

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie industriel

Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par : TAIBI Amani et DJERBOUA Wafaa

Thème

**Optimisation mathématique d'une  
disposition des ateliers sur plusieurs  
lignes**

Soutenu publiquement, le 03/07/2022 , devant le jury composé de :

Mme KOULOUGHLI Imen	MCB	ESSA. Tlemcen	Présidente
Mme OUHOUD Amina	MCB	ESSA. Tlemcen	Encadrante
M.MALIKI Fouad	MCB	ESSA. Tlemcen	Co-Encadrant
M.BENNEKROUF Mohammed	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M.BRAHAMI Mustapha	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2021 /2022

# Remerciement

Merci à Dieu qui nous a donné la santé, la force et l'ambition pour réaliser ce travail. Notre première gratitude va à notre encadrante madame Amina OUHOUD pour son encadrement exceptionnel, pour le temps qu'elle nous a consacré, pour ses efforts, pour ses précieux conseils et sa patience tout le long de ce chemin.

Un remerciement particulier à monsieur Fouad MALIKI notre responsable de filière pour avoir contribué à ce travail, mais surtout pour ses efforts au cours des trois dernières années, pour avoir créé un environnement de travail formidable, pour nous avoir guidé et nous avoir motivé.

Nos remerciements également à monsieur Mohammed BENNEKROUF, mademoiselle Nabila YALAOUI, et Sara MEGAIZ pour nous avoir aidé et merci à toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste mémoire.

# Dédicace

*I would like to dedicate my work to :*

*My parents Abbassiya TAOUSSER and Baghdad Taibi for supporting me throughout my school career, for providing me with everything they could so that I could be what I am today, words cannot express the gratitude I have for them and I hope I made them proud.*

*To my husband Oussama AZZI, the one who has always been there for me, to support me in my moments of weakness and who has spent hours listening to the problems I encountered while doing this work,*

*To my sisters Sarah and Wafaa , to my brother Yasser,*

*To my second family Yasmine, Wafaa, Alya, Imen , Ghezlane and Rim the family with whom I lived these last 3 years in Tlemcen in the university residence and with whom I studied in the same class , we did everything together and I know that I will miss these moments.*

*to my best friend Sihem Toumi my soul mate who has always been by my side*

*to all my friends Karim GEROUAZE , Amine ABID , Amine GHENIM .*

*"Amani TAIBI"*

# Dédicace

*Louange à Dieu tout-puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu.*

*Je dédie ce travail :*

*À mon très cher père,*

*Je veux honorer l'homme que vous êtes, Votre soutien a été une lumière dans tout mon parcours, Je tiens à vous remercier pour votre amour, votre affection et la confiance que vous m'avez accordée. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que vous avez fournis pour mon éducation et ma formation. Je vous aime papa.*

*À ma chère mère,*

*Vous êtes la chose la plus précieuse au monde pour moi. Aucune dédicace ne peut exprimer tout mon amour et ma gratitude. Merci de faire l'impossible pour moi et d'être toujours là pour me rendre heureuse, merci pour votre soutien, vos encouragements et votre compréhension. Vous êtes la vie pour moi, vos prières sont ce qui m'a poussé et me pousse toujours à suivre la voie de l'excellence, à rêver et à réaliser mes rêves.*

*À ma chère sœur Nacera, à mon cher frère Salemen,*

*Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour, pour donner du goût et du sens à notre famille. Je vous exprime ma plus profonde admiration. Que notre fraternité soit encore plus forte.*

*À mon neveu Anes,*

*Tes petites mains, tes sourires, tes yeux brillants sont incomparables. Tu as apporté beaucoup de bonheur à notre famille. Je t'aime*

*À ma famille,*

*Mes grands-parents, Mes chers oncles, tantes et cousins. Votre confiance en moi, vos encouragements, m'ont donné la force de continuer.*

*À ma deuxième famille,*

*Hanifa yasmine, alya, amani, imen, Ghezlen, Rym. Merci d'exister, mon monde sans vous serait sans saveur. Je ne trouve pas les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes sentiments, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur lesquelles je peux compter.*

*À mes amis,*

*Amine ABID, GUERROUAZ Abd'El Krim, Mouamed'El Amine GHENIM, en témoignage de l'amitié qui nous unit et en souvenir de tous les moments passés ensemble, je vous dis merci et je vous souhaite du succès et du bonheur.*

*Ce travail est dédié à toutes les personnes qui ont apporté leur aide et leurs encouragements. J'implore le tout-Puissant de vous accorder une bonne santé et une longue et heureuse vie. "Wafaa DJERBOUA"*

## Résumé

Dans le monde industriel, et plus particulièrement dans les systèmes de fabrication, 15 à 70 % des coûts totaux de fabrication sont attribués aux coûts de manutention, ces coûts peuvent être réduits de 10 à 30 % en choisissant un aménagement efficace des installations. le problème de conception des installations (FLP) est un problème d'optimisation qui consiste à trouver le meilleur emplacement des départements (machines) afin de minimiser la distance total parcourue par un system de manutention , ce qui réduira finalement les coûts. Dans ce travail, nous avons développé un modèle mathématique linéaire pour le problème de l'agencement des installations à plusieurs rangées dans lequel les départements sont assignés à 3 ou plusieurs rangées en tenant compte d'un ensemble de contraintes, nous avons codé ce modèle sur le logiciel CPLEX et nous avons utilisé VBA et des macros dans Excel pour fournir la sortie finale qui est la disposition avec un clic de bouton.

**Mots-clés** FLP, flux, distance, TCR, optimisation

## Abstract

In the industrial world, especially in manufacturing systems, 15-70 % of total manufacturing costs are attributed to material handling costs, these costs can be reduced by 10-30 % by choosing an efficient facility layout. The facility Layout problem (FLP) is an optimization problem that consists of finding the best location of departments (machines) in order to minimize the total distance traveled by a material handling system, which will eventually reduce costs. In this work, we developed a linear mathematical model for the multi-row facility layout problem in which departments are assigned to 3 or more rows ,taking into account a set of constraints, we have coded this model on CPLEX software and used VBA and macros in Excel to provide the final layout with a click of button .

**KEYWORDS** : FLP, flow, distance, TCR, optimization

## ملخص

في العالم الصناعي ، وخاصة في أنظمة التصنيع ، تُحزى 15-70٪ من إجمالي تكاليف التصنيع إلى تكاليف نقل المواد ، ويمكن خفض هذه التكاليف بنسبة 10-30٪ عن طريق اختيار تصميم مرفق فعال. مشكلة تخطيط المنشأة هي مشكلة تحسين تتكون من العثور على أفضل موقع للأقسام (الآلات) لتقليل المسافة الإجمالية التي يقطعها نظام نقل المواد ، مما يؤدي في النهاية إلى تقليل التكاليف. في هذا العمل ، طورنا نموذجًا رياضيًا خطيًا لمشكلة تخطيط المنشأة متعددة الصفوف حيث يتم تعيين الأقسام إلى 3 صفوف أو أكثر بهدف تقليل المسافة الإجمالية المقطوعة مع مراعاة مجموعة من القيود. قمنا بترميز النموذج الرياضي باستخدام برنامج " CPLEX " و استخدمنا " VBA " و " EXECL " في برنامج " CPLEX " للحصول على التخطيط النهائي بنقرة زر فقط

**الكلمات المفتاحية:** FLP، تدفق، مسافة، TCR ، التحسين.

# Table des matières

<b>List of Figures</b>	<b>9</b>
<b>List of Tables</b>	<b>11</b>
<b>Introduction</b>	<b>12</b>
<b>1 Généralités sur Facilities Design</b>	<b>15</b>
1.1 Introduction . . . . .	15
1.2 Définition du Facilities Design . . . . .	16
1.3 Problème statique d'aménagement des installations (SFLP) . . . . .	16
1.4 Problème d'aménagement dynamique des installations (DFLP) . . . . .	16
1.5 Les objectifs majeurs d'une bonne Facilities design . . . . .	16
1.6 Autres définitions . . . . .	17
1.6.1 Des départements de surface égale . . . . .	17
1.6.2 Des départements de surface inégales . . . . .	17
1.6.3 Produit . . . . .	17
1.6.4 Processus . . . . .	17
1.6.5 Planning . . . . .	18
1.6.6 Localisation de l'usine . . . . .	18
1.7 Facteurs influençant l'aménagement . . . . .	18
1.7.1 Variété et volume des produits . . . . .	18
1.7.2 La forme et les dimensions de l'installation . . . . .	20
1.7.3 Mouvement de flux . . . . .	20
1.7.4 Les système de manutention des matériaux (MHS) . . . . .	21
1.8 Configuration de la disposition . . . . .	23
1.8.1 Une seule rangée (SRFLP) . . . . .	23
1.8.2 Multi-rangées . . . . .	23
1.8.3 La disposition en boucle . . . . .	24
1.8.4 Champ ouvert . . . . .	24
1.8.5 Multi-étages . . . . .	24
1.9 Analyse des équipements et des Produits . . . . .	24
1.9.1 Liste des produits . . . . .	25
1.9.2 Diagrammes d'assemblage . . . . .	25

1.9.3	Liste des matériaux . . . . .	26
1.9.4	Diagramme de précédences . . . . .	26
1.9.5	Feuille de route . . . . .	27
1.9.6	Le diagramme du processus d'opération . . . . .	27
1.9.7	Dessin technique . . . . .	28
1.9.8	L'organigramme cartographie des processus . . . . .	29
1.9.9	Acheter ou fabriquer . . . . .	29
1.10	Besoin en équipements . . . . .	30
1.11	Besoin en personnel . . . . .	33
1.12	Données nécessaire pour mettre en place une disposition : . . . . .	33
1.13	Données de flux . . . . .	33
1.14	Types de données . . . . .	33
1.14.1	Donnés qualitatives . . . . .	33
1.14.2	Données quantitatives . . . . .	34
1.15	Mesures des distances . . . . .	35
1.15.1	La distance euclidienne . . . . .	35
1.15.2	La distance euclidienne carrée . . . . .	35
1.15.3	La distance Rectiligne . . . . .	35
1.15.4	La distance de Tchebychev . . . . .	35
1.15.5	Distance entre les allées . . . . .	36
1.16	L'adjacence . . . . .	36
1.17	État de l'art . . . . .	38
1.18	Conclusion . . . . .	39
<b>2</b>	<b>Les approches de résolution</b>	<b>40</b>
2.1	Introduction . . . . .	40
2.2	L'approche traditionnelle . . . . .	41
2.2.1	Systematic layout planning (SLP) . . . . .	41
2.2.2	Les étapes de la méthode SLP . . . . .	42
2.3	Les algorithmes d'optimisation . . . . .	44
2.3.1	Algorithmes de construction . . . . .	44
2.3.2	Les étapes de La théorie des graphes : . . . . .	46
2.3.3	Algorithme MST (modified spanning tree) pour un problème de disposition d'une seule rangée . . . . .	49
2.3.4	Les étapes de l'algorithme : . . . . .	49
2.4	Les algorithmes d'amélioration . . . . .	52
2.4.1	L'algorithme 2-Opt . . . . .	53
2.5	Les algorithmes hybride . . . . .	56
2.6	Les algorithmes optimal . . . . .	56
2.6.1	L'algorithme Branch and bound . . . . .	57
2.7	Recherche tabou . . . . .	58

2.7.1	L'algorithme de la recherche tabou : . . . . .	58
2.8	Conclusion . . . . .	59
<b>3</b>	<b>Multirow facility layout problem</b>	<b>60</b>
3.1	Introduction : . . . . .	60
3.2	État d'art . . . . .	61
3.3	Définition du problème . . . . .	62
3.3.1	Aménagement de l'installation en double rangée : . . . . .	62
3.3.2	Aménagement de l'installation sur plusieurs rangées : . . . . .	62
3.4	Modèle pour le problème de disposition sur plusieurs rangées avec des départements de surface <b>égale</b> . . . . .	63
3.4.1	Le problème d'affectation quadratique (QAP) . . . . .	63
3.5	Modèle pour le problème de disposition sur plusieurs rangées avec des départements de surface <b>inéga</b> le . . . . .	65
3.5.1	ABSMODEL 2 . . . . .	65
3.6	conclusion . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Développement d'un modèle pour le problème de la disposition des installations sur plusieurs rangées</b>	<b>68</b>
4.1	Introduction : . . . . .	68
4.2	Le modèle mathématique . . . . .	69
4.2.1	Expériences et résultats pour OF1 : . . . . .	72
4.2.2	Application du modèle sur des départements à surface égale . . . . .	72
4.2.3	Application du modèle sur des départements à surface inégale . . . . .	76
4.2.4	Expériences et résultats pour OF2 : . . . . .	77
4.2.5	La normalisation des données : . . . . .	79
4.3	Conclusion . . . . .	84
	<b>Conclusion and Perspectives</b>	<b>85</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>87</b>

# Table des figures

1.1	Fixed product layout . . . . .	18
1.2	Process layout . . . . .	19
1.3	Product layout . . . . .	19
1.4	forme régulière et irrégulière des installations. . . . .	20
1.5	backtracking et bypassing. . . . .	21
1.6	Disposition des installations sur une seule rangée. . . . .	23
1.7	Disposition des installations a rangées multiples . . . . .	23
1.8	Disposition des installations en boucle . . . . .	24
1.9	La liste des produits . . . . .	25
1.10	Diagramme d'assemblage d'une bouilloire . . . . .	25
1.11	La liste des matériaux . . . . .	26
1.12	Le diagramme de précédences . . . . .	26
1.13	La feuille de route . . . . .	27
1.14	Le diagramme du processus d'opération d'une bouilloire . . . . .	28
1.15	Le dessin technique . . . . .	28
1.16	L'organigramme cartographie des processus . . . . .	29
1.17	Coût total en fonction du niveau de production (pièces en plastique moulées)	31
1.18	la matrice de flux "de-à" . . . . .	34
1.19	la matrice de flux entre départements . . . . .	34
1.20	Calculs de la distance selon différentes mesures. . . . .	36
1.21	Calculs de distance pour les métriques de distance d'allée et d'adjacence.. . . .	36
1.22	La matrice d'adjacence . . . . .	37
1.23	Disposition finale . . . . .	37
2.1	Les étapes de la méthode SLP . . . . .	41
2.2	la matrice de flux . . . . .	42
2.3	activity relationships . . . . .	43
2.4	Relationship diagram . . . . .	43
2.5	Space Relationship diagram . . . . .	44
2.6	Positionnement des nœuds 3 et 4 en fonction de leur flux maximum . . . . .	46
2.7	Face triangulaire formée en reliant le nœud 2 qui a les plus grands débits avec les nœuds 3 et 4. . . . .	46
2.8	Trois faces formées en plaçant le noeud 1 dans la face triangulaire. . . . .	47

2.9	Trois faces formées en plaçant le nœud 5 dans la face triangulaire 2-1-4. . .	47
2.10	dual graphe d'adjacence planaire maximal . . . . .	48
2.11	Disposition finale obtenue à partir d'un dual. . . . .	48
2.12	matrices de flux . . . . .	50
2.13	matrices de flux $f'_{ij}$ . . . . .	50
2.14	width=15cm . . . . .	53
2.15	matrices de flux et de distance . . . . .	54
2.16	Solution initiale en utilisant 2-opt . . . . .	54
2.17	Solution après avoir échangé les positions des départements 1 et 2 . . . . .	55
3.1	DRFLP avec un système de manutention AGV[] . . . . .	62
3.2	Illustration des variables et paramètres de décision pour le problème de disposition sur plusieurs rangées avec des départements de surface inégale. .	66
4.1	Image 3D d'un robot portique . . . . .	69
4.2	configuration opérationnelle du robot portique. . . . .	69
4.3	Les données d'un exemple de MRFLP avec des départements de surface égale	72
4.4	Résultats d'un exemple de MRFLP avec des départements de surface égale.	73
4.5	Affichage du message de confirmation. . . . .	73
4.6	Disposition optimale pour le MRFLP avec 6 départements en utilisant OF1 .	74
4.7	les données de l'algorithme 2 opt . . . . .	75
4.8	Les résultats de l'algorithme 2-OPT. . . . .	75
4.9	Disposition optimale pour le MRFLP avec 6 départements donnée par OF1 et l'algorithme 2-OPT . . . . .	75
4.10	Les données d'un exemple de MRFLP avec des départements de surface inégale. . . . .	76
4.11	Les résultats d'un exemple de MRFLP avec des départements de surface inégale. . . . .	76
4.12	Disposition optimale pour le MRFLP avec 6 départements de surface inégale.	77
4.13	Les données pour MRFLP pour la fonction objectif 2 . . . . .	78
4.14	Résultats pour MRFLP pour la fonction objectif 2 . . . . .	78
4.15	Disposition optimale selon la fonction objectif 2 pour 6 départements. . . .	78
4.16	Données pour la fonction multi-objectifs pour les 3 instances. . . . .	80
4.17	Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la première instance . . .	80
4.18	Disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la première instance . . . . .	81
4.19	Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance . .	81
4.20	Disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance.	82
4.21	Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance . .	82
4.22	Disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la troisième instance.	83
4.23	Comparaison entre les 3 instances. . . . .	83

# Liste des tableaux

1.1	Données pour les trois alternatives . . . . .	30
1.2	Tableau qui représente la sortie désirée et lt taux de rebuts . . . . .	32
1.3	Tableau qui représente l'entrée requise . . . . .	32
1.4	Tableau qui représente le nombre de machines . . . . .	32
2.1	Les données, la séquence des étapes que chaque article doit subir. . . . .	50
4.1	Résultats de la résolution de SRFLP avec OF 1, OF 2 et Multi-critere avec 6 départements . . . . .	84

# Nomenclature

AGV	Automated guided vehicle
B&B	Branch and bound
FD	facilities design
FLP	Facility Layout Problem
LAP	linear assignement problem
LAP	linear assignement problem
LB	Lower bound
MHD	Material Handling Device
MHDs	Material handling devices
MHS	Material handling system
MPG	Graphe planaire maximal
MRFLP	Multi Row Facility Layout problem
MRLP	Multi row layout problem
OF1	Objectif function 1
OFV	la valeur de la fonction objectif
PAG	le graphe planaire d'adjacence
QAP	Quadratic assignment problem
QAP	quadratic assignment problem
QAP	quadratic assignment problem
SLP	systematic layout planning
SRFLP	Single row facility layout problem
TCR	Total Closeness Rating
TSP	traveling salesman problem
TSP	traveling salesman problem
UP	Upper bound

# Introduction

En raison de l'évolution de l'industrialisation au cours des dernières années, l'activité économique a changé de nature, ce qui a conduit à une croissance des produits de consommation, en termes de concurrence, les entreprises cherchent à perfectionner leurs processus de fabrication afin d'être en mesure de conquérir le marché de masse avec des produits de haute qualité à faible coût, pour répondre aux différents besoins. Ainsi, les constructeurs commencent à mettre en place des systèmes de plus en plus complexes et coûteux.

