$ . On répète la procédure d'échange jusqu'à ce qu'il soit impossible de baisser davantage le coût. Lorsqu'il n'est plus possible de le réduire, la procédure de permutation est répétée comme précédemment, mais cette fois elle

s'effectue sur le poste de travail  $n$ . Puis  $d$  est redéfini par une autre valeur  $d'=d-1$ , où  $1$  est la distance la plus courte entre les centres de deux postes de travail. La procédure de détermination du coût total et les procédures de permutation sont appliquées à l'agencement courant pour la nouvelle valeur de  $d'$ , jusqu'à ce qu'elle soit inférieure à  $1$ . Dans la phase finale de l'algorithme, il prend en compte les permutations par paire diminuant le coût. FRAT peut uniquement s'appliquer aux agencements où les postes de travail sont de superficie égale.

#### **2.4) Algorithme révisé d'Hillier.**

L'algorithme créé par Picone et Wilhelm [Pic 84] utilise H 63 pour améliorer une solution initiale donnée et poursuit ensuite en considérant des perturbations de mode-4 (une perturbation de mode- $k$  prend en compte la permutation de  $k$  postes de travail à un moment donné). Si l'application de la perturbation de mode-4 mène à une solution améliorée, il applique une méthode appelée PERTURB. Sinon, une solution améliorée est produite par H 63. PERTURB considère des perturbations de mode-3 et mode-4. Après cette méthode, on applique H 63 à la solution courante. Si la solution qui en résulte rencontre un critère  $C$  spécifié par l'utilisateur, on applique une fois de plus la perturbation de mode-4. Si l'on obtient alors une réduction de coût, on applique de nouveau PERTURB à la solution courante. S'il n'y a pas de réduction de coût, l'algorithme arrête le programme. Si le critère spécifié  $C$  n'a pas rencontré le résultat obtenu par PERTURB, l'analyste essaie d'améliorer la solution courante. Si une solution améliorée n'apparaît pas, il arrête le programme.

Comme l'algorithme révisé de Hillier utilise H 63, il produit des solutions de qualité égale ou supérieure à celles de H 63, mais

son temps de calcul est également supérieur.

### **III) Logiciels mixtes.**

#### **3.1) FLAC.**

FLAC (Scriabin et Vergin [Scr 85]) est un algorithme en trois étapes. Dans la première, les postes de travail sont localisés de façon à ce que les distances qui les séparent soient inversement proportionnelles aux flux. Dans la seconde, les postes de travail sont assignés selon le principe de l'étape 1, en considérant les contraintes de place. La troisième étape consiste en un ajustement plus fin par le recours à un algorithme de permutation, semblable à FRAT.

#### **3.2) Méthode de Elshafei.**

Elshafei [Els 77] proposa un algorithme qui combine un algorithme de construction et un autre d'amélioration. Le premier emploie deux stratégies. Dans la première, les emplacements sont rangés en ordre croissant de  $R_j$ , où  $R_j$  représente la somme des distances de l'emplacement  $j$  à tous les autres. Les postes de travail sont alors rangés dans l'ordre croissant de  $L_i$ , où  $L_i$  représente le nombre de postes de travail possédant un flux avec  $i$  et la somme des flux arrivant sur  $i$ . A chaque phase de l'assignation utilisant la première stratégie, le poste de travail non assigné possédant le plus grand  $L_i$  est placé à un emplacement libre ayant un  $R_j$  minimum. Dans la seconde stratégie, à chaque étape  $k$ , le poste de travail non assigné possédant le maximum de flux avec les postes de travail déjà assignés à l'étape  $k-1$ , est assigné à un emplacement inutilisé qui augmente le moins possible le coût total. Un agencement est obtenu par l'utilisation de ces deux stratégies est peut être amélioré par



un algorithme d'amélioration.

**ANNEXE C**  
**AGENCEMENT DES MAGASINS**

**TABLE DES MATIERES.**

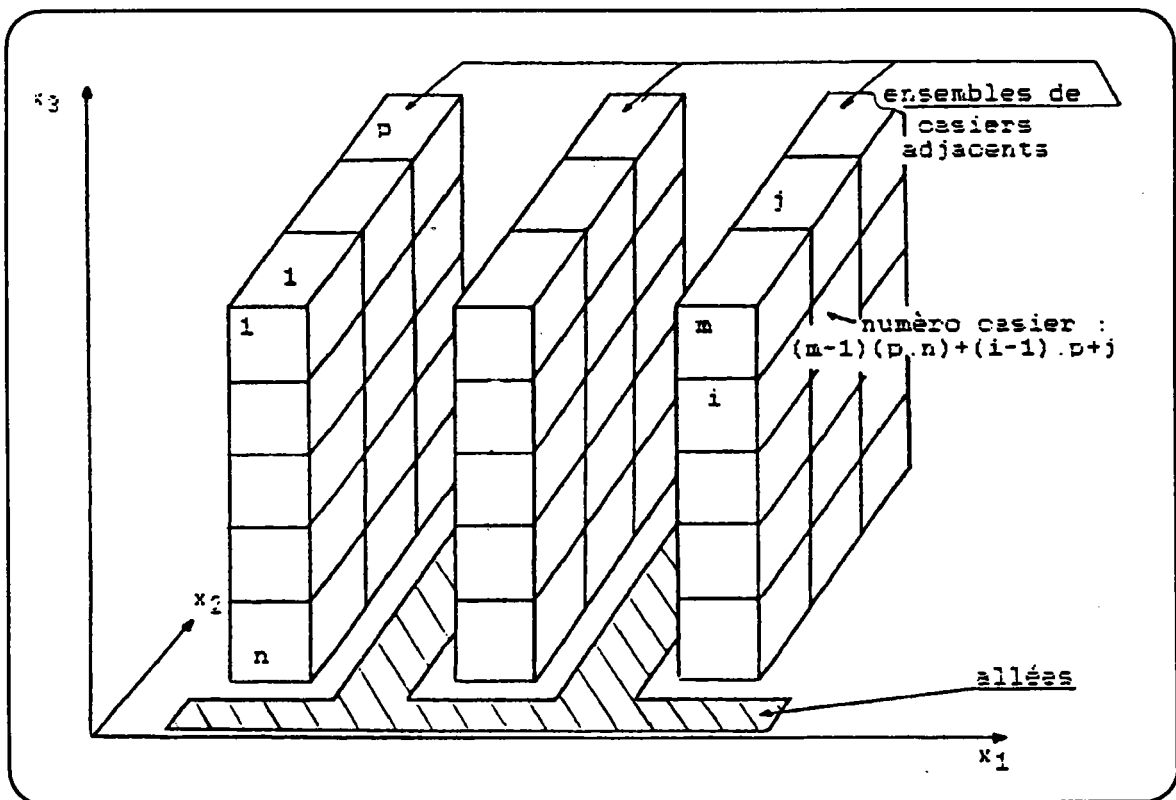
	page
<b>I Modélisation mathématique.....</b>	<b>150</b>
1.1 Définition du problème.....	150
1.2 Modélisation du problème.....	151
1.2.1 Définition des distances caractéristiques.....	151
1.2.2 Formulation mathématique.....	154

# I) Modélisation mathématique.

## 1.1) Définition du problème.

Soit un magasin (figure C.1) défini par :

- plusieurs ensembles de casiers adjacents (1 à m) représentant  $Q$  places disponibles pour les produits,
- un ensemble d'allées pour le système de manutention,
- un système de picking pouvant palétiser plusieurs produits.



**Figure C.1.** : Modélisation d'un magasin.

Soit un nombre  $L$  de produits définis par :

- leur position dans le magasin 3D, c'est-à-dire leur numéro de casier d'appartenance  $NC_i$ ,
- leur poids  $P_i$ ,

- leur nuisance  $N_{ij}$ .

- Remarques :**
- i et j représentent les produits,
  - le nombre de places disponibles Q peut être supérieur ou égal au nombre L de produits ( $Q \geq L$ ),
  - tous les casiers sont identiques ainsi que les ensembles,
  - un seul produit sera affecté par casier (stockage dédié).