En effet, pour permettre à une entreprise de disposer d'une unité de production efficace et rentable, il est essentiel qu'elle adopte les techniques de planification nécessaires pour concevoir et améliorer tous les aspects majeurs de la production, de manière à assurer les positions relatives des différents types de machines afin d'atteindre les objectifs des constructeurs.

De ce point de vue, la problématique de l'aménagement des installations (Facility Layout Problems - FLP) est complexe ; elle nécessite des études spécifiques en utilisant des méthodes de résolution innovantes, dans le but de proposer un aménagement flexible qui exploite un espace minimum tout en s'adaptant aux changements futurs, afin de réduire les coûts de manutention et de modification, ainsi que d'augmenter la productivité et de permettre une bonne gestion des flux entre les départements, tout en assurant aux employés des conditions de travail saines, pratiques et sûres.

Conscient de ce besoin, le travail que nous présentons vise à trouver une solution au problème de l'implantation des installations sur plusieurs lignes en développant un modèle mathématique avec une fonction objectif qui minimise la distance totale parcourue entre les installations et qui maximise la proximité entre elles, tout en respectant les contraintes liées à la réalité industrielle.

# Motivation

Depuis l'introduction de la dernière édition de Manufacturing Facilities, la concurrence industrielle mondiale s'est intensifiée et le problème d'aménagement des installations (FLP) est devenu un sujet de plus en plus étudié. La mesure la plus populaire de l'efficacité du FLP est la minimisation des coûts de manutention, ce dernier point est essentiel car de 20 à 50 % des dépenses totales d'exploitation et de 15 à 70 % des coûts totaux de fabrication sont attribués aux coûts de manutention [1]. Ainsi, trouver le meilleur emplacement contribuera de manière significative à la productivité de la fabrication en termes de coûts et de temps. Le problème de l'agencement des installations à rangées multiples est un cas particulier du FLP, c'est un problème d'optimisation combinatoire qui consiste à affecter un ensemble d'installations à 3 rangées ou plus, Nous avons décidé de travailler sur le Multi row FLP plutôt que sur le FLP à double rangée car ce dernier a été déjà bien étudié. De plus, le type de dispositifs de manutention détermine le type d'agencement et l'un des (MHD) les plus courants est le robot portique qui est utilisé pour transporter des pièces entre les machines, donc le MRFLP est un cas bien connu dans les ateliers aussi, surtout lorsque l'espace est un facteur limité.

Notre contribution porte principalement sur le développement d'un algorithme mathématique qui établit le placement optimal d'un ensemble de départements sur un plan orthogonal afin de minimiser la distance rectiligne totale parcourue entre les départements, de sorte que les départements ne se chevauchent pas et se situent dans la largeur de la rangée donnée et dans l'espace de l'atelier. La minimisation de la distance totale parcourue réduira directement le coût de manutention des pièces et contribuera à l'efficacité du système de production.

# Organisation du mémoire

Notre mémoire se compose de quatre chapitres, qui comportent chacun des parties organisées comme suit :

- Le chapitre 1, qui présente les concepts généraux de la conception des installations, est divisé en trois parties suivantes :
  - La première partie présente un état de l'art des travaux de recherche qui ont déjà été effectués dans ce domaine, la deuxième partie décrit les concepts généraux de la conception des installations et les facteurs qui influencent la conception, la troisième partie est consacrée à l'analyse des équipements ainsi qu'aux données nécessaires aux décisions de conception.
- Le chapitre 2, est consacré aux différentes approches de résolution d'un problème d'aménagement et il est divisé en deux parties :
  - La première propose des approches traditionnelles telles que la SLP et la seconde traite des approches modernes telles que les algorithmes afin de trouver une solution optimale et de respecter les contraintes imposées.
- Le chapitre 3, est consacré à l'étude pratique qui se concentre sur le développement d'un modèle mathématique pour MRFLP, se compose des deux parties suivantes :
  - premièrement, présenter un état de l'art sur MRFLP, mettre en évidence les méthodes exactes de modélisation linéaire ABSMODEL 2, deuxièmement, la formulation des contraintes exploitées dans notre travail de recherche.
- Le chapitre 4 est consacré à la phase pratique qui présente nos hypothèses et le modèle mathématique général avec des contraintes plus réalistes. Le chapitre se termine par les interprétations des résultats de quelques exemples sur plusieurs instances obtenues par le Solveur CPLEX version 12.6 ou certains exemples sont configurés avec EXCEL ainsi, que l'application de l'algorithme 2-OPT dans le cas de surfaces égales.

# Chapitre 1

## Généralités sur Facilities Design

### 1.1 Introduction

L'industrie de 21ème siècle devient de plus en plus difficile, avec un marché instable, les concurrents, l'apparition de nouvelles technologies et beaucoup d'autres facteurs qui rendent la fabrication difficile, pour cela les responsables doivent trouver le meilleur compromis entre (prix, qualité et délai de livraison) pour conserver leur part de marché, la conception des installations d'une entreprise jouent un rôle important dans l'aboutissement de cet objectif, selon **Tompkins et al.** 1996 [18], un bon emplacement des installations contribue à l'efficacité globale des opérations et peut réduire jusqu'à 50% des dépenses totales d'exploitation.[44]

La conception des installations est l'espace où se déroule une activité, qu'il s'agisse d'un système de production ou d'un service et son rôle est d'assurer une circulation fluide des matériaux ou d'informations pour maximiser l'efficacité du système de production ou d'un service et de le rendre aussi flexible que possible avec un coût minimal et en tenant compte de nombreux facteurs appelés contraintes, en effet la conception d'installations est une science aussi antique que l'existence des anciens égyptiens, qui devaient choisir l'emplacement des pyramides en fonction de calculs astrologiques, la même chose s'applique lorsqu'il s'agit d'entreprises et d'usines.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principales tendances qui traitent la problématique de la conception d'aménagements afin de définir les objectifs de notre recherche. Pour ce faire, nous discuterons les généralités du facilities design (FD) et les différentes approches pour résoudre ce type de problème. Puis, nous allons présenter des principaux travaux de recherche dans la littérature afin de clarifier et déterminer les principaux problèmes à résoudre.

## 1.2 Définition du Facilities Design

Facilities design regroupe l'aménagement et la conception des installations d'une usine de fabrication, machine-outil, atelier d'usinage, département ou bien un entrepôt[45]. Cela nécessite aussi de la bonne planification et la bonne maîtrise de flux afin de maximiser l'efficacité du processus et réduire les coûts liés aux installations. En revanche, facilities design se met en lieu d'assurer un impact considérable sur la flexibilité du système et réduire les encombrements et les blocages pour permettre une circulation fluide des personnes et du matériel[43].

## 1.3 Problème statique d'aménagement des installations (SFLP)

Un problème d'aménagement statique considère que le flux entre les départements est stable et reste inchangé sur une longue période de temps et que la demande est constante. Lorsque tous les départements ont la même surface, le problème d'agencement statique peut être modélisé comme un problème d'affectation quadratique (QAP).

## 1.4 Problème d'aménagement dynamique des installations (DFLP)

Un aménagement dynamique nécessite la modification de l'aménagement, ce qui coûte très cher en raison du changement de la gamme de production et de la variation de la demande ainsi que la circulation entre les départements à temps différents. Cela nécessite des approches dynamiques pour le développement de plans d'aménagement.

## 1.5 Les objectifs majeurs d'une bonne Facilities design

L'aménagement des installations doit garantir un flux régulier entre les matières premières, les équipements, la main d'œuvre et la localisation d'espace avec un coût minimal en tenant compte l'activité économique de l'entreprise afin d'assurer un environnement confortable et productif. Un aménagement efficace et efficient des installations peut inclure les objectifs suivants :

- Offrir un espace optimal pour organiser les équipements et faciliter la circulation des marchandises.
- Réduire les déplacements des travailleurs, des matériaux et d'équipements.
- Favorise également la sécurité des installations.

- Flexibilité de la disposition pour accueillir de nouvelles gammes de produits ou pour la mise en œuvre de nouvelles technologies.
- Augmenter la capacité de production de l'organisation.
- Coûts de manutention minimale entre les centres de traitement des installations.
- Coûts de réarrangement minimal et l'utilisation optimale de flux personnels et matériels.
- Minimiser les embouteillages.
- Encourager l'autonomisation et réduire les tâches administratives et autres tâches indirectes.
- Promouvoir l'ordre dans la production vers un objectif unique.

## 1.6 Autres définitions

### 1.6.1 Des départements de surface égale

C'est le cas où tous les départements sont de taille égale et peuvent être remplacés sans modifier les relations globales de proximité ou de distance entre les autres départements. Les emplacements à occuper par ces départements peuvent facilement être déterminés à l'avance. Dans ce contexte, le problème d'aménagement peut être considéré comme un (QAP) quand on suppose que les coûts associés au déplacement entre les départements sont linéaires par rapport à la distance parcourue et à la quantité de flux, il s'agit donc d'un problème d'aménagement d'installations à surface égale.

### 1.6.2 Des départements de surface inégales

Dans le cas général, les problèmes de surfaces inégales sont plus complexes que les problèmes de surfaces égales. En effet, ces problèmes de surfaces inégales introduisent des contraintes supplémentaires dans la formulation du problème (QAP), car certains emplacements prédéterminés ont des surfaces différentes et ne peuvent accueillir que quelques installations.

### 1.6.3 Produit

Un produit est un article que vous produisez ou un service que vous fournissez afin de répondre aux besoins d'un client.

### 1.6.4 Processus

Un processus est une série d'étapes et d'actions mises en place pour atteindre un objectif particulier. Dans l'industrie un processus de fabrication est l'ensemble des différentes actions que doit subir un produit pour être réalisé.

## 1.6.5 Planning

La planification est le processus qui consiste à établir des objectifs et à préciser la manière dont ces objectifs doivent être atteints. Par exemple, dans l'industrie, la planification des ventes a effectué pour prévoir le niveau des ventes et établir un plan pour y parvenir.

## 1.6.6 Localisation de l'usine

Le problème de la localisation des installations est la première chose à aborder lorsqu'on envisage d'ouvrir une nouvelle usine ou un nouvel entrepôt ou tout autre type d'installation. En effet, les gestionnaires souhaitent être aussi proches que possible de leurs sources (fournisseurs, clients, etc.) afin de minimiser les coûts de transport et d'être efficace en termes de délais.

## 1.7 Facteurs influençant l'aménagement

Plusieurs facteurs influencent la conception de la disposition, en particulier : la variété et le volume de la production, la forme et les dimensions de l'installation, le système de manutention, les différents flux possibles des pièces, la contiguïté entre paires de départements, le cas échéant. Nous aborderons chacun d'entre eux dans les paragraphes suivants.

### 1.7.1 Variété et volume des produits

les systèmes de fabrication peuvent être divisés en quatre catégories :

#### 1.7.1.1 Fixed product layout

Ou Disposition à position fixe, ce type de disposition se retrouve généralement dans les industries qui manufacturent des produits de grande taille, tels que les navires ou les avions. Le produit est considéré comme fixe, il ne circule pas, ce sont les différentes ressources qui sont amenées à se déplacer pour effectuer les interventions sur le produit comme le montre la figure suivante [41, 44].

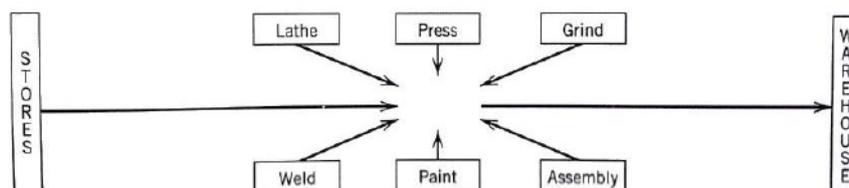


FIGURE 1.1 – Fixed product layout

### 1.7.1.2 Process layout

Également connu sous le nom de Job shop, il regroupe des installations ayant la même fonction. Il est utilisé lorsque le système opérationnel traite une grande variété de produit Avec des petits lots[20, 44].

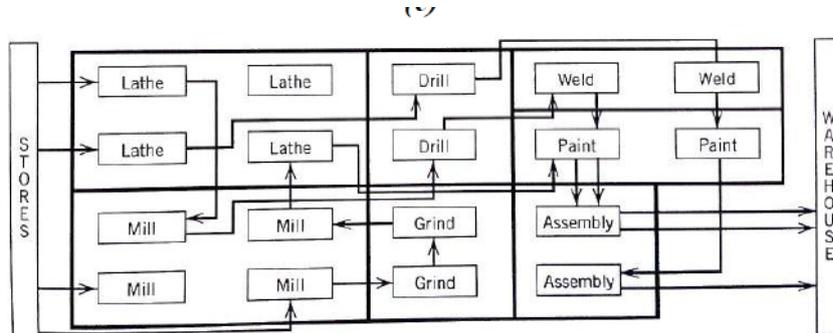


FIGURE 1.2 – Process layout .

### 1.7.1.3 Product layout

Il est nommé aussi flow shop où les installations s'organisent selon la séquence des opérations de fabrication successives, il est utilisé pour une capacité de production élevée et avec une faible variété[44].

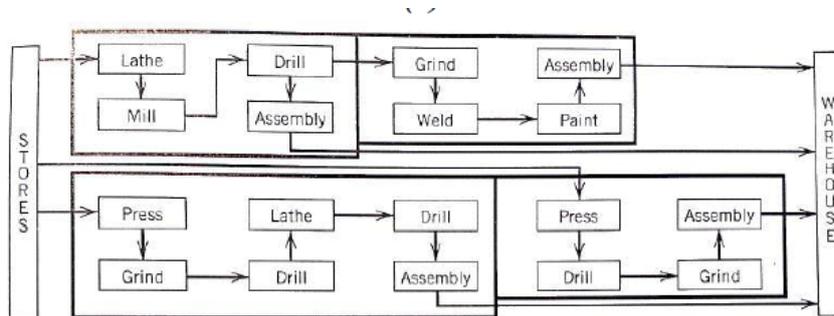


FIGURE 1.3 – Product layout .

#### 1.7.1.4 Cellular layout

Les machines sont regroupées dans des cellules composées de diverses catégories de machines afin de réaliser des familles de produits.

### 1.7.2 La forme et les dimensions de l'installation

Il existe deux formes différentes pour les installations : régulières et irrégulières. Les formes régulières sont rectangulaires et les formes irrégulières sont des polygones contenant au moins une somme d'angles de  $270^\circ$  , **Selon Chwif, et al.** (1998), une installation est appelée bloc fixe ou rigide lorsqu'elle a une longueur et une largeur fixes, le même auteur mentionne également qu'une installation peut être définie par sa surface ou son rapport de forme  $a_i=L_i/W_i$  , avec une borne supérieure et une borne inférieure respectivement,  $a_{iu}$  et  $a_{il}$  de sorte que lorsque  $a_i = a_{il} = a_{iu}$  cela correspond au cas des blocs à forme fixe.



FIGURE 1.4 – forme régulière et irrégulière des installations.

### 1.7.3 Mouvement de flux

Le backtracking et le bypassing sont deux mouvements liés à la ligne de flux d'un produit, ils ont un impact sur le coût des déplacements et la productivité.

#### 1.7.3.1 backtracking

**Selon Braglia, M.** (1996) le backtracking signifie le déplacement d'une pièce d'une machine à une autre qui la précède dans la séquence des machines placées. Le nombre de ces mouvements doit être réduit.

### 1.7.3.2 Bypassing

se présente lorsqu'une pièce saute des installations pendant son déplacement vers l'agencement de la ligne de production.

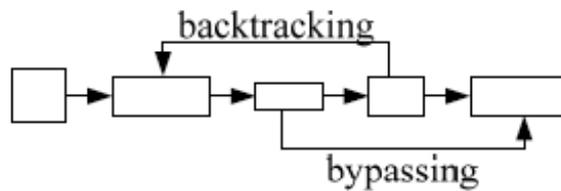


FIGURE 1.5 – backtracking et bypassing.

## 1.7.4 Les système de manutention des matériaux (MHS)

Comme il a été dit précédemment, l'un des objectifs de la conception des installations est de minimiser le flux de matériaux entre les départements afin d'avoir un coût de transport minimal, et puisque le flux est déterminé par la distance multipliée par le coût du transport des matériaux du département  $i$  au département  $j$ , il est très important de souligner la partie coût car le choix du bon système de manutention aura un impact efficace sur le coût et c'est pour cette raison, nous allons présenter ce que sont réellement les systèmes de manutention ainsi leurs types.

Dans une entreprise, un certain nombre de dispositifs de manutention (MHDs) sont utilisés en combinaison pour former un MHS dans lequel la fonction principale de ces deux derniers est de transporter des pièces et des matériaux entre les différentes étapes du traitement. [42]

### 1.7.4.1 Les types de MHDs

Le choix d'une MHD dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment la forme, le poids, la taille, le volume et les charges, et il convient de noter que certaines MHD déplacent les matériaux dans un espace situé au-dessus des machines, tandis que la plupart des MHD utilisent un espace (chemin) sur le sol de l'atelier. [42]

- Les convoyeurs : Les convoyeurs sont utilisés lorsque le volume des matériaux transportés est important et que leur forme et leur taille sont relativement peu uniformes, on distingue plusieurs types de convoyeurs, chacun ayant une fonction spécifique, par exemple, les convoyeurs à chute sont utilisés pour transporter des matériaux d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, les convoyeurs à chaîne et à moteur sont généralement des convoyeurs aériens dont les supports sont transportés par des chaînes. Il existe tellement d'autres types de convoyeurs que nous ne pouvons pas les passer en revue en détail, mais nous allons en énumérer quelques-uns tels que : Convoyeur à accumulation, Convoyeur pneumatique ou à vide, Convoyeur à rouleaux .