## **1.2) Modélisation du problème.**

Le problème se ramène à la recherche d'un ensemble E de L singletons de la forme,

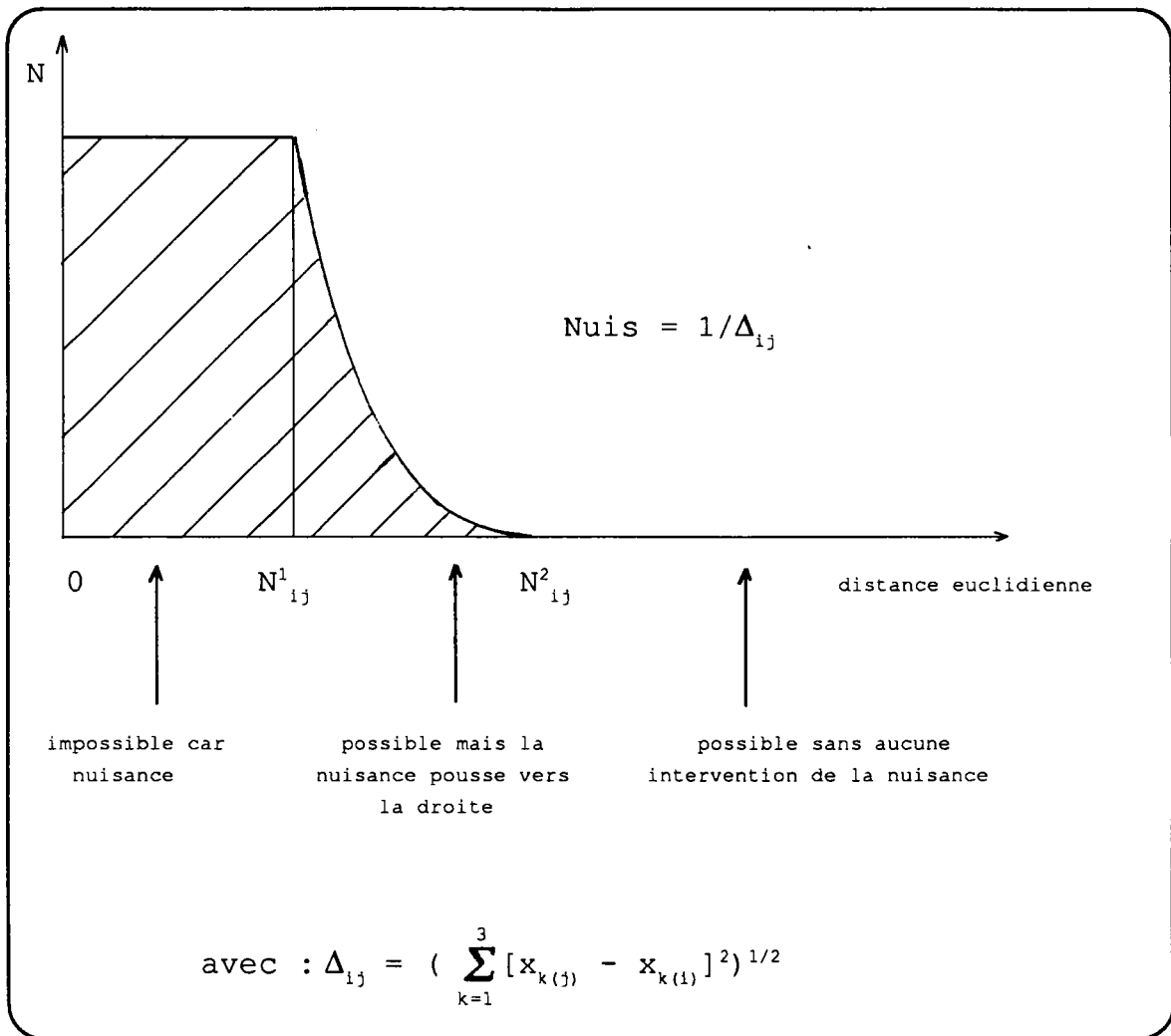
$$E = \{NC_i\}$$

où pour tout i l'on connaît le casier d'appartenance.

### **1.2.1) Définition des distances caractéristiques.**

#### **a) Echelle des nuisances.**

On définit un seuil de nuisance  $N^1_{ij}$  et un seuil de non nuisance  $N^2_{ij}$  (par exemple : on désure que les parfums soient éloignés des vêtements). Ces deux seuils dépendent des distances euclidiennes, notées  $\Delta^2_{ij}$ , entre les centres des casiers et nous permettent de tracer une échelle des nuisances des produits deux à deux (figure C.2).



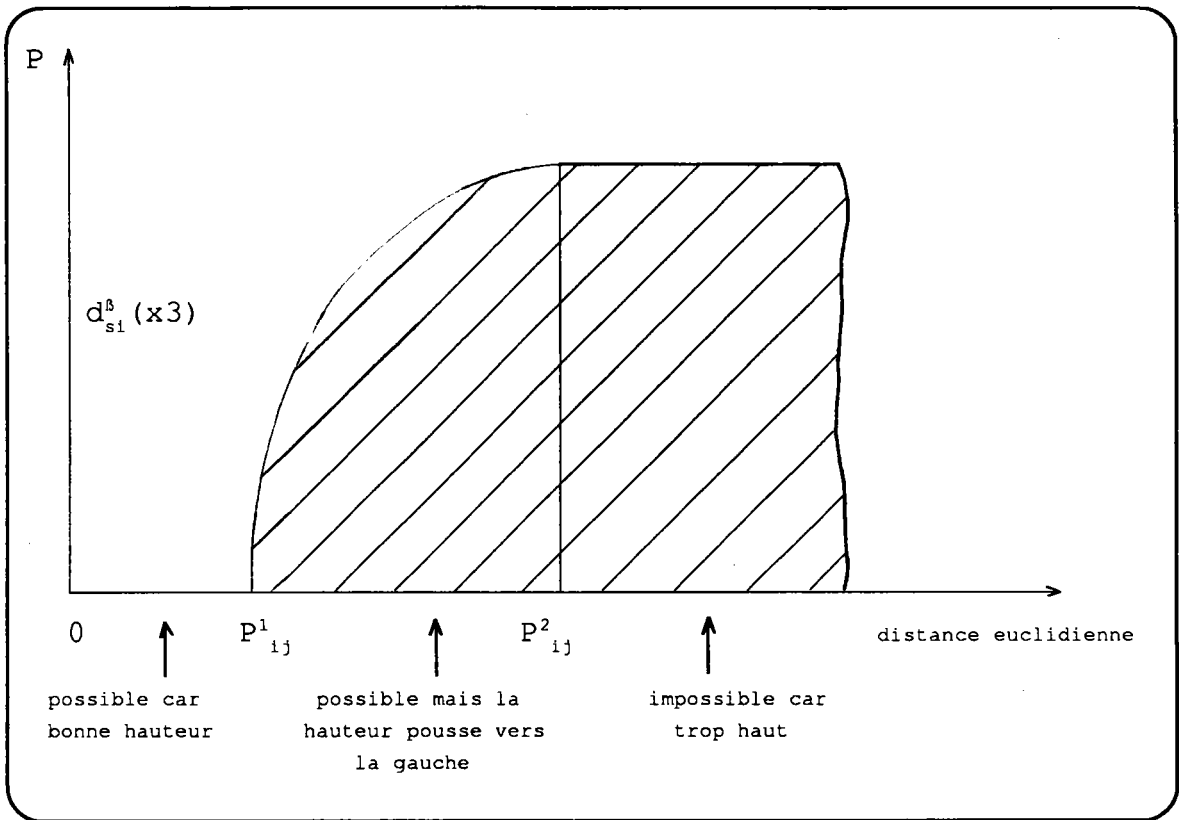
**Figure C.2** : Détermination de l'échelle de nuisance.

### **b) Echelle de position d'un produit suivant l'axe vertical.**

De la même manière nous définissons (figure C.3) un seuil de hauteur possible  $P^1_{sj}$  et un seuil de hauteur impossible  $P^2_{sj}$ , avec :

$$P^j_{si} = \text{fct}(P_i)$$

Ces deux seuils dépendent de la distance verticale, notée  $d_{si}$  (x3), entre le sol (s) et le casier où sera affecté le produit i.



**Figure C.3** : Détermination de l'échelle de position verticale.

### c) Echelle de position suivant l'axe horizontal.

(Fréquence de commande d'un article.)

Comme au paragraphe précédent nous définissons un seuil de distance possible  $A^1_{ai}$  et un seuil de distance impossible  $A^2_{ai}$ , avec :

$$A^j_{ai} = \text{fct}(\text{Pr } A_i)$$

( $\text{Pr } A_i$  : nombre de fois que le produit  $i$  a été commandé). Ces deux seuils dépendent de la distance horizontale notée  $d_{ai}(x2)$ , entre l'allée principale ( $a$ ) et le casier où est affecté le produit  $i$  (figure C.4).