- Les palettiseurs : il s'agit de dispositifs automatisés à grande vitesse utilisés pour palettiser des charges unitaires provenant d'une chaîne de montage ou d'une chaîne de production.
- Dispositif de levage de palettes : Ils sont utilisés pour monter ou baisser les palettes d'un camion palette à un certain niveau pour le chargement ou le déchargement, certains peuvent avoir un espace pour que l'opérateur puisse le contrôler.
- Les camions : Les camions nécessitent un parcours fixe dans l'atelier, ils sont utilisés lorsque le matériel transporté varie fréquemment en forme, en taille et en poids, ils sont conseillés aussi lorsque le volume du matériel déplacé est faible, et donc que le nombre de trajets est réellement réduit, nous reconnaissons différents types de camions, chacun étant défini par un certain nombre de caractéristiques, voici quelques-uns : Chariot à main, Chariot élévateur à fourche, Transpalette, Chariot à plate-forme, Chariot à contrepoids
- Les robots : ce sont des dispositifs programmables qui remplissent des fonctions comme la prise et le placement, ils ont six degrés de liberté et peuvent être utilisés pour inspecter des pièces défectueuses ou pour des activités dangereuses pour l'homme ou répétitives.
- Véhicule à guidage automatique (AGV) : l'AGV est un robot qui se déplace sans intervention humaine, ses mouvements peuvent être contrôlés de plusieurs manières, la plus commune et la plus simple étant l'utilisation de rubans spéciaux intégrés dans le sol de l'atelier qui transmettent des signaux radio, l'un des avantages des rubans par rapport aux AGV câblés est qu'ils peuvent être facilement retirés et placés sur une autre trajectoire, ce qui modifie la trajectoire de l'AGV en fonction des besoins, ce qui le rend flexible
- Hoists, Cranes, and Jibs : Ces MHD sont généralement utilisés lorsque le matériel à transporter est volumineux et nécessite plus d'espace, hoists soulèvent le matériel dans un espace vertical à l'aide de crochets, que ce soit avec de l'énergie électrique ou pneumatique ou même manuellement, tandis que les cranes transportent des matériaux dans une direction horizontale à l'aide de crochets montés sur de grandes poutres, ces dernières peuvent se déplacer elles-mêmes dans le sens horizontal. jibs ressemblent à une grue à portique sans l'une des poutres de support verticales, nous notons que ces MHD sont coûteux et prennent beaucoup du temps à installer et nécessitent des fondations et des supports élaborés.

## 1.8 Configuration de la disposition

### 1.8.1 Une seule rangée (SRFLP)

Le SRFLP consiste à trouver la meilleure disposition des installations sur une seule rangée. Il existe de nombreuses manières de base d'envisager ce problème, telles que : Linéaire, Semi-circulaire, En forme de U [20].

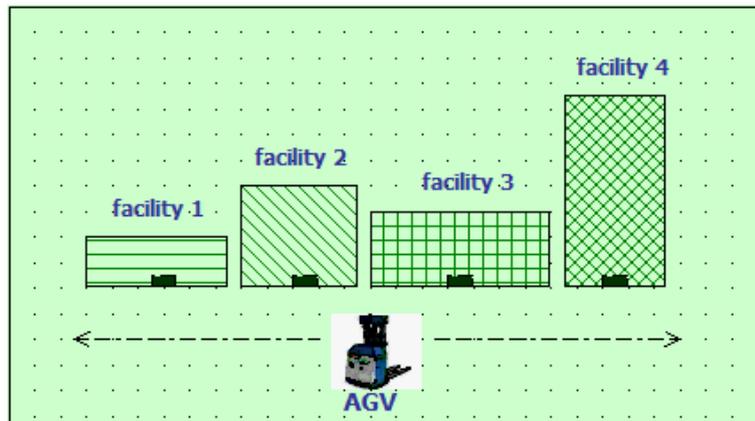


FIGURE 1.6 – Disposition des installations sur une seule rangée.

### 1.8.2 Multi-rangées

La disposition en plusieurs rangées prévoit de multiples rangées d'installations[20].

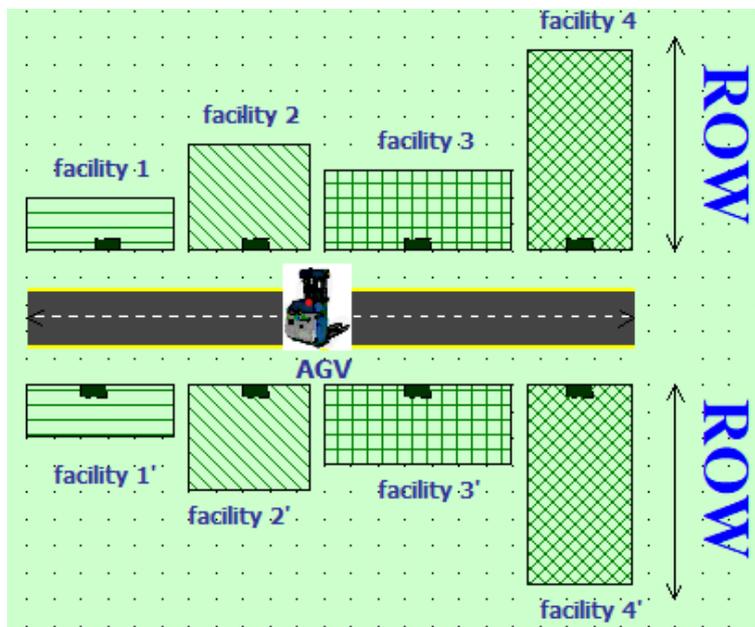


FIGURE 1.7 – Disposition des installations a rangées multiples

### 1.8.3 La disposition en boucle

Inclut une station de chargement/déchargement (I/O), autrement dit une station depuis laquelle une pièce entre et sort de la boucle[20].

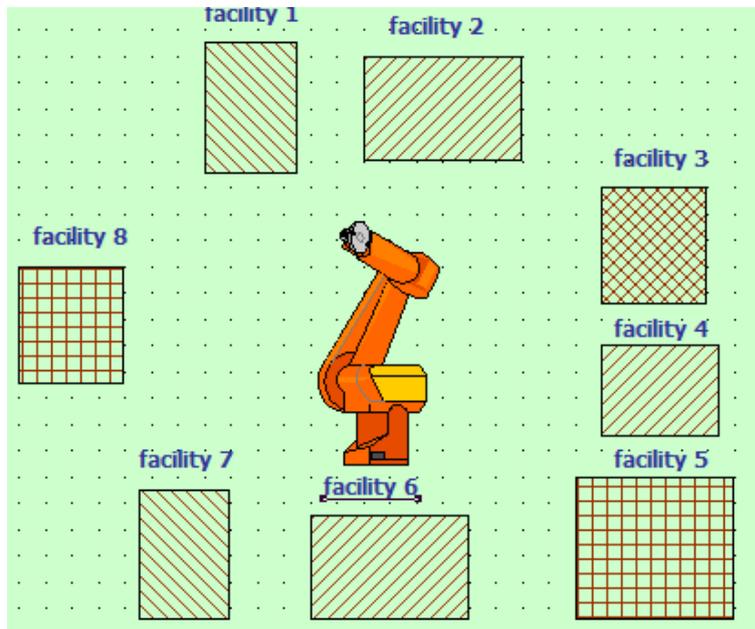


FIGURE 1.8 – Disposition des installations en boucle

### 1.8.4 Champ ouvert

Le modèle du champ ouvert correspond aux situations où il est possible de placer des installations sans contraintes ou limitations résultant par l'arrangement des configurations telles que l'agencement en ligne unique ou en boucle[20].

### 1.8.5 Multi-étages

Les problèmes associés sont appelés Multi floor facility layout problem. En raison de la contrainte de l'espace horizontal existant, une dimension verticale de l'atelier est nécessaire(3 dimensions)[20].

## 1.9 Analyse des équipements et des Produits

Avant de mettre en place un atelier, il est nécessaire de connaître les données utilisées sur les produits fabriqués et leurs quantités. Ces deux facteurs influencent la disposition finale, ainsi que d'autres facteurs qui déterminent les données nécessaires pour concevoir la disposition choisie.

## 1.9.1 Liste des produits

Ensemble des produits réalisés dans l'entreprise.

Nomenclature						
Company:	TW Inc.				Prepared By:	JSU
Product:	Airflow Regulator				Date:	30/06/2003
NO. pièce	Nom	Drwg. No.	Qte/unit	Material	Taille	Prod/Ach
1050	Pipe plug	4006	1	Steel	0.5" x 1.00"	Ach
2200	Body	1003	1	Aluminum	2.75" x 2.5" x 1.5"	prod
3250	Seat Ring	1005	1	Stainless Steel	2.97" x 0.87"	prod
3251	O-Ring	-	1	Rubber	0.75" diam.	Ach
3252	Plunger	1009	1	Aluminum	1.6" x 0.225"	prod
3255	O-Ring	-	1	Rubber	0.925" diam.	Ach
4150	Plunger Retainer	1011	1	Aluminum	0.42" x 1.2"	prod
4250	Lock Nut	4007	1	Aluminum	0.21" x 1.00"	Ach

FIGURE 1.9 – La liste des produits

## 1.9.2 Diagrammes d'assemblage

Le diagramme d'assemblage est un outil qui complète la nomenclature. Il illustre comment les sous-ensembles et les composants sont produits séparément sur différents sites de fabrication pour obtenir le produit final. Ils sont utiles pour la planification des activités de production[42].

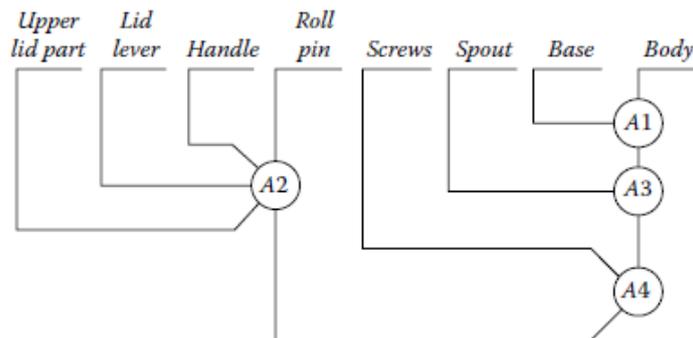


FIGURE 1.10 – Diagramme d'assemblage d'une bouilloire

### 1.9.3 Liste des matériaux

L'ensemble des pièces utilisées par l'entreprise pour assurer la production[42].

Nomenclature					
Company:	TW Inc.			Prepared By:	JSU
Product:	Airflow Regulator			Date:	30/06/2003
NO. pièce	Nom	Drwg. No.	Qte/unit	Material	Prod/Ach
1050	Pipe plug	4006	1	Steel	Ach
2200	Body	1003	1	Aluminum	prod
3250	Seat Ring	1005	1	Stainless Steel	prod
3251	O-Ring	-	1	Rubber	Ach
3252	Plunger	1009	1	Aluminum	prod
3255	O-Ring	-	1	Rubber	Ach
4150	Plunger Retainer	1011	1	Aluminum	prod
4250	Lock Nut	4007	1	Aluminum	Ach

FIGURE 1.11 – La liste des matériaux

### 1.9.4 Diagramme de précédences

Il représente graphiquement les relations de précedence entre les activités d'un projet pour le planifier et déterminer le meilleur chemin pour le réaliser.

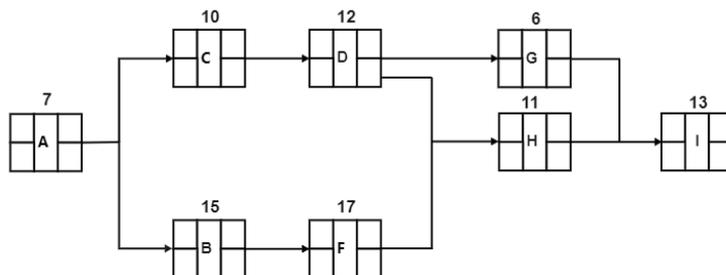


FIGURE 1.12 – Le diagramme de précédences

### 1.9.5 Feuille de route

Les données obtenues à partir de toutes les fiches de route sont des éléments essentiels de la future planification. Comme nous le verrons dans les chapitres suivants, ces données sont utilisées pour déterminer le nombre et les types de machines à acheter afin de garantir un certain niveau de production, le nombre et les compétences des employés nécessaires, le type de production à mettre en place et le type d'équipement à utiliser. Une fiche de routage indique les actions à effectuer sur une pièce ainsi que la séquence des équipements que la pièce doit visiter. Elle peut également indiquer la durée des opérations[42, 41].

Operation		Machine	Aux. Equip.	Setup Time (hr)	Hr/Pc	Pc/Hr
No.	Description					
10	Molding process	Injection molding machine		0.05	0.02	50 sections of 6 parts
20	Cutting out of sections (combined with lower part)	Hand cutter			0.002	500
30	Drill roll pin hole	Drill press		0.02	0.0035	285
40	Inspection				0.0017	580

FIGURE 1.13 – La feuille de route

### 1.9.6 Le diagramme du processus d'opération

Ce diagramme détaille essentiellement le diagramme d'assemblage 1.10, qui montre chaque opération et contrôle que subit chaque pièce lors de son passage de la chaîne de production à la chaîne d'assemblage et permet de connaître la date de livraison promise. Il utilise les symboles de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME) pour symboliser toutes les activités de production. Les 5 activités de fabrication sont présentées dans la figure suivante [42] :

- $A_1$  : Soudage du corps à la base 2.550 min
- $A_2$  : Soudage du bec au corps 4.510 min
- $A_3$  : Poncer l'excédent de soudure 6.750 min
- $A_4$  : Polissage de finition 8.450 min
- $A_5$  : Visser la poignée au corps 10.520min

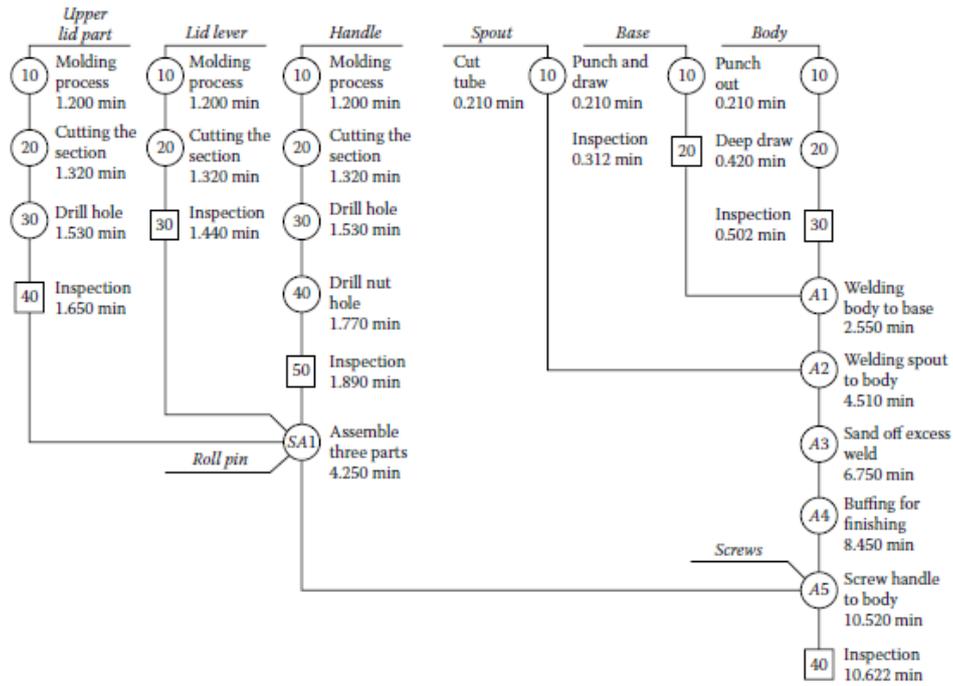


FIGURE 1.14 – Le diagramme du processus d’opération d’une bouilloire

### 1.9.7 Dessin technique

Ce dessin technique aide l’ingénieur de fabrication à déterminer les processus nécessaires à la fabrication du produit. Il contient, la nomenclature, les matériaux utilisés, des informations sur l’emplacement, la date et l’auteur de la pièce, ainsi que son numéro

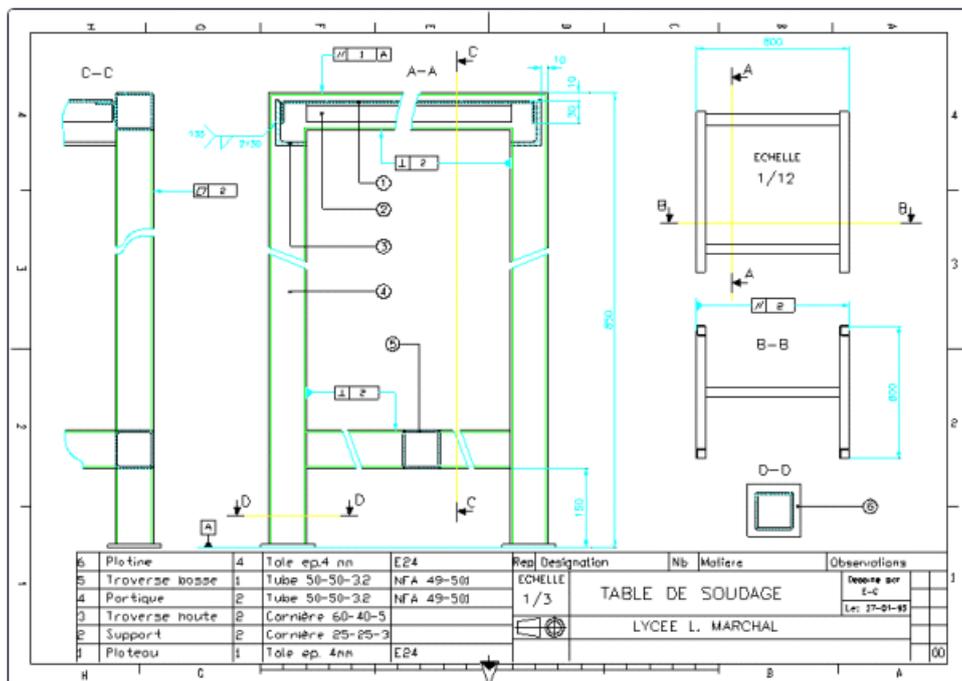


FIGURE 1.15 – Le dessin technique

## 1.9.8 L'organigramme cartographie des processus

Une cartographie des processus est un outil de planification et de gestion qui vise à présenter le flux de travail d'un produit depuis le stockage de matière première jusqu'à l'obtention de produit finie[42].