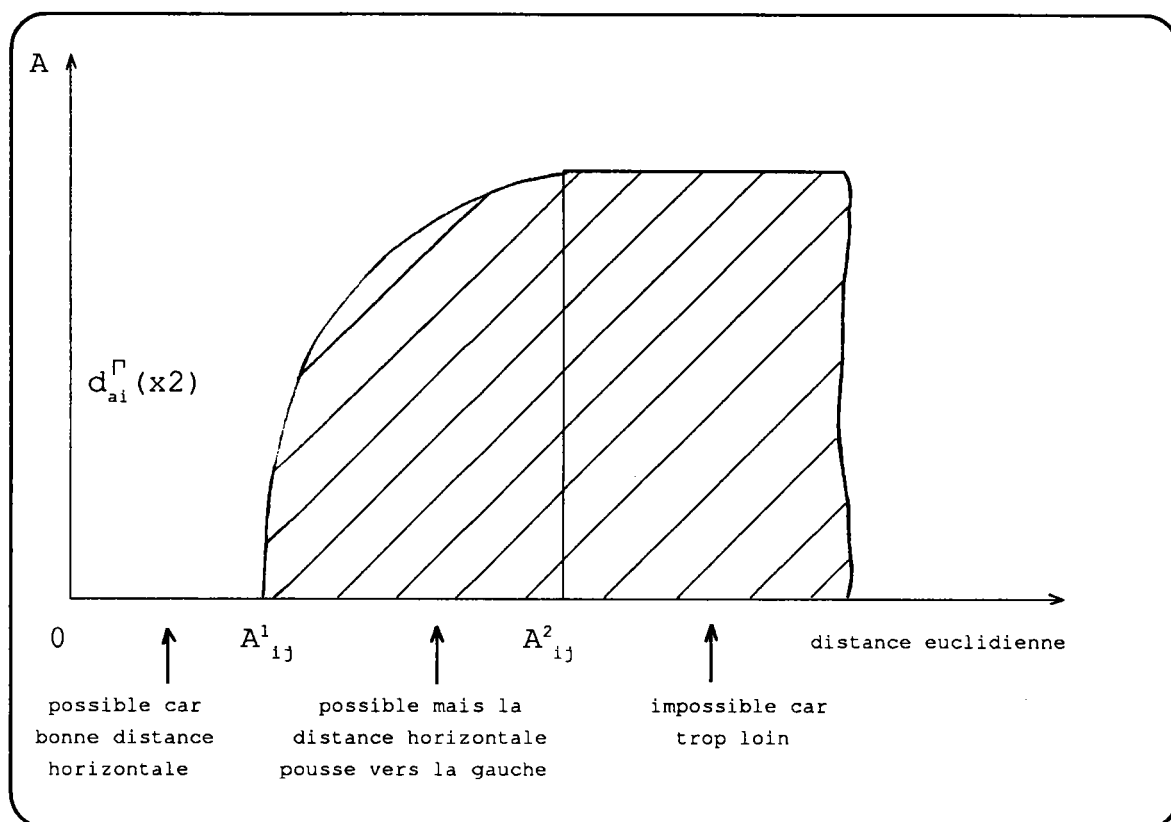


Figure C.4 : Détermination de l'échelle de profondeur.

## 1.2.2) Formulation du problème.

### a) Contraintes.

#### - de nuisance

$$\Delta_{ij}(E) \geq N^1_{ij} \quad \forall i, j=1, \dots, L$$

#### - de poids

$$d_{si}(x3) \leq P^1_{si} \quad \forall i=1, \dots, L$$



- de proximité allée centrale

$$d_{ai}(x_2) = < A^1_{ai} \quad \forall i=1, \dots, L$$

b) Fonction objectif.

$$C = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \left\{ \sum_{k=1}^Q \sum_{l=1}^Q \lambda \cdot (b_{ij} \cdot t_{kl}(E) \cdot F_{ik} \cdot F_{jl}) + (1-\lambda) \cdot N_{ij}(E) \right\}$$

avec :

$$b_{ij} = \frac{n_{ij}^2}{n_i \cdot n_j}$$

$$t_{kl} = \sum_{i=1}^3 (d_{ki}(x_i) \cdot MT_i)$$

$$d_{kl} = \sum_{i=1}^3 (x_{i1} - x_{ik})$$

$$\sum_{i=1}^n F_{ik} = 1 \quad \forall k=1, 2, \dots, Q$$

$$\sum_{k=1}^n F_{ik} = 1 \quad \forall i=1, 2, \dots, L$$

où :

- i et j sont les indices des produits,
- k et l sont les indices des casiers,
- $n_{ij}$  est le nombre de fois que les articles, respec-

- tivement  $i$  et  $j$  ont été commandés simultanément,
- $n_i, n_j$  sont les nombres de fois que les articles, respectivement  $i$  et  $j$  ont été commandés,
  - $b_{ij}$  représente donc le lien, c'est-à-dire le flux du système de manutention entre les articles  $i$  et  $j$ ,
  - $\lambda$  est un facteur de pondération nuisance, coût de transport,
  - $d_{kl}$  est la distance city-bloc entre les casiers  $k$  et  $l$ ,
  - $MT_i$  est le coût de déplacement unitaire du moyen de transport suivant l'axe  $i$ ,
  - $F$  est la co-présence produit-casier,

$$F_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si le produit } i \text{ est affecté au casier } k; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

**ANNEXE D**  
**GAMMES OPERATOIRES DES**  
**COMPTEURS**

**TABLE DES MATIERES.**

	page
I Gamme opératoire des compteurs G40, G65.....	159
II Gamme opératoire des compteurs G25.....	160
III Gamme opératoire des compteurs G10, G16.....	161

# I) Gamme opératoire des compteurs G40, G65.

Poste	Opération réalisée	Eléments nécessaires	Remarque
1	.réalisation des ch. de comptage complètes jusqu'au pré-sertissage des deux coquilles (int. et ext.).	.4 coquilles : AV: int. et ext. AR: int. et ext. .bras oscillant avec membrane rigidifiée, .palier et pied de tige, .grille intérieure, .équerre de montage, .tige avec équerre, .biais.	Bras oscillant avec membrane, tige avec équerre, biais et grille int. sont montés et réalisés sur des autres postes.
2	.sertissage des ch. de comptage.	.2 chambres de comptage pré-serties: AV, AR.	Opération réalisée à la presse. G25, G40, G65 passent sur la même presse.
3	.brasage des coins des ch. de comptage.	.2 chambres de comptage : AV et AR.	
4	.montage des deux ch. de compt. avec la base et l'extrémité du canal	.base du canal .extrémité du canal avec les manivelles, .2 chambres de comptage : AV et AR.	Les manivelles sont montées sur l'extrémité du canal auparavant sur un autre poste.
5	.rodage des surfaces où les tiroirs vont translater, .montage et réglage (équilibre) des bielles et tiroirs.	.mécanisme int. sans tiroirs .2 bielles, .2 tiroirs.	
6	.test sur rampe afin de vérifier le fonctionnement du mécanisme.	.mécanisme intérieur.	Tous les types de compteurs passent sur ce poste.
7	.montage du mécanisme int. avec capot haut et bas	.mécanisme intérieur, .capot haut, .capot bas.	Montage des tubulures sur le capot haut.
8	.test d'étanchéité par immersion.	.compteur G40 ou G65.	