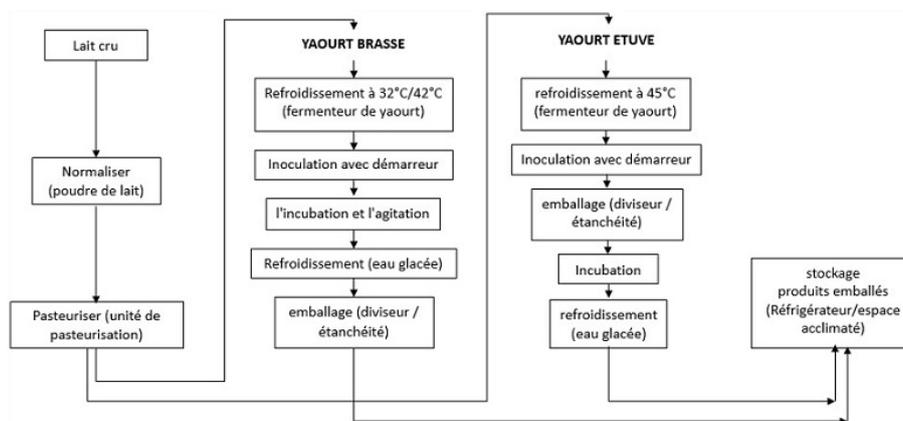


FIGURE 1.16 – L'organigramme cartographie des processus

## 1.9.9 Acheter ou fabriquer

Une décision de fabrication ou d'achat est une décision de fabriquer un produit/service en interne ou de l'acheter chez des fournisseurs externes en fonction des résultats de l'analyse coûts-avantages.

**Exemple de sélection de la source d'un composant** Un futur fabricant de mixeurs de cuisine a conçu un modèle qui nécessite des engrenages de connexion en plastique dur. Entre le moteur électrique et l'ensemble de lame de coupe. Comme le montre le tableau 1.1, il existe trois possibilités pour obtenir ces pièces[42]

- Alternative A : Une entreprise spécialisée dans le moulage peut fournir les pièces pour un prix de 500\$ par millier d'unités. Ce prix comprend le coût de la conception et de la construction des outils nécessaires à la fabrication des engrenages. les engrenages ; toutefois, la quantité minimale de commande est de 20 000 unités. L'entreprise doit également consacrer 2 000\$ à un travail d'ingénierie pour revoir la conception avant d'autoriser le fournisseur à commencer la production.
- Alternative B : Les ingénieurs de l'usine peuvent concevoir, construire et effectuer les premiers essais d'un outil à cavité unique pour un montant de 50,000\$. Les engrenages peuvent ensuite être fabriqués dans l'usine sur une petite presse à moules automatique au coût de 200 \$ par mille. Les coûts unitaires comprennent tous les coûts variables : la main d'œuvre et les matériaux, ainsi que tous les frais généraux d'exploitation normaux calculés au prorata de l'unité de production.
- Alternative C : Il est également possible de concevoir et de construire un outil à cavités multiples pour 100 000 \$. Cet outil serait conçu pour fonctionner sur une presse à moules automatique de plus grande taille, au coût de 150 \$ par millier d'unités.

Déterminer l'alternative préférée, compte tenu d'un niveau d'exigence spécifique. Supposons que la période au cours de laquelle la production sera requise est suffisamment courte pour qu'il ne soit pas nécessaire de tenir compte de la valeur temporelle de l'argent.

Alternative	Coût initial	Coût par 1000
A : Achat d'un outil de moulage, commande minimale de 20 000	2000\$	500\$
B : Fabrication avec un outil à cavité unique	50,000\$	200\$
C : Fabrication avec un outil à cavités multiples	100,000\$	150\$

TABLE 1.1 – Données pour les trois alternatives

Il est plus économique d'acheter des quantités de pièces jusqu'à 160 000 unités auprès d'un fournisseur. De 160 000 à 1 000 000 de pièces, il est préférable de construire un outil à cavité unique et de mouler les pièces en usine, pour produire plus de 1 000 000 de pièces, il faut utiliser un outil à cavités multiples 1.17. Un autre aspect important de l'analyse est la disponibilité du capital initial. S'il n'est pas possible de réunir 100,000\$ immédiatement, l'alternative C n'est pas réalisable. Dans ce cas, même si la production de plus de 1,000,000. pièces serait moins chère avec l'alternative C. Seul le moule à cavité unique, alternative B, pourrait être utilisé.

En négligeant la valeur temporelle de l'argent, le seuil de rentabilité  $Y_1$  de l'achat des pièces par rapport à leur moulage avec un outil à une seule cavité peut être calculé à partir de la formule suivante :

$$2000\$ + 500\$ * Y_1 = 50,000\$ + 200\$ * Y_1 \quad (1.1)$$

$$300\$ * Y_1 = 48,000\$ * Y_1 \quad (1.2)$$

$$Y_1 = 016mille(1million)parties \quad (1.3)$$

Le seuil de rentabilité  $Y_2$  pour le moulage des pièces dans un outil à cavité unique par rapport à un outil à cavités multiples est le suivant :

$$50,000\$ + 200\$ * Y_2 = 100,000\$ + 150\$ * Y_2 \quad (1.4)$$

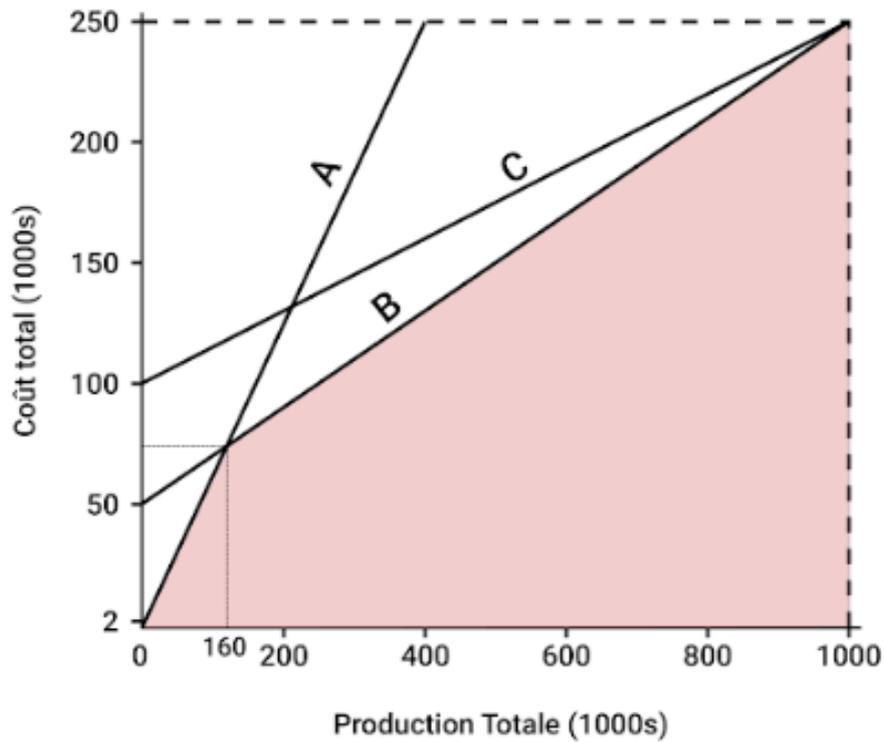
$$50\$ * Y_2 = 50,000\$ * Y_2 \quad (1.5)$$

$$Y_2 = 1000mille(1million)parties \quad (1.6)$$

## 1.10 Besoin en équipements

Les modèles permettant de déterminer la quantité et le type d'équipement de production nécessaire. Le nombre d'unités de machine nécessaires est déterminé par la formule ci-dessous[41] :

$$NM = \frac{tp}{\tau\eta} \quad (1.7)$$



Alternative	Coût initial	Coût /1000
A	2,000 \$	500 \$
B	50,000 \$	200 \$
C	100,000 \$	150 \$

FIGURE 1.17 – Coût total en fonction du niveau de production (pièces en plastique moulées)

P : Taux de production souhaité en unités par jour

$\eta$  : Rendement de la machine

$\tau$  : Temps pendant lequel la machine est disponible par jour, en heures

t : Temps nécessaire pour traiter une unité de produit sur la machine, en heures

NM : Nombre d'unités de la machine nécessaires

Pour déterminer le taux de production souhaité à chaque étape, il est nécessaire de déterminer les quantités de produits nécessaires à la sortie dans la dernière étape de production. Cette dernière dépend du taux de rebut dans la dernière étape de l'opération.

$$O_i = P_i(1 - S_i) \quad (1.8)$$

$$P_i = \frac{O_i}{(1 - S_i)} \quad (1.9)$$

$P_i$  : L'entrée de Production pour l'opération i

$O_i$  : Sortie du procédé i

$S_i$  : Fraction de Pi perdu (rebut)

**Exemple nombre de machines** La feuille de routage pour une poignée utilisée dans un équipement de diagnostic médical est donnée dans le tableau 1.2. Vous trouverez également le taux de production par heure et le taux de rebut pour chaque machine. En supposant que chaque machine a une efficacité de fabrication de 90%, déterminez :

1. L'entrée requise (nombre de produits)
2. Le nombre de machines de chaque type que la compagnie doit acheter si le taux de production de la tour, la perceuse, le moletage et le buff est de 6, 10, 15 et 18 unités par heure respectivement

Nom de la machine	Sortie désirée	Taux de rebuts (%)
Tour	103	5
Perceuse	100	8
moletage	100	12
buff	100	10

TABLE 1.2 – Tableau qui représente la sortie désirée et le taux de rebuts

### Solution

1. L'entrée requise

Nom de la machine	l'entrée requise
Tour	109
Perceuse	109
moletage	114
buff	112

TABLE 1.3 – Tableau qui représente l'entrée requise

2. Le nombre de machines de chaque type

Nom de la machine	taux de production	t en heures	Nombre de machines
Tour	6	0.16	3
Perceuse	10	0.1	2
moletage	15	0.15	1
buff	18	0.05	1

TABLE 1.4 – Tableau qui représente le nombre de machines

## 1.11 Besoin en personnel

Le nombre d'employés nécessaires dans une nouvelle installation est en rapport avec le volume et la variété de la production.

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{nT_i O_i}{\eta H} \quad (1.10)$$

$n$  nombre d'Operations type

$O_i$  nombre total d'opérations de type  $i$  requis sur tous les pseudo (ou vrais) produits fabriqués par jour

$T_i$  temps standard requis pour une opération  $O_i$

$H$  temps de production total disponible par jour

$\eta$  taux de production supposée de l'usine

## 1.12 Données nécessaire pour mettre en place une disposition :

Pour concevoir une installation de production, nous commençons par identifier :

- Le flux des matériaux entre les départements.
- La forme et la taille des départements.
- La surface au sol disponible.
- Les contraintes d'adjacence entre les départements.
- L'espace de passage entre les machines et les postes de travail, ainsi que les allées pour les systèmes de manutention qui alimentent les machines.

## 1.13 Données de flux

Les données rassemblent toutes les informations relatives à une entreprise qui traite quotidiennement plusieurs types de données. Leurs interactions sont déterminées à l'aide de mesures objectives ou de critères subjectifs[41].

## 1.14 Types de données

### 1.14.1 Donnés qualitatives

Les données qualitatives sont des informations descriptives qui représentent les relations entre les éléments de l'entreprise. Pour certaines petites entreprises, il est relativement difficile de collecter toutes les données quantitatives nécessaires à la conception

de la disposition. Pour résoudre ce problème, il est possible d'appliquer la méthode du Relationship Chart.

### 1.14.2 Données quantitatives

Informations mesurables qui déterminent la fréquence des mouvements entre les départements, la disponibilité du personnel qualifié, le temps nécessaire à la collecte des données et le type de systèmes de manutention mis en œuvre ainsi que le flux des matériaux. On utilise deux modèles de matrices :

#### 1.14.2.1 Matrice de fréquence des déplacements "de-à" :

Correspond au nombre de déplacements effectués d'une machine à l'autre

$$\begin{bmatrix} - & 12 & 3 & 3 & - & - \\ 21 & - & - & - & - & - \\ 4 & 5 & - & 8 & 8 & 8 \\ - & - & - & - & 4 & 4 \\ 1 & 2 & 2 & 15 & - & 19 \\ 4 & 9 & - & 7 & 19 & - \end{bmatrix}$$

FIGURE 1.18 – la matrice de flux "de-à"

#### 1.14.2.2 Matrice de fréquence des déplacements entre départements

Elle est symétrique aussi, elle indique le nombre de trajets effectués entre les départements

$$\begin{bmatrix} - & 33 & 7 & 3 & 1 & 4 \\ 33 & - & 5 & 0 & 2 & 1 \\ 7 & 5 & - & 8 & 10 & 8 \\ 3 & 0 & 8 & - & 19 & 11 \\ 1 & 2 & 10 & 19 & - & 38 \\ 4 & 9 & 8 & 11 & 38 & - \end{bmatrix}$$

FIGURE 1.19 – la matrice de flux entre départements

## 1.15 Mesures des distances

La distance entre deux installations est mesurée à partir du centre de gravité d'une installation vers l'autre, cette méthode permet aux scientifiques de simplifier le modèle mathématique même s'il peut être plus précis de mesurer la distance entre les points de prise en charge (pick-up) et de dépose (drop-off) des paires de départements. Voici les mesures de distance suivantes qui peuvent être utilisées dans la pratique [?] :

### 1.15.1 La distance euclidienne

La distance euclidienne est la mesure de distance la plus couramment utilisée et la plus facile à comprendre et à modéliser. Elle mesure la distance en ligne droite entre les centres des départements, elle est utilisée dans les problèmes de localisation des installations plus que dans les problèmes de conception de l'aménagement, le calcul est illustré par la formule suivante :  $d_{ij} = \sqrt{((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)}$  où  $x_i$  et  $y_i$  représentent les coordonnées du centroïde du département  $i$ . La distance euclidienne est présentée dans la figure 1.20.

### 1.15.2 La distance euclidienne carrée

Comme son nom l'indique, c'est le carré de la distance euclidienne, la partie carrée attribue une importance plus grande aux départements éloignés qu'à ceux qui sont proches.  $d_{ij} = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)$

### 1.15.3 La distance Rectiligne

Également appelé Manhattan ou métrique rectangulaire, elle est représentée par la ligne horizontale et verticale entre les centroïdes des départements  $i$  et  $j$  dans la figure 1.20, elle est communément utilisée parce qu'elle convient à de nombreux problèmes, par exemple un système de manutention qui se déplace de manière rectiligne entre les départements.

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (1.11)$$

### 1.15.4 La distance de Tchebychev

Considérons un système de manutention composé de deux équipements : l'un transporte le matériel du centre du département  $i$  au centre du département  $j$  via l'axe  $x$  et le second équipement fait la même chose indépendamment via l'axe  $y$ , maintenant le temps pour atteindre le centre de l'autre département dépend de la distance  $x$  et de la distance  $y$ , donc la distance tchebychev est la plus grande valeur parmi  $|x_i - x_j|$  et  $|y_i - y_j|$ .  $d_{ij} = \max(|x_i - x_j|, |y_i - y_j|)$

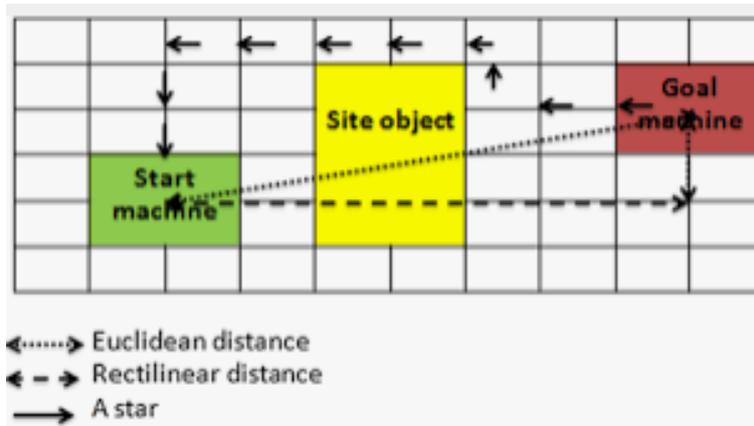


FIGURE 1.20 – Calculs de la distance selon différentes mesures.

### 1.15.5 Distance entre les allées

C'est la distance réelle parcourue le long des allées par le système de manutention, dans la figure 1.21 la distance des rayons entre le département  $i$  et  $j$  est la somme de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$ . le problème de la distance entre les allées est que la distance entre les allées n'est pas connue dans les étapes initiales de la conception, elle n'est donc utilisée que dans les étapes de planification ou d'évaluation.

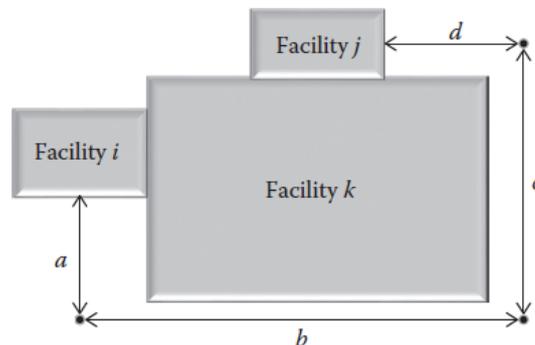


FIGURE 1.21 – Calculs de distance pour les métriques de distance d'allée et d'adjacence..

## 1.16 L'adjacence

La matrice d'adjacence (ou matrice de relation de proximité ) représente la désirabilité de placer chaque département à côté de l'autre en fonction de certains facteurs tels que la sécurité , cette matrice prend en compte que l'aspect qualitatif afin de concevoir un aménagement efficace.les dispositions finales sont évaluées en fonction du taux de proximité total (**TCR**) qui correspond à la somme des valeurs numériques attribuées aux relations de proximité entre les départements qui doivent être maximisées. Ces valeurs sont exprimées avec une échelle internationale qui a l'abréviation " AEIOUX " qui est expliquée comme suit : Nécessaire (A), très important (E), important (I), importance ordinaire (O), sans importance (U) et indésirable (X).

Avec les valeurs suivantes  $A=16$ ,  $E=8$ ,  $I=4$ ,  $O=2$ ,  $U=0$  and  $X=-2$ .

Dans une disposition, si deux activités  $a_{ij}$  partagent une bordure commune de longueur positive, elles sont considérées d'être (totalement) adjacentes, sinon, elles sont partiellement adjacentes si elles ne partagent qu'un seul ou un nombre fini de points, c'est-à-dire une longueur nulle. Soit  $a_{ij} \in [0, 1]$  : coefficient d'adjacence entre les activités  $i$  et  $j$ .

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si les activités } i \text{ et } j \text{ sont adjacentes} \\ \alpha & (0 \leq \alpha < 1) \text{ s'ils sont partiellement adjacents} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.12)$$

**Exemple calcule de TCR :**

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} - & 8 & 16 & 4 & 0 \\ 8 & - & 4 & 8 & 2 \\ 16 & 4 & - & 8 & 0 \\ 4 & 8 & 8 & - & 8 \\ 0 & 2 & 0 & 8 & - \end{bmatrix}$$

FIGURE 1.22 – La matrice d'adjacence

**disposition**

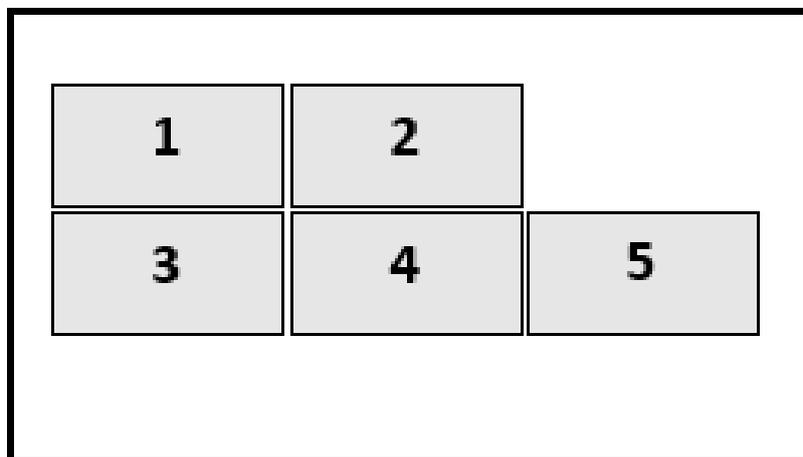


FIGURE 1.23 – Disposition finale

- Totalement adjacent :  $a_{12} = a_{13} = a_{24} = a_{34} = a_{45} = 1$
- Partiellement adjacents :  $a_{14} = a_{23} = a_{25} = \alpha = \frac{1}{2}$ ,
- Non adjacent :  $a_{15} = a_{35} = 0$ .

$$\text{TCR} = 16 + 8 + 8 + 8 + 8 + 0.5(4 + 4 + 2)$$

$$\text{TCR} = 53$$

## 1.17 État de l'art

Cet état de l'art nous permet d'apporter une référence scientifique afin de mieux positionner notre travail par rapport aux travaux antérieurs, afin de trouver et améliorer la conception et l'aménagement des installations qui sont déjà réalisés et qui correspondent à la problématique posée et aux sujets traités. Lorsqu'il s'agit d'un problème de disposition statique, les chercheurs abordent le sujet avec différentes approches, ce problème consiste à trouver une disposition qui minimise le coût de la manutention [14] dans un arrangement planaire orthogonal sans chevauchement des installations dans un atelier rectangulaire donné en minimisant la distance [46]. Sachant que le FLP sert à déterminer les emplacements relatifs et la répartition de l'espace disponible entre un nombre donné d'installations [47], plusieurs chercheurs se sont intéressés aux problèmes d'optimisation dans ce domaine, qui vise à concevoir des structures plus efficaces en tenant compte des différentes interactions entre les systèmes de manutention et les installations lors de la conception des modèles [50]. Ces problèmes peuvent avoir un ou plusieurs objectifs et sont formulés comme un problème d'affectation quadratique (QAP) ou une programmation mixte en nombres entiers (MIP) [17]. La modélisation du QAP consiste à diviser un atelier en blocs rectangulaires égaux appelés en anglais (grid), chaque installation est associée à un certain nombre de blocs en fonction de sa taille dans le but de réduire les coûts de la manutention des matériaux lors du placement des installations [23], en ajoutant de nouvelles contraintes, telles que le facteur d'utilisation de la surface et le facteur d'aspect, afin de trouver des installations de formes aussi régulières que possible [24]. Certains chercheurs constatent que la formulation QAP est un peu limitée en termes de contraintes, alors que la formulation MIP est plus efficace, elle permet de placer en continu les départements n'importe où dans l'atelier et les installations du site de l'usine sont localisées soit par leurs coordonnées de centroïde, soit par les coordonnées du coin inférieur gauche de la longueur  $L_i$  et de la largeur  $W_i$  de l'installation [25, 26, 27]

Les problèmes d'aménagement des installations sont difficiles à résoudre et les approches exactes ne sont pas souvent adaptées aux problèmes de grande taille, pour cette raison, nous introduisons les méthodes heuristiques et méta-heuristiques :

Les approches heuristiques visent soit à construire une disposition, soit à améliorer une disposition existante, permettant de résoudre le problème en un temps de calcul raisonnable. Pour résoudre un problème de grande taille, on mentionne des algorithmes tels que CORELAP [10], ALDEP [28] et COFAD [11], SHAPE [30] et des algorithmes d'amélioration tels que CRAFT [9], FRAT [31], DISCON. [32, 33] utilisent une formulation MIP pour optimiser le flux matériel entre les départements, leur algorithme crée d'abord une disposition, puis l'améliore. Pour les problèmes d'optimisation en utilisant les méta-heuristiques, [48] ils ont développé un algorithme de recherche tabou basé sur l'échange de deux emplacements des installations, contient une structure de mémoire à long terme, une taille de liste tabou dynamique, un critère d'intensification et des stratégies de diversification. Il existe aussi l'algorithme génétique qui est l'algorithme le plus populaire

et le plus utilisé par les chercheurs [34, 23, 27], ont trouvé un optimum global lorsque de nombreux optima locaux sont présents.

[37] abordent Le problème de l'implantation dynamique d'installations avec des départements de surface inégale qui consiste de trouver une implantation initiale en utilisant l'heuristique de recherche par les limites (BSH), puis il l'ont amélioré en utilisant l'heuristique de recherche tabou (TS).[49] proposent une nouvelle approche d'adjacence linéaire pour le problème de l'aménagement des installations avec des départements de surface inégale, cette nouvelle approche consiste à une variable continue, appelée degré d'adjacence qui apparaîtra dans la fonction objective, cette dernière concentrera uniquement sur la maximisation de l'adjacence sous certaines contraintes.

## 1.18 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté plus en détail les généralités du FLP ainsi un état de l'art a été effectué pour mieux mettre en évidence et identifier les grandes interrogations à traiter. Nous avons discuté de l'importance de l'analyse du produit et des outils d'analyse qu'elle utilise pour développer certaines des données (techniques, qualitatives et quantitatives) nécessaires à la conception des installations et tout cela pour pouvoir prendre des décisions sur les besoins en équipement, en personnel, etc. À ce titre, nous discutons dans le deuxième chapitre des différentes approches de résolution du FLP cité sur lesquelles nous nous appuyons pour développer notre recherche.

# Chapitre 2

## Les approches de résolution

### 2.1 Introduction

Il existe deux approches de résolution de problème de la disposition, la première c'est une approche traditionnelle repose sur l'aspect qualitatif nommé (SLP). Ce dernier [6], est largement utilisé dans la pratique. La deuxième c'est une approche d'optimisation basée sur les concepts de la théorie des graphes ([7] 1983). Depuis que le FLP est formulé, la recherche de solutions a considérablement progressé [14]. Un certain nombre d'algorithmes ont été proposés et classés comme suit :

- Algorithmes optimaux.
- Algorithmes heuristiques.

Tous les algorithmes optimaux développés pour le problème de layout nécessitent une mémoire et un temps de calcul extrêmement élevés, et ils augmentent de façon exponentielle à mesure que la taille du problème augmente. Il n'est donc pas surprenant qu'il existe beaucoup plus d'heuristiques pour résoudre le problème de mise en place des installations que d'algorithmes optimaux. Les algorithmes heuristiques peuvent être divisés en trois classes qui sont :

- Algorithmes de construction.
- Algorithmes d'amélioration.
- Algorithmes Hybride.

Dans ce qui suit, nous présentons les principales méthodes de résolution dans chaque catégorie, afin de donner une vue d'ensemble et de positionner notre recherche. Dans ce chapitre, Nous discutons en détail de deux approches de conception d'installations ainsi les différents algorithmes utilisés dans la littérature

## 2.2 L'approche traditionnelle

Comme cité auparavant dans la l'introduction, il existe la méthode SLP comme méthode d'organisation des ateliers ou département basée sur la relation d'adjacence

### 2.2.1 Systematic layout planning (SLP)

SLP est une méthode de planification dédié à l'organisation de différents installations ou départements. Elle peut réduire de manière significative les coûts opérationnels de l'entreprise, de l'ordre de 10 à 30% et optimiser l'utilisation de l'espace de production. Le processus permet d'obtenir le flux le plus rapide de matériaux dans le traitement avec le moins de manutention possible. L'évaluation des activités, des relations et des alternatives impliquées dans un aménagement se déroule en quatre étapes qui sont les suivantes :

- Étape 1 : Déterminer l'emplacement où l'installation sera construite.
- Étape 2 : Faire la conception globale de l'installation
- Étape 3 : Déterminer la conception de l'aménagement de l'installation en détail
- Étape 4 : Préparation et installation des résultats de la conception

Les données d'entrée dont SLP ont besoin de se répartissent dans les cinq catégories indiquées ci-dessous :

P (Produit), Q (Quantité), R (Routage), S (Services), T (Timing).

les étapes de la méthode SLP sont illustrées dans le schéma de la figure 2.1

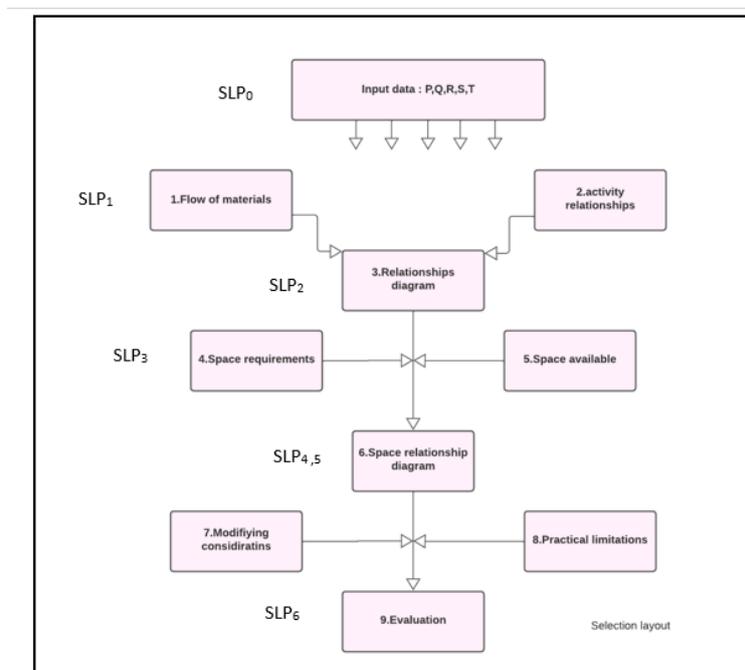


FIGURE 2.1 – Les étapes de la méthode SLP

## 2.2.2 Les étapes de la méthode SLP

- $SLP_0$  : Dans cette étape, on fait la Collecte des données relatives aux produits (la quantité et à et le routage )
- $SLP_1$  : En utilisant les données précédentes, la matrice des flux de matériaux de-à est construite. Celle-ci indique le flux entre chaque paire de machines.

Ces informations peuvent être obtenues dans les documents suivants (voir chapitre 1 page ) :

- La liste des matériaux
- La feuille de routage
- Diagramme d'assemblage
- Process Chart Le diagramme de précedence

$$\begin{bmatrix} 0 & 10 & 3 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

FIGURE 2.2 – la matrice de flux

- $SLP_2$  : Le diagramme de relations est construit à partir de données quantitatives de flux et de relations qualitatives, les machines sont liées en tenant compte de l'importance de la contiguïté entre les départements.

Relationship diagramme

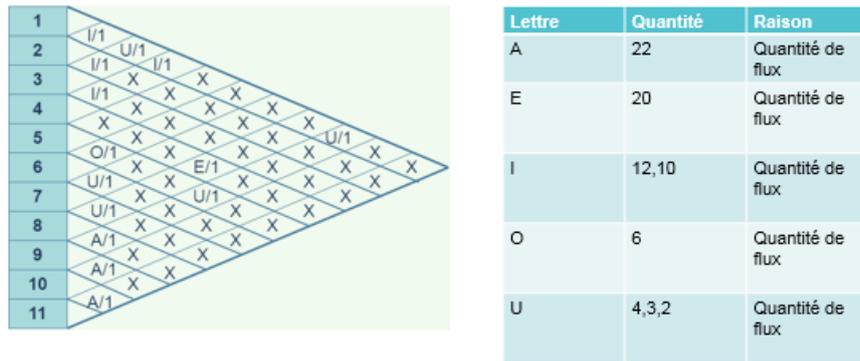


FIGURE 2.3 – activity relationships

- $SLP_3$  : Concevoir une représentation graphique du diagramme de relation ou Les postes de travail sont représentés par des nœuds et le nombre de lignes entre deux nœuds représente la proximité entre les nœuds.

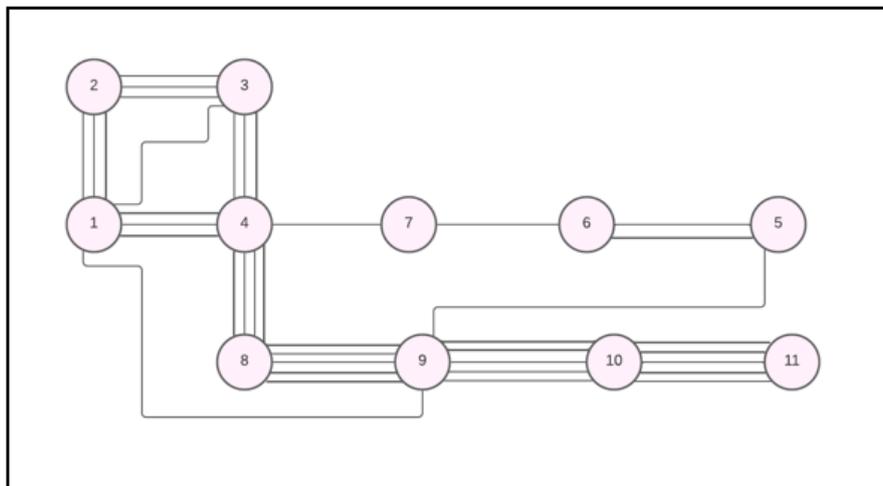


FIGURE 2.4 – Relationship diagram

- $SLP_{4,5}$  : Nous devons Connaître les besoins en espace et inclure les zones de travail et de non-travail, conformément aux normes industrielles.
- $SLP_6$  : Le diagramme de relation simplifie le problème en considérant que les départements sont de taille égale et respectent les conditions d'adjacence.

Diagramme de relation spatiale détermine l'espace disponible et les contraintes spatiales particulières qui traitent des modèles plus réalistes qui ne permettent pas l'échange de paires de départements.

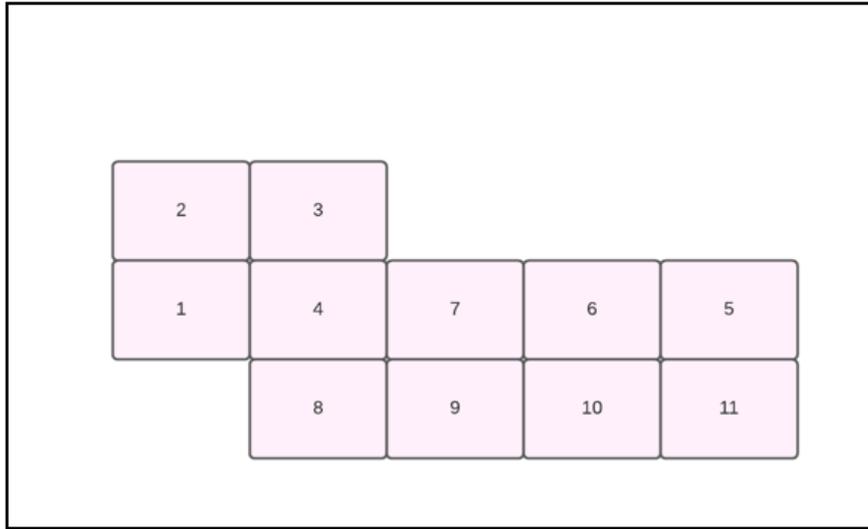


FIGURE 2.5 – Space Relationship diagram

## 2.3 Les algorithmes d’optimisation

Bien qu’il existe des algorithmes optimaux pour résoudre le TSP, ils ne sont généralement pas préférés, car tous les algorithmes optimaux développés pour le problème d’agencement nécessitent une mémoire très importante et un temps de calcul extrêmement élevé, et ils augmentent de façon exponentielle lorsque la taille du problème augmente. Il existe beaucoup plus d’algorithmes heuristiques que d’algorithmes optimaux pour résoudre le problème d’agencement, qui peuvent être divisés en trois classes :

- Algorithmes de construction
- Algorithmes d’amélioration
- Algorithmes hybrides

### 2.3.1 Algorithmes de construction

Les algorithmes de construction génèrent une disposition des installations à partir de zéro. En partant d’une surface vide, ils ajoutent un département (ou un ensemble de départements) après l’autre jusqu’à ce que tous les départements soient inclus dans la disposition. Les principales différences entre les différents algorithmes de construction concernent les critères utilisés pour déterminer les éléments suivants :

1. Premier département sélectionné comme premier à mettre en place.
2. Département ou départements suivants ajoutés à la disposition.
3. Emplacement des premiers départements (et les autres) dans le layout.

### 2.3.1.1 La théorie des graphes (Graph Theoretic Approach)

Dans l'approche SLP de **Muther**, le positionnement des départements est déterminé par "observation" et par essais et erreurs, ou la disposition finale ne nous aidera pas à réduire les coûts de manutention, Ainsi une approche basée sur les concepts de la théorie des graphes a été proposée (**Foulds**, 1983) elle n'est pas nécessairement optimale, mais on peut la perfectionner en utilisant d'autres algorithmes comme le 2-OPT, le recuit simulé, etc. La théorie des graphes définit des paires de départements adjacents de manière que le taux de proximité soit maximisé. Elle identifie une graphique planaire maximale dans lequel la somme des poids est maximisée. Le poids d'un arc entre deux nœuds correspond au niveau de l'interaction entre eux. La pondération représente la valeur assignée au code de relation entre les paires de nœuds (départements) connectées par un arc. Si les interactions sont fournies sous forme de matrice de flux de matières, nous pouvons utiliser les valeurs de flux de matières comme poids. On construit dans cette approche graphe planaire maximal (MPG) avec exactement  $3n - 6$  arcs consistant en un ensemble fini de nœuds qui représentent les départements peut être dessiné en deux dimensions où deux arêtes quelconques ne se croisent pas.

Lorsque le nombre de nœuds ( $n$ ) est supérieur ou égal à 3, le nombre maximal d'arcs dans un graphe planaire est de  $3n - 6$ . Notez que le nombre d'adjacences possibles dans un graphe à  $n$  nœuds est la série de sommations  $n - 1 + n - 2 + \dots + 3 + 2 + 1 = \frac{n(n-1)}{2}$

S'il y a 6 départements dans un problème d'arrangement, le nombre total de nœuds est de 7, car nous utilisons un nœud pour représenter la région extérieure.[41]

### 2.3.1.2 Définition du graphe planaire

Tout d'abord, nous devons comprendre la définition de graphe planaire et graphe planaire maximal. Un graphe constitué d'un ensemble non vide et fini de nœuds et d'un ensemble non ordonné d'arcs est dit planaire s'il peut être dessiné en deux dimensions sans qu'aucun arc n'en croise un autre. Si un graphe d'adjacence(PAG) est planaire, on l'appelle un PAG maximal [41].

### 2.3.2 Les étapes de La théorie des graphes :

- Étape 1 : Indiquez la paire de départements dans la matrice des flux avec le flux maximum. Positionnez les nœuds correspondants dans un PAG et connectez-les.

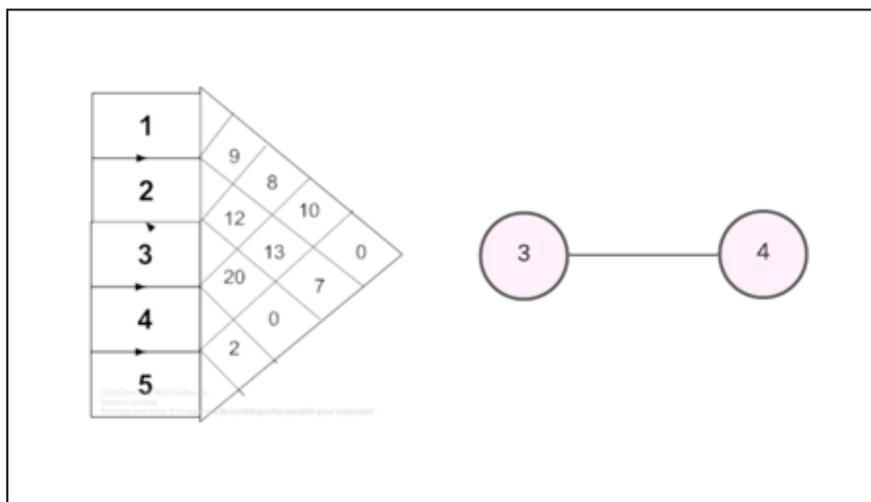


FIGURE 2.6 – Positionnement des nœuds 3 et 4 en fonction de leur flux maximum

- Étape 2 : Sélectionnez le nœud qui n'est pas encore dans le PAG et qui possède les plus gros flux avec les nœuds connectés.

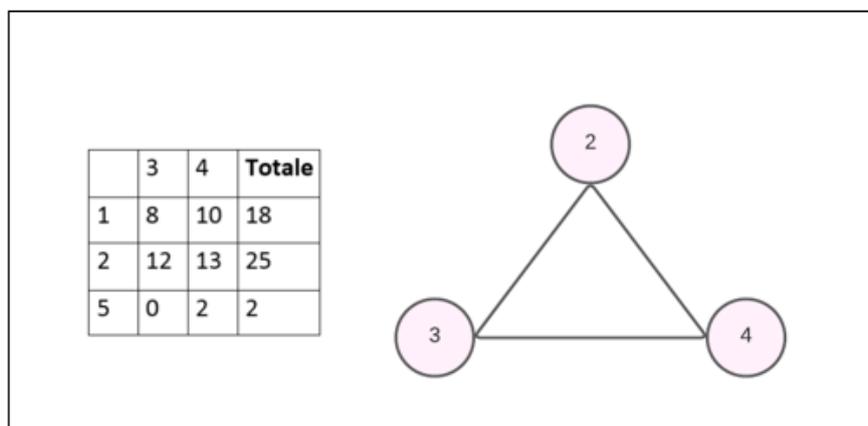


FIGURE 2.7 – Face triangulaire formée en reliant le nœud 2 qui a les plus grands débits avec les nœuds 3 et 4.

- Étape 3 : Actualisez le PAG en connectant le nœud sélectionné aux nœuds de l'étape 2. Ceci forme une face triangulaire dans le PAG.

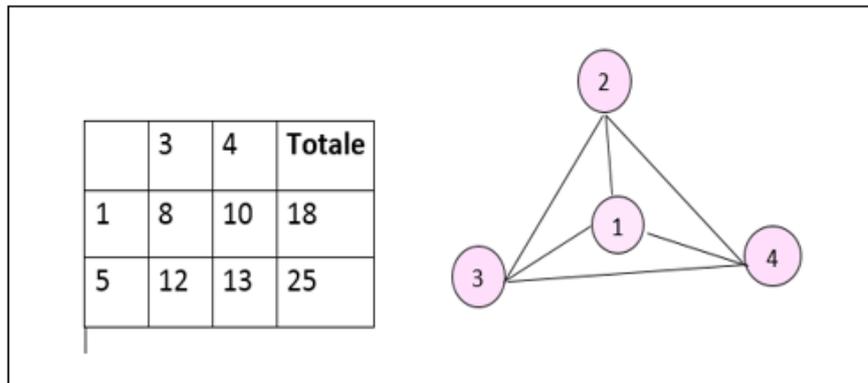


FIGURE 2.8 – Trois faces formées en plaçant le nœud 1 dans la face triangulaire.

- Étape 4 : Pour chaque colonne correspondant à un nœud non présent dans le PAG, examiner la somme des entrées de flux dans les lignes correspondant aux nœuds de la face triangulaire sélectionnée à l'étape 3. Mettre à jour le PAG en plaçant le nœud à l'intérieur de la face formée par les arcs, formant ainsi trois nouvelles faces triangulaires.

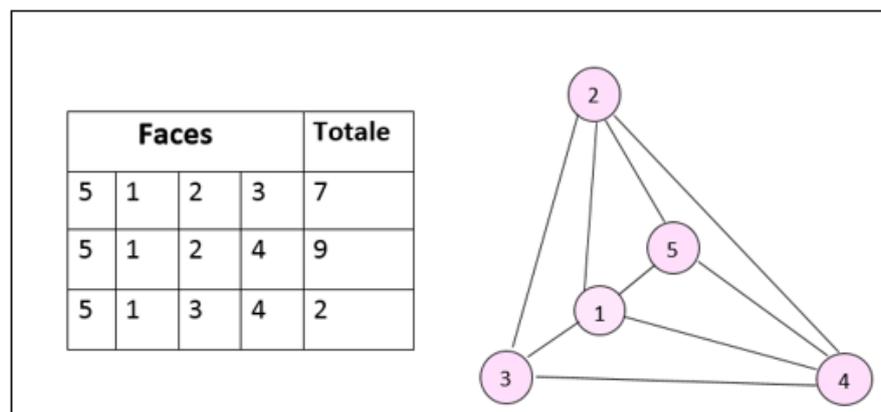


FIGURE 2.9 – Trois faces formées en plaçant le nœud 5 dans la face triangulaire 2-1-4.

- Étape 5 : Sélectionnez arbitrairement l'une des faces formées et passez à l'étape 4. Répétez l'étape 5 jusqu'à ce que tous les nœuds aient été inclus dans le PAG.

Dans cette étape en ajoutant un nœud 6 qui représente l'environnement externe, puis en dessinant des nœuds à l'intérieur de chaque face et en traçant des arcs entre les nœuds de manière à ce qu'ils coupent les limites communes partagées par les faces adjacentes. Les lignes de délimitation indiquent une disposition qui ne tient pas compte des exigences de forme et d'espace.

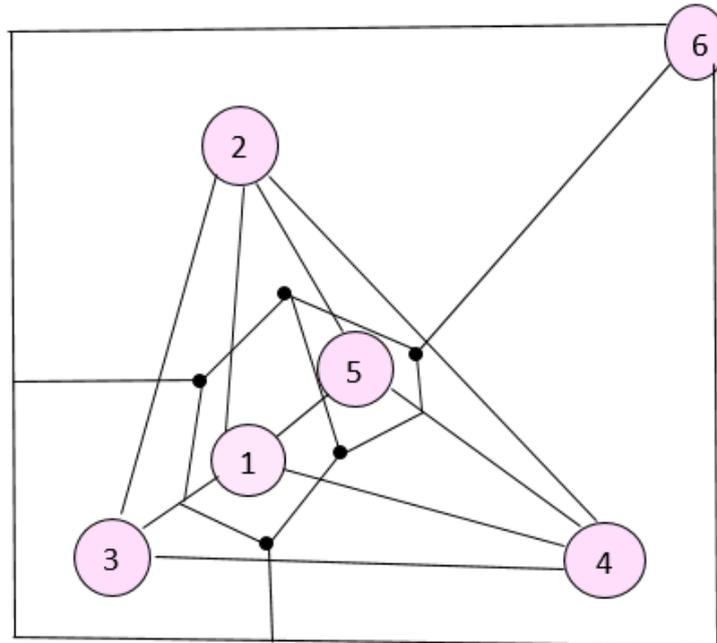


FIGURE 2.10 – dual graphe d'adjacence planaire maximal

— Étape 6 : Nous développons une nouvelle disposition basée sur le modèle PAG.

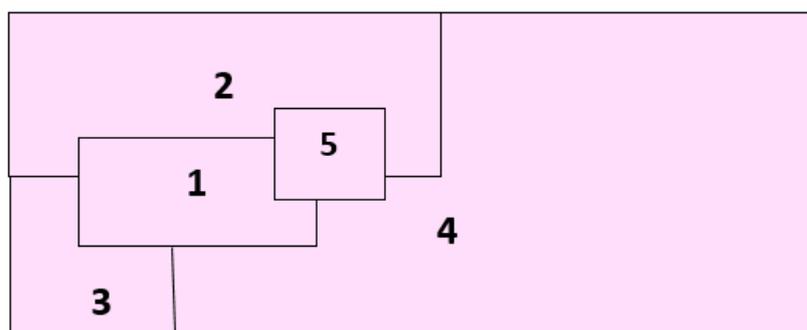


FIGURE 2.11 – Disposition finale obtenue à partir d'un dual.

### 2.3.3 Algorithme MST (modified spanning tree) pour un problème de disposition d'une seule rangée

C'est un algorithme qui trouve la disposition d'un ensemble de machines sous la forme d'un arbre (un arbre est un ensemble d'arcs reliant chaque noeuds à tous les autres sans former de cycles), ces machines peuvent être représentées comme des nœuds reliés entre eux par des arcs sans former de cycle, ce qui signifie que chaque nœud a exactement 2 arcs émanant de lui, sauf le premier et le dernier. les arcs sont des poids qui représentent le produit du flux et de la distance entre les 2 nœuds adjacents donc le but est de placer dans des emplacements adjacents la paire de machines qui contribuent le plus à la valeur objectif.

### 2.3.4 Les étapes de l'algorithme :

- Step 1 : Déterminer d'abord la matrice des poids d'adjacence  $[ f'_{ij} ]$  tel que :  
 $F'_{ij} = (f_{ij})(d_{ij} + 0.5(l_i + l_j))$  sachant que :  
 $F_{ij}$  : La matrice de flux entre les machines  
 $D_{ij}$  : La matrice de clearance  
 $L_i$  : La longueur de la machine
- Step 2 : Une fois que nous avons calculé  $f'_{ij}$  nous cherchons la plus grande valeur dans cette matrice et nous désignons les correspondants  $i, j$  avec  $i^*$  et  $j^*$  connectez les machines  $i^*, j^*$
- Step 3 : Trouver le plus grand élément  $f'_{i^*k}, f'_{j^*l}$  dans les lignes  $i^*, j^*$   
Si  $f'_{i^*k} \geq f'_{j^*l}$  connecter  $k$  à  $i^*$  et supprimer la ligne  $i^*$  et la colonne  $i^*$  à partir de la matrice  $f'_{ij}$  et définissez  $i^*=k$ , parce qu'elle a déjà 2 machines adjacentes ( $j^*, k$ ) et que chaque machine a au maximum 2 machines adjacentes dans un problème de disposition single row Sinon connecter la  $j^*$  et supprimer également la ligne  $j^*$  et la colonne  $i^*$  à partir de la matrice  $f'_{ij}$  et définissez  $j^*=l$
- Step 4 : Répétez l'étape 3 jusqu'à ce que toutes les machines soient connectées, à la fin, nous trouverons une séquence qui détermine la disposition des machines données.

### Exemple :

Un Fastfood prépare et vend cinq variétés d'articles de restauration rapide A, B, C, D et E. Chaque article doit passer par une ou plusieurs des quatre étapes (opération) de préparation (par exemple, ajouter de la tomate, de la laitue et d'autres ingrédients, chauffer un article préparé au micro-ondes, etc.). Les quatre étapes doivent être positionnées le long d'une ligne droite de façon chaîne pour maximiser l'utilisation de l'espace. La demande pour chaque article dans une semaine typique est donnée dans le tableau 2.1 avec la séquence des étapes que chaque article doit subir.

1. Développez une matrice de flux qui montre le nombre de transactions entre chaque paire d'étapes. Ensuite, déterminez une disposition sur une seule ligne à l'aide de l'algorithme MST.

Supposons que chaque ensemble d'étape (opération) adjacents soit séparé d'une distance égale à la moitié de la longueur réservée pour un opérateur qui effectue cette opération (La longueur réservée est 1 feet pour chaque étape)

2. Résolvez à nouveau le problème sous les nouvelles restrictions en utilisant l'algorithme MST.

Repas	Routage	Demande
A	1-2-4-3	10
B	1-3-4	5
C	1-4-3-2	20
D	1-2-4	8
E	4-1-2-3	15

TABLE 2.1 – Les données, la séquence des étapes que chaque article doit subir.

**Solution :**

1. la matrice des flux :

$$f_{ij} = \begin{bmatrix} - & 33 & 5 & 35 \\ 33 & - & 35 & 18 \\ 5 & 35 & - & 35 \\ 35 & 18 & 35 & - \end{bmatrix}$$

FIGURE 2.12 – matrices de flux

Clearance = 0 .5

2. Application de l'algorithme MST

— Étape 1 : Déterminer d'abord la matrice des poids d'adjacence  $F'_{ij} = (f_{ij})(d_{ij} + 0.5(l_i + l_j))$

$$f'_{ij} = \begin{bmatrix} - & 49.5 & 7.5 & 52.5 \\ 49.5 & - & 52.5 & 27 \\ 7.5 & 52.5 & - & 52.5 \\ 52.5 & 27 & 52.5 & - \end{bmatrix}$$

FIGURE 2.13 – matrices de flux  $f'_{ij}$

- Étape 2 : Trouvez le plus grand élément de  $f'_{ij}$  et les  $i, j$  correspondants. La plus grande valeur = 52.5 correspond aux (4,1) ou (4,3) ou (3,2) on va choisir (4,1)

	1	2	3	4
1	0	49.5	7.5	
2	49.5	0	52.5	27
3	7.5	52.5	0	52.5
4		27	52.5	0

1	4
---	---

- Étape 3 : Trouver le plus grand élément  $f'_{i^*k}, f'_{j^*l}$  de la ligne  $i^*, j^*$  de la matrice Si  $f'_{i^*k} > f'_{j^*l}$  connecter  $k$  à  $i^*$ , supprimer la ligne  $i^*$ , colonne  $i^*$  à partir de la matrice et définissez  $i^* = k$ . Sinon, connectez  $l$  à  $j^*$ , supprimez la ligne  $j^*$ , la colonne  $j^*$  de la matrice et définissez  $j^* = l$ . Définir  $f'_{i^*j^*} = f'_{i^*i^*} = -\infty$ . La plus grande valeur dans les lignes 4 et 1 = 52.5 qui correspond à la colonne 3

	1	2	3	4
1	0	49.5	7.5	
2	49.5	0	52.5	27
3	7.5	52.5	0	52.5
4		27		0

1	4	3
---	---	---

- Étape 4 : Répétez l'étape 3 jusqu'à ce que toutes les machines soient connectées. La séquence des machines obtenue détermine la disposition des machines. On cherche la plus grande valeur dans les lignes 1 et 3= 52.5 correspond à la colonne 2

	1	2	3	4
1	0	49.5	7.5	
2	49.5	0	2.5	27
3	7.5		0	52.5
4		27		0

**Solution :**

1	4	3	2
---	---	---	---

## 2.4 Les algorithmes d'amélioration

Les algorithmes d'amélioration sont très simples et faciles à comprendre et à mettre en œuvre. Parce qu'ils produisent des solutions raisonnablement bonnes, ces algorithmes ont également été appliqués pour résoudre le problème d'ordonnement, le problème de partitionnement de graphes et d'autres problèmes combinatoires complexes qui sont très difficiles à résoudre de manière optimale. En fait, les algorithmes 2-opt et 3-opt discutés dans cette section ont d'abord été utilisés pour résoudre le problème du voyageur de commerce **Syslo et al., 1983**. Comme leur nom l'indique, les algorithmes d'amélioration améliorent une solution de départ fournie par l'utilisateur, qui doit être réalisable. Les algorithmes d'amélioration modifient systématiquement la solution initiale et évaluent la solution modifiée résultante. Si c'est mieux, la modification est rendue permanente. Sinon, la modification systématique est poursuivie jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de produire de meilleures solutions.

### 2.4.1 L'algorithme 2-Opt

L'algorithme 2-Opt, introduit par **Croes et al., 1958** a été utilisé pour la première fois pour résoudre le problème du voyageur de commerce, comme son nom l'indique, il utilise une solution initiale comme point de départ et il commence à l'améliorer, ce qui signifie que nous devons proposer une solution réalisable au début si nous ne possédons pas une. Il consiste à appliquer le mécanisme de permutation en échangeant des paires de départements. et il évalue la solution modifiée obtenue par la suite. Ainsi, lorsqu'une meilleure solution est trouvée, la modification est rendue permanente. Sinon, à chaque itération, on échange toutes les combinaisons jusqu'à ce qu'aucune meilleure solution ne soit trouvée., voici comment il fonctionne exactement :

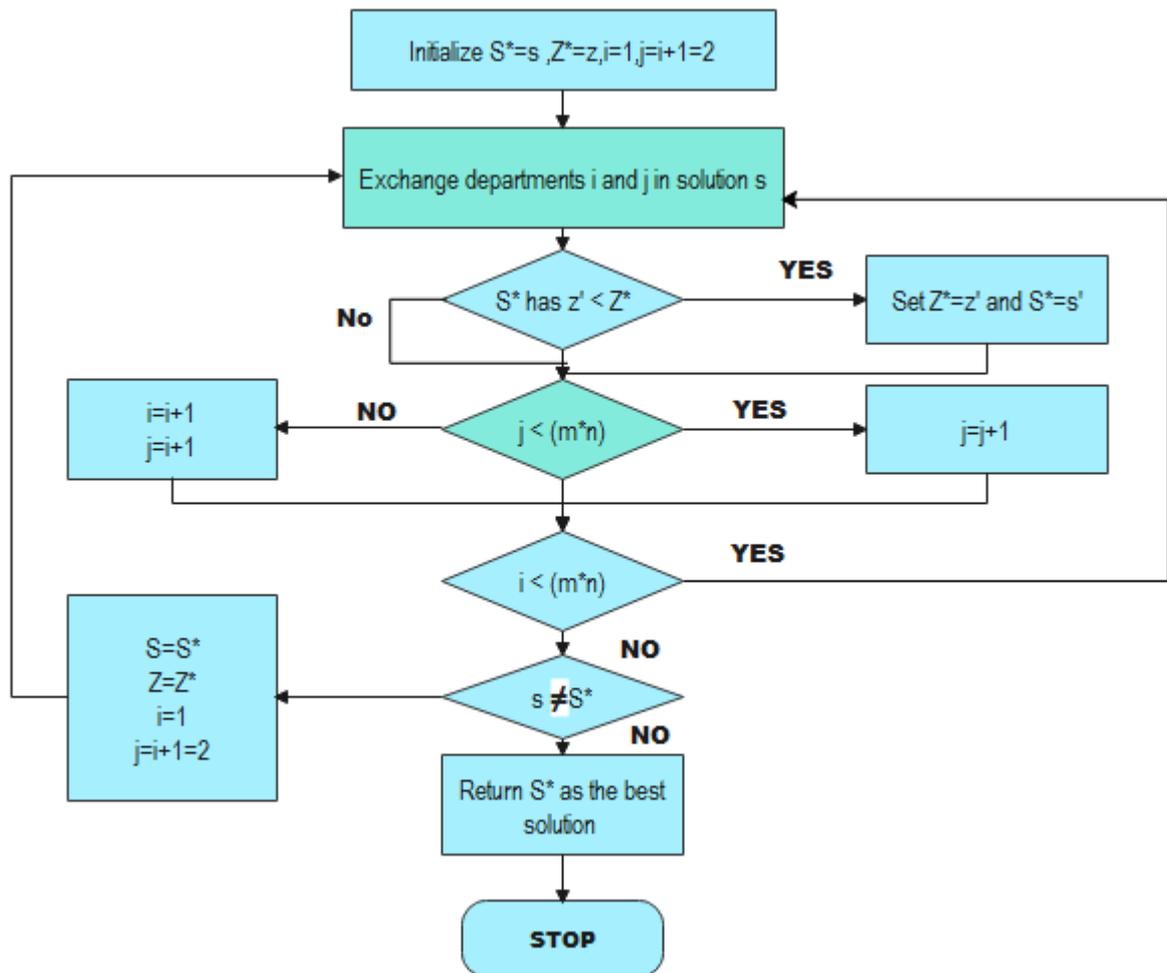


FIGURE 2.14 – les étapes de l'algorithme 2-Opt

L'algorithme 2-opt se compose des trois étapes suivantes :

- Étape 1 : Soit  $S$  la solution initiale fournie par l'utilisateur et  $z$  son OFV. On définit  $S^* = S, z^* = z, i = 1; j = i + 1 = 2$ .
- Étape 2 : considérer l'échange entre les positions des départements  $i$  et  $j$  dans la solution  $S$ . Si l'échange aboutit à une solution  $S^{\wedge}$  qui a un OFV  $z^{\wedge} < z^*$ , définir  $z^* = z^{\wedge}$  et  $S^* = S^{\wedge}$ . Si  $j < mn$ , définir  $j = j + 1$ ; sinon, définir  $i = i + 1, j = i + 1$ .

Si  $i < mn$ , répéter l'étape 2 ; sinon, passer à l'étape 3.

- Étape 3 : Si  $S \neq S^*$ , définir  $S = S^*$ ,  $z = z^*$ ,  $i = 1$ ,  $j = i + 1 = 2$  et passer à l'étape 2. Sinon, retourner  $S^*$  comme étant la meilleure solution pour l'utilisateur. Stop.

**Exemple** Développez une disposition pour les matrices de la figure 2.15 en utilisant l'algorithme 2-opt. soit les matrices  $f_{ij}$  et  $d_{ij}$  qui représentent la matrice de flux et la matrice d'adjacence

$$f_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 17 & 12 & 11 \\ 17 & 0 & 12 & 4 \\ 12 & 12 & 0 & 4 \\ 11 & 4 & 4 & 0 \end{bmatrix} \quad d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

FIGURE 2.15 – matrices de flux et de distance

**solution** Supposons qu'une solution initiale dans laquelle les départements 1, 2, 3, et 4 sont affectés aux emplacements 1, 2, 3, et 4 respectivement (voir Figure 2.14). Dans la figure, les lieux sont identifiés entre parenthèses.

L'OFV de la solution initiale est  $(17)(1) + (12)(1) + (11)(2) + (12)(2) + (4)(1) + (4)(1) = 83$  on note que m et n sont le nombre de colonnes et de lignes respectivement (2\*2).

- Étape 1 : Soit S la solution initiale dans laquelle les départements sont affectés comme indiqués dans la figure 2.13 et  $z = 83$ ; Set  $S^* = S$ ;  $z^* = 83$ ;  $i = 1$ ;  $j = i + 1 = 2$ .

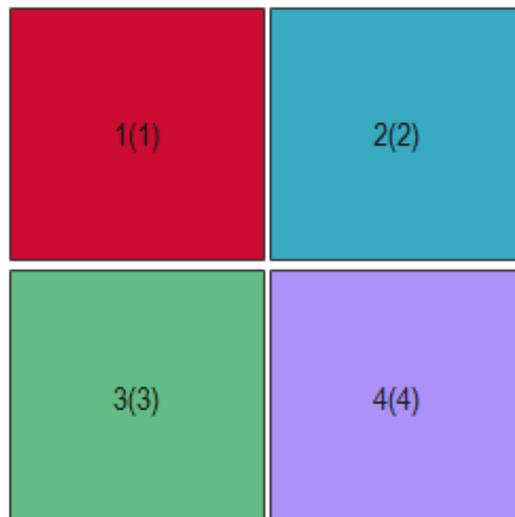


FIGURE 2.16 – Solution initiale en utilisant 2-opt

- Étape 2 : Considérons l'échange des positions des départements 1 et 2. La solution qui en résulte est présentée à la figure (2.15). L'OFV de cette solution est  $(17)(1) + (12)(2) + (11)(1) + (12)(1) + (4)(2) + (4)(1) = 76$ . Parce que l'échange des positions des départements 1 et 2 donne une solution avec  $OFV = 76 < 83$ , définissez  $z^* = 76$  et stockez cette solution comme  $S^*$ . Parce que  $j = 2 < mn = 4$ , définissez  $j \rightarrow j + 1 = 2 + 1 = 3$ .

Nous avons  $i = 1 < 4$ , donc répétez la même procédure pour obtenir une solution avec un OFV de 81. Comme cette solution n'est pas meilleure que la meilleure solution actuelle, elle est rejetée.

Parce que  $j = 3 < mn = 4$ , on fixe  $j \rightarrow j + 1 = 3 + 1 = 4$ . On obtient  $i < 4$ , donc on répète l'étape 2. L'échange suivant a le même OFV que la solution initiale, il est donc écarté.

- Étape 3 : Puisque  $S \neq S^*$ , définir  $S = S^*$ ,  $z = 76$ ,  $i = 1$ ,  $j = i + 1 = 2$  et passer à l'étape 2.
- Étape 2 : Puisqu'aucun des échanges n'aboutit à une solution dont l'OFV est inférieur à 76, passez à l'étape 3.
- Étape 3 : Parce que  $S = S^*$ , renvoyer  $S^*$  comme la meilleure solution à l'utilisateur. Stop.

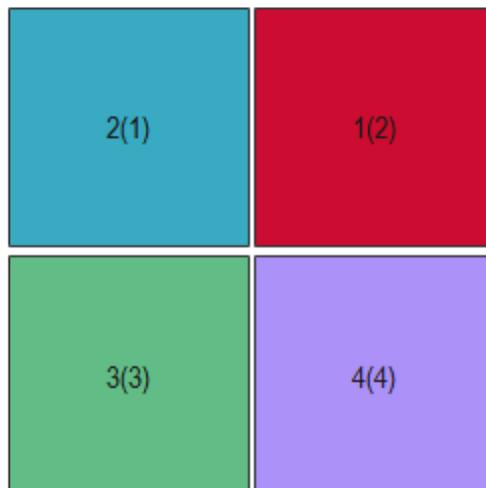


FIGURE 2.17 – Solution après avoir échangé les positions des départements 1 et 2

## 2.5 Les algorithmes hybride

Parce que tous les algorithmes d'amélioration nécessitent une solution initiale et en général, la meilleure solution est la disposition finale produite par un algorithme d'amélioration, le lecteur avisé peut avoir pensé à utiliser une solution produite par un algorithme de construction comme solution de départ ou solution initiale . pour un algorithme d'amélioration. En fait, des algorithmes utilisant deux ou plusieurs types de techniques de résolution existent et ils sont connus sous le nom d'algorithmes hybrides ou d'algorithmes composites. Certains autres algorithmes qui ont les caractéristiques des algorithmes optimaux et heuristiques ont également été placés dans la catégorie d'algorithmes hybrides (Kusiak et Heragu, 1987). Dans le sections suivante , nous présentons autres types d'algorithme qui sont les algorithmes optimaux.

## 2.6 Les algorithmes optimal

Les algorithmes optimaux sont ceux qui garantissent de produire la meilleure solution ou au moins une meilleure solution parmi d'autres meilleures solutions, tandis que les heuristiques tentent de générer une solution, mais il n'y a aucune garantie qu'elle sera la meilleure, ils sont utiles pour un problème de grande taille où nous ne pouvons pas utiliser les algorithmes optimaux.

### 2.6.0.1 Le problème D'affectation quadratique (QAP)

Le problème d'affectation quadratique ( quadratic assignment problem) a été formulé pour la première fois par **Koopmans** et **Beckmann** en 1957. Il tente d'attribuer un ensemble de départements à un ensemble d'emplacements et vice versa à condition que le nombre de départements et d'emplacements soit égaux et en supposant que tous les départements ont une taille égale. Dans le problème QAP la fonction objectif est une fonction quadratique (du second degré), les variables et les contraintes sont des fonctions linéaires. nous distinguons deux cas particuliers du QAP : LAP et TSP.

- *LAP* : Signifie linear assignment problem (problème d'affectation linéaire), il s'agit d'affecter chaque élément d'un ensemble d'objets à un élément unique d'un autre ensemble de même taille.
- *TSP* : représente le problème du voyageur de commerce. dans la méthode suivante, nous nous intéresserons à LAP et QAP

## 2.6.1 L'algorithme Branch and bound

**Gilmore** (1962) et **Lawlers** (1963) ont été les premiers à développer indépendamment l'algorithme de banch and bound qui tente de résoudre de façon optimale la formule QAP discutée précédemment. L'énoncé général du problème est le suivant : il y a  $n$  installations (machines ou départements) qui doivent être assignées à un nombre égal d'emplacements, une seule installation doit être assignée à chaque emplacement, nous reconnaissons une distance entre chaque paire d'emplacements ( $d$ ) et un flux qui représente la quantité de pièces déplaçant entre chaque paire d'installations, ces deux données doivent être symétriques ce qui signifie que la distance entre l'emplacement 1 et 2 par exemple est la même distance entre l'emplacement 2 et 1, et le flux entre l'installation 1 et 2 est également égal au flux dans la direction opposée. La fonction objectif du QAP est égale au coût de la manutention d'une solution réalisable. Elle est représentée comme suit :

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n f_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \quad (2.1)$$

en notant que :

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si le département } i \text{ est dans l'emplacement } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$x_{jl} = \begin{cases} 1 & \text{si le département } j \text{ est dans l'emplacement } l \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.3)$$

### 2.6.1.1 Les étapes de l'algorithme

— *Étape<sub>0</sub>* :

Nous commençons par donner une solution réalisable au problème, disons que nous assignons le département 1 à l'emplacement 1, le département 2 à l'emplacement 2 et ainsi de suite, puis nous calculons la valeur de la fonction objectif (OFV) de cette solution en utilisant la formule (2.1), nous fixons la limite supérieure (The upper bound (UB) égal à l'OFV.

— *Étape<sub>1</sub>* :

Calculer la borne inférieure (lower bound (LB)) en résolvant un LAP avec la matrice  $w_{ij}$  qui représente la matrice des coûts, chaque élément de cette matrice est obtenu en calculant le produit scalaire des vecteurs  $f_i$  et  $d_i$

$f_i$  est obtenu en supprimant l'élément  $f_{ii}$  et en réarrangeant les éléments restants en ordre décroissant.

$d_i$  est obtenu de la même façon, c.-à-d. à partir de la matrice de distance, mais nous devons réarranger le reste en ordre croissant,

— *Étape<sub>2</sub>* :

Calculer LB des autres nœuds en résolvant un LAP avec  $w_{ij}$  en utilisant un algorithme appelé (the Hungarian method) dans laquelle chaque élément de  $w_{ij}$  est

obtenu en additionnant  $w'_{ij}$  et  $w''_{ij}$ , ces deux derniers sont trouvés comme suit :  
 $w_{ij}$  s'obtient par l'expression :

$$\sum_{k=1}^q f_{ik}d_{js_k} \quad \text{avec} \quad k \in s, i \notin s, s_k \in L, j \notin L \quad (2.4)$$

avec  $s$  est un sous-ensemble de  $n$  départements  $s = \{1, 2, \dots, q\}$  affecté à un sous-ensemble de  $n$  emplacements  $L = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$

chaque élément de  $w''_{ij}$  est égal à la moitié du produit scalaire de  $f_i$  et  $d_j$  pour  $i$  et  $j$  qui ne sont pas dans  $S$  et  $L$ ,  $f_i$  est obtenu en supprimant l'élément  $f_{ii}$  et en réarrangeant les éléments restants en ordre décroissant et  $d_j$  est obtenu en supprimant l'élément  $d_{jj}$  et en réarrangeant les éléments restants en ordre croissant

- *Étape<sub>3</sub>* : Si le LB d'un nœud calculé à l'étape 2 est supérieur à UB, élaguer ce nœud. Si un nœud correspond à une solution réalisable, et que la OFV de cette solution réalisable est inférieure à UB, définir  $UB = OFV$  de la solution réalisable. S'il y a un ou plusieurs nœuds avec  $LB < UB$ , sélectionner l'un d'entre eux arbitrairement, formez  $n - p$  nœuds avec chaque nœud correspondant à l'affectation du département  $p + 1$  à chaque département restant. du département  $p + 1$  à chaque emplacement restant, non attribué et ouvert, définissez  $p = p + 1$  et passez à l'étape 2. à l'étape 2. Sinon, on arrête. Retourner la meilleure solution jusqu'à présent comme solution optimale.

## 2.7 Recherche tabou

Cette méthode peut être superposée à d'autres techniques de recherche, comme le 2-opt et le recuit simulé, afin d'améliorer l'efficacité de la recherche et d'éviter les blocages dans les optimums locaux. C'est une procédure sans mémoire, on peut examiner de façon répétée des solutions ou des espaces de solutions, **Glover** (1990) suggère d'utiliser des structures de mémoire à long terme ; elle est représentée par une liste tabou qui contient les coups qui sont temporairement interdits ; son rôle évolue au cours de la solution ; les stratégies d'intensification et de diversification conduisent aux meilleures solutions pour des problèmes combinatoires difficiles (NP-hard).

### 2.7.1 L'algorithme de la recherche tabou :

- *Étape<sub>1</sub>* : Relever les matrices de flux (F) et de distance (D). Construire la matrice de mémoire à long terme de taille  $n \times n$ , où  $n$  est le nombre de départements
- *Étape<sub>2</sub>* : Générer une solution initiale, obtenez des valeurs pour les paramètres de mémoire à court terme suivants : taille de la liste tabou ( $t$ ) et nombre maximal d'itérations ( $v$ ). Construire le vecteur de la liste de tabou (TL) et définir le compteur d'itérations  $k = 1$ .

- *Étape<sub>3</sub>* : pour l'itération  $k$ , examiner toutes les paires d'échange possibles avec la solution actuelle, puis effectuer l'échange  $i, j$  qui conduit à la réduction de l'OFV et satisfait à l'une des deux conditions suivantes :
  - a. L'échange  $i, j$  ne figure pas dans la liste des tabous.
  - b. Si l'échange  $i, j$  est dans la liste tabou, il répond aux critères d'aspiration.
 Mettre à jour le vecteur liste tabou TL en incluant la paire  $i, j$  comme premier élément dans TL. Si le nombre d'éléments dans TL est supérieur à  $v$ , supprimer le dernier élément. Actualiser la matrice LTM en fixant  $LTM_{ij} = LTM_{ij} + 1$ .
- *Étape<sub>4</sub>* : si  $f(i) \leq f(i^*)$ , alors nous avons trouvé une meilleure solution Appliquer  $i^* = i$ , mettre à jour TL et les critères d'aspiration, si une condition d'arrêt est atteinte, stop. Sinon, retour à Étape 2

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les approches de résolution démontrées par les différentes classifications de méthodes. tout d'abord, nous avons examiné les approches classiques parmi lesquelles nous avons discuté la SLP et la théorie des graphes, elles sont basées sur des techniques de visualisation qui transforment les données en mesures qualitatives. Ensuite, pour les problèmes complexes, nous avons besoin de méthodes plus systématiques et informatisées telles que les algorithmes optimaux et les algorithmes heuristiques.

Enfin, ces algorithmes ou techniques de résolution doivent être développés pour résoudre des modèles mathématiques tels que le problème de la disposition d'une seule rangée discuté dans le troisième chapitre.

# Chapitre 3

## Multirrow facility layout problem

### 3.1 Introduction :

Le problème de la disposition des installations sur plusieurs rangées est un problème industriel commun qui concerne l'affectation de  $n$  départements à  $m$  emplacements sur plusieurs rangées, plus précisément sur 3 rangées ou plus, dans ce chapitre, nous allons passer en revue certaines des notions les plus importantes concernant ce sujet. Nous proposons d'abord une formulation de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (Mixed integer linear programming) qui utilise des variables continues pour représenter l'emplacement des départements dans les coordonnées  $x$  et  $y$  pour des départements de surface égale et inégale. Il est important de noter que le problème d'aménagement d'installations à rangées multiples n'est pas un sujet bien exploré, les chercheurs se sont concentrés sur le problème d'aménagement à une ou deux rangées, même si le MRFLP a un rôle extrêmement important lorsque l'espace est un facteur limitant.

## 3.2 État d'art

Actuellement, une variété croissante de FLP a été développée, en incluant la notion de rangée, il s'agit d'un problème NP difficile [13]; le modèle DRFLP avec des départements disposés en deux rangées peut être étendu au modèle MRFLP qui est un arrangement avec trois rangées ou plus, il comporte un nombre donné de rangées où les départements ont la même hauteur (égale à la hauteur de la rangée), les distances entre les rangées adjacentes sont équivalentes et les départements sont généralement affectés à n'importe quelle rangée[2]. Certains chercheurs ont discuté des avantages de MRFLP par rapport au rangé unique SRFLP pour les systèmes de fabrication flexibles[12]. Des modèles ont été élaborés en vue de formuler ce problème, comme le QAP [14] et le modèle d'optimisation semi-définie SDO pour résoudre MRFLP en considérant la minimisation de l'espace entre les machines adjacentes[8]. Formulation d'un modèle mathématique qui présente une méthodologie d'optimisation MILP à deux phases, en utilisant également le solveur CPLEX, élaboration d'un algorithme innovant d'évolution différentielle discrète et application de la méthode de Taguchi pour promouvoir le réglage des paramètres de l'algorithme dans toutes les instances de différentes tailles afin de traiter le problème d'agencement à double rangée de contraintes cDRFLP ont considéré trois types de contraintes (contraintes de positionnement, d'ordonnancement et de relation)[3]. Développement d'un problème d'agencement des installations à espace libre des multiples rangées (SF-MRFLP) vise à obtenir un agencement non chevauchant des départements, pour résoudre ce problème un algorithme de recherche de voisinage variable (VNS) est proposé [4]. Un modèle fuzzy a été développé pour trouver des solutions aux problèmes d'implantation multi-rangs en tenant compte de l'incertitude de la demande de produits, ce problème est résolu en utilisant un algorithme génétique proposé par[17]. Des algorithmes heuristiques ont été proposés [15] Ainsi, les problèmes associés à un arrangement multi-objectif et multi-rangée qui consiste à minimiser le coût et le temps de la manutention moyenne. a été utilisé pour résoudre ces problèmes, l'algorithme de la recherche Tabou et l'algorithme génétique[16]. Un algorithme heuristique appelé l'Algorithme de recherche Harmony est utilisé pour déterminer la meilleure séquence de machines à disposer en plusieurs rangées afin de minimiser les deux objectifs simultanément [5].Présentation d'un outil robuste de conception de la disposition des machines qui minimise la distance de manutention à l'aide d'un algorithme génétique (AG), en tenant compte de l'incertitude de la demande et de la maintenance des machines, celles-ci sont disposées en plusieurs rangées, les expériences ont été menées en utilisant onze ensembles de données de référence qui considèrent trois scénarios : maintenance préventive, maintenance corrective et maintenance préventive et corrective[19].

### 3.3 Définition du problème

Le problème de l'aménagement des installations est un problème industriel commun consistant à répartir un nombre donné de départements à un nombre égal d'emplacements, il cherche à trouver l'emplacement efficace de ces départements dans une zone d'atelier donnée afin de réduire le coût global de la manutention et de fournir un espace de travail efficace, tout cela en respectant un certain nombre de contraintes. Dans ce chapitre, nous considérons le problème du placement des départements sur deux ou plusieurs rangées, nous nous référons à ce problème comme un problème d'aménagement d'installations à rangées multiples et nous divisons cette classe de problèmes en deux catégories : le problème d'aménagement d'installations à deux rangées et le problème d'aménagement d'installations à rangées multiples où ce dernier contient 3 rangées ou plus

#### 3.3.1 Aménagement de l'installation en double rangée :

Dans le cas de la disposition en double rangée, le flux entre les départements est géré par un AGV qui fait des allers-retours le long du couloir qui sépare les deux rangées de départements.

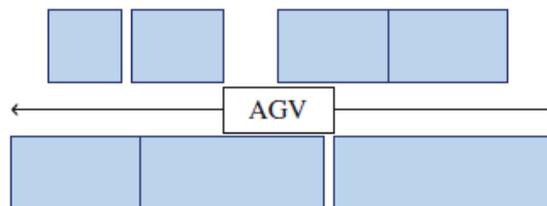


FIGURE 3.1 – DRFLP avec un système de manutention AGV[]

#### 3.3.2 Aménagement de l'installation sur plusieurs rangées :

Selon **Hungerlander P** un problème de disposition sur plusieurs rangées (MRLP) place un ensemble d'installations rectangulaires sur un nombre donné de rangées dans un espace bidimensionnel, de sorte que la somme pondérée totale des distances centre-à-centre entre toutes les paires d'installations soit minimisée. Dans ce type de configuration, chaque installation peut être affectée à n'importe laquelle des rangées données. Ces rangées ont toutes la même hauteur et les distances entre les rangées adjacentes sont toutes égales.

## 3.4 Modèle pour le problème de disposition sur plusieurs rangées avec des départements de surface égale

### 3.4.1 Le problème d'affectation quadratique (QAP)

Le problème d'affectation quadratique (quadratic assignment problem) a été formulé pour la première fois par **Koopmans** et **Beckmann** en 1957. Il tente d'attribuer un ensemble de départements à un ensemble d'emplacements et vice versa à condition que le nombre de départements et d'emplacements soit égaux et en supposant que tous les départements ont une taille égale. Dans la formulation QAP la fonction objectif est une fonction quadratique (du second degré) des variables et les contraintes sont des fonctions linéaires des variables. nous distinguons deux cas particuliers du QAP : LAP et TSP.

- *LAP* : Signifie linear assignment problem (problème d'affectation linéaire), il s'agit d'affecter chaque élément d'un ensemble d'objets à un élément unique d'un autre ensemble d'objets de même taille, de sorte que le coût global soit minimisé, par exemple, dans une affectation machine-opérateur, nous affectons chaque opérateur à une machine de manière à minimiser le coût global d'affectation.
- *TSP* : Signifie Traveling Salesman Problem (Le problème du voyageur de commerce). Dans le problème TSP, nous avons un ensemble de  $n$  villes et la distance entre chaque paire de villes, le problème consiste à trouver le chemin le plus court pour que nous commençons et terminions dans la même ville et que nous passions par toutes les autres villes exactement une fois. Dans la TSP, nous nous intéressons à l'affectation de chacune des  $n$  villes à l'une des  $n$  positions du chemin, de sorte que la distance totale à parcourir soit minimisée, la formulation QAP a été fréquemment utilisée pour résoudre le problème de disposition des installations, mais elle ne peut pas être utilisée dans tous les cas, car les emplacements ne sont pas connus à l'avance et la distance entre chaque deux emplacements également

#### Les paramètres :

$n$  : Nombre total de départements et de localisation.

$a_{ij}$  : Le coût fixe de la localisation du département  $i$  à l'emplacement  $j$ .

$f_{ik}$  : Flux de matériel du département  $i$  vers  $k$ .

$c_{jl}$  : Coût du transport d'une charge unitaire de matériau de l'emplacement  $j$  à  $l$ .

**Variable de décision :**

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le département } i \text{ est affecté à l'emplacement } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

La formulation du PAQ repose sur les trois hypothèses suivantes :

1.  $f_{ik}$  est indépendant de la localisation des départements
2.  $c_{jl}$  est indépendant des départements.
3. Il est moins coûteux de transporter des matériaux directement d'un département  $i$  à  $k$  que de les faire transiter par un troisième département.

l'OFV du QAP est la suivante :

$$\text{Minimiser } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} c_{jl} x_{ij} x_{kl} \quad (3.2)$$

l'OFV minimise le coût fixe de l'emplacement du département  $i$  à l'emplacement  $j$  plus le coût du transport du matériel du département  $i$  situé à l'emplacement  $j$  au département  $k$  situé à l'emplacement  $l$  Sous les contraintes :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \text{ou} \quad 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

l'équation 3.5 garantit que la variable de décision est binaire, c'est-à-dire qu'elle est égale à 1 si le département  $i$  est assigné à l'emplacement  $j$  et à 0 sinon.

l'équation 3.3 garantit que le département  $i$  est affecté à exactement un emplacement et

l'équation 3.4 garantit que l'emplacement  $j$  à exactement un département qui lui a assigné.

## 3.5 Modèle pour le problème de disposition sur plusieurs rangées avec des départements de surface inégale

Le modèle ABS pour le problème de disposition sur plusieurs rangées est assez similaire à celui du problème de disposition sur une rangée unique avec un terme absolu dans la fonction objectif et les contraintes, sauf que de nouveaux paramètres sont ajoutés puisque nous parlons d'un espace multi-dimensionnel. Comme précédemment, quelques hypothèses sont faites.

- hypothèse 1 : La forme des installations est considérée comme rectangulaire ou carrée et cela ne pose pas vraiment de problème, car la plupart des installations peuvent être rapprochées de ces deux dernières formes.
- hypothèse 2 : La deuxième hypothèse est l'orientation de l'installation, généralement la machine est placée de sorte que le point de chargement et de déchargement soit en face et le plus proche de l'allée mais parfois la structure de l'allée n'est pas connue à l'avance, pour cela des variables supplémentaires sont introduites et le modèle devient de plus en plus complexe, c'est pourquoi nous nous trouvons entre choisir un modèle précis qui prend en considération l'orientation de l'installation ou un modèle solvable qui fait une hypothèse à ce sujet, pour la partie suivante nous faisons une hypothèse sur l'orientation.

### 3.5.1 ABSMODEL 2

avant de passer au modèle, nous introduisons les paramètres suivants :

$x_i$  : Distance horizontale entre le centre du département  $i$  et VRL

$y_i$  : Distance verticale entre le centre du département  $i$  et la ligne de référence horizontale (HRL)

$l_i$  : Longueur du côté horizontal du département  $i$

$b_i$  : Longueur du côté vertical du département  $i$

$dh_{i,j}$  : Distance horizontale entre les départements  $i$  et  $j$

$dv_{i,j}$  : Distance verticale entre les départements  $i$  et  $j$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i < x_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$$

nous notons que  $l_i$  et  $b_i$  se réfèrent au côté horizontal et vertical du département et que cela ne peut être connu que si l'orientation du département est connue à l'avance, C'est pourquoi nous avons fait l'hypothèse 2 .

nous passons maintenant à la fonction objectif qui minimise le coût total du transport

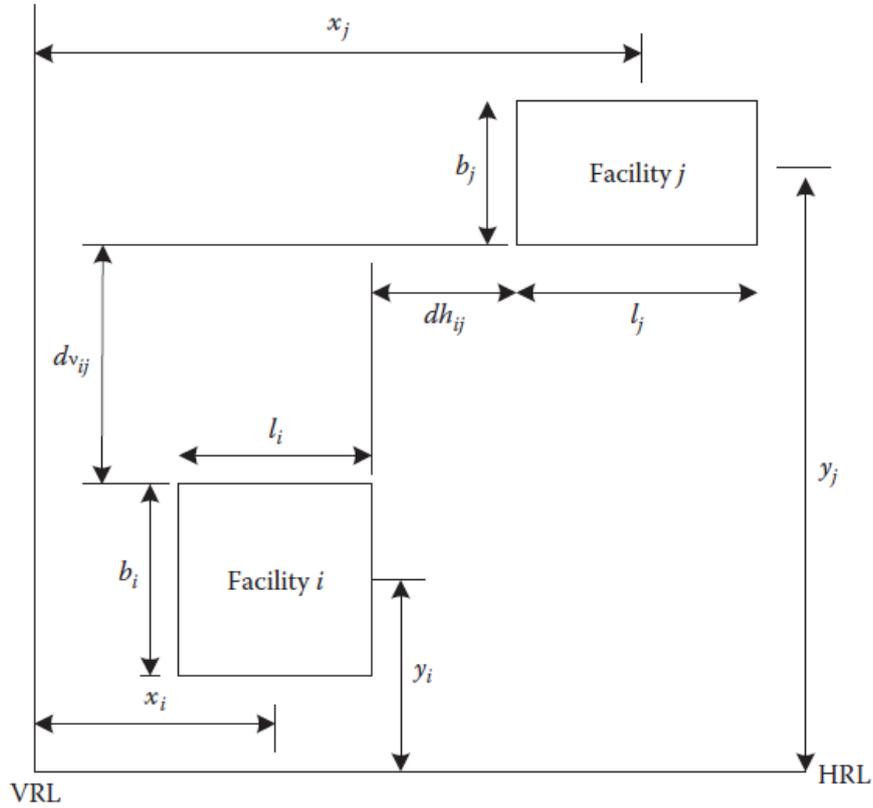


FIGURE 3.2 – Illustration des variables et paramètres de décision pour le problème de disposition sur plusieurs rangées avec des départements de surface inégale. .

des matériaux entre les départements :

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} f_{ij} (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \quad (3.7)$$

**Sous les contraintes :**

$$|x_i - x_j| + M z_{ij} \geq \frac{1}{2} (l_i + l_j) + dh_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n-1; j = i+1, \dots, n \quad (3.8)$$

$$|y_i - y_j| + M(1 - z_{ij}) \geq \frac{1}{2} (b_i + b_j) + dv_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n-1; j = i+1, \dots, n \quad (3.9)$$

$$z_{ji}(1 - z_{ij}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1; j = i+1, \dots, n \quad (3.10)$$

comme il est mentionné dans l'équation 3.10  $z_{ij}$  est égal à 1 si le département  $i$  est à gauche du département  $j$  et 0 sinon ce qui garantissent qu'une seule des deux contraintes précédentes sera respectée. , les équations 3.8 et 3.9 assurent que les départements ne se chevauchent pas dans les directions horizontale et verticale ,pour mieux comprendre, si le département  $i$  est à gauche du département  $j$  et que  $z_{ij}$  est égal à 1, l'équation 3.9 garantira que la distance verticale entre les deux départements est égale ou supérieure à la moitié de la longueur verticale des deux départements plus la distance , même si les deux départements sont parallèles et ont le même  $x_i$ . En remplaçant  $z_{ij}$  par 0 (le département  $i$  est à droite du département  $j$ ) nous aurons la même interprétation, mais dans l'autre dimension.

## 3.6 conclusion

Ce chapitre a pour objectif de présenter un état de l'art sur le MRFLP de quelques travaux déjà existants dans la littérature, et de fournir une formulation avec un Modèle Mathématique pour ce problème d'implantation avec des départements de surface égale et inégale, il permet de mettre en évidence les différentes hypothèses et méthodes de solution telles que, ABSMODEL 2. quelques contraintes proches de la réalité industrielle telles que les limites de l'atelier, l'élimination des chevauchements sur les axes X et Y, la création de rangées, afin de minimiser le nombre d'allers-retours entre les départements.

Dans le prochain chapitre, nous appliquerons