**Tableau D.1** : Fabrication des compteurs G40 et G65.

## II) Gamme opératoire des compteurs G25.

Poste	Opération réalisée	Éléments nécessaires	Remarque
1	.brasage du palier et du pied de tige sur les 2 coquilles extérieures.	.2 coquilles extérieures : AV et AR. .palier et pied de tige.	
2	.montage de la tige dans la coquille et brasage du bras oscillant (et de la membrane avec cette tige).	.tige avec équerre, .bras oscillant assemblé avec membrane rigidifiée, .coquille extérieure avec logement de tige	L'équerre réalisée est montée sur la tige à un autre poste. L'assemblage du bras oscillant, de la membrane, des plaques, est réalisé sur un autre poste. Deux postes «2» réalisent les mêmes opérations (séchage).
3	.montage de la coquille int. avec la coquille ext. et pré-sertissage.	.biais .coquille intérieure .coquille extérieure équipée de la membrane.	Les biais sont réalisés sur une presse.
4	.sertissage des chambres de comptage.	.2 chambres de comptage : AV et AR.	Opération réalisée à la presse. Les compteurs G25, G40 et G65 passent sur cette presse.
5	.brasage des coins des chambres de comptage	.2 chambres de comptage : AV et AR.	Il n'existe pas d'emplacement fixe pour exécuter cette opération; elle est généralement effectuée là où il y a de la place.
6	.montage des 2 ch. de comp. avec la base du canal et l'extrémité du canal	.base du canal, .extrémité du canal avec les manivelles, .2 chambres de comptage : AV et AR.	Les manivelles sont montées sur l'extrémité du canal sur un autre poste.
7	.rodage de la surface où vont translater les tiroirs, .montage et réglage (équilibrage) des bielles et tiroirs.	.mécanisme intérieur sans tiroir, .2 bielles, .2 tiroirs.	
8	.montage du capot haut sur le mécanisme intérieur.	.capot haut, .mécanisme intérieur.	Les compteurs G16 passent sur ce poste. Le montage des tubulures sur le capot haut est réalisé auparavant sur un autre poste.
9	.test sur rampe permettant la vérification du fonctionnement du mécanisme.	.mécanisme intérieur avec capot haut.	Tous les types de compteurs passent par ce poste.
10	.vissage du capot bas avec le reste du compteur.	.capot bas, .mécanisme intérieur avec capot haut.	Les compteurs G16 passent aussi par ce poste.
11	.test d'étanchéité par immersion.	.compteur	

**Tableau D.2** : Fabrication du compteur G25.

### III) Gamme opératoire des compteurs G10, G16.

Poste	Opération réalisée	Eléments nécessaires	Remarque
1	.brasage du canal de sortie et de l'équerre de montage sur la coquille intérieure, .brasage du canal de sortie, de l'équerre de montage, du palier et du pied de tige sur la coquille extérieure.	.4 coquilles : AV : int. et ext. AR : int. et ext., .palier et pied de tige, .équerre de montage, .canal de sortie.	Deux postes «1» réalisent les mêmes opérations.
2	.brasage de la grille int. sur les coquilles ext.	.coquille ext. avec logement de tige, .grille intérieure.	La grille intérieure est réalisée sur un autre poste.
3	.montage de la tige dans la coquille extérieure et brasage du bras oscillant avec cette tige.	.tige avec équerre, .bras oscillant, .coquille extérieure avec logement de tige.	La tige avec équerre est réalisée sur des autres machines qui fournissent des éléments pour plusieurs postes.
4	.montage de la membrane rigidifiée sur le bras oscillant, .pré-sertissage des deux coquilles ext. et int.	.2 coquilles intérieures : AV et AR. .coquille ext. avec bras oscillant .membrane rigidifiée avec des plaques .biais	Coquille int. alimentant ce poste arrive au poste «1». Membrane rigidifiée réalisée sur un poste différent avec les membranes des autres compteurs. Fabrication des biais sur presse.
5	.sertissage des chambres de compteur.	.2 chambres de compteur pré-serties : AV et AR.	Opération réalisée sur la presse.
6	.brasage des coins de chambres de compteur, .montage des 2 ch. de compt. avec la base du canal et l'extrémité du canal.	.base du canal, .extrémité du canal avec les manivelles, .2 chambres de compteur AV et AR.	Les manivelles sont montées sur l'extrémité du canal sur un autre poste.
7	.rodage de la surface où vont translater les tiroirs, .montage et réglage (équilibrage) des bielles et tiroirs.	.mécanisme int. sans tiroir, .2 bielles, .2 tiroirs.	
8	.montage du capot haut sur le mécanisme intérieur.	.capot haut, .mécanisme intérieur.	Les compteurs G25 passent sur ce poste. Le montage des tubulures sur le capot haut est réalisé auparavant sur un autre poste.
9	.test sur rampe permettant la vérification du fonctionnement du mécanisme.	.mécanisme intérieur avec capot haut.	Tous les types de compteurs passent par ce poste.
10	.vissage du capot bas avec le reste du compteur.	.capot bas, .mécanisme intérieur avec capot haut.	Les compteurs G25 passent aussi sur ce poste.
11	.test d'étanchéité par immersion.	.compteur	

**Tableau D.3** : Fabrication des compteurs G10 et G16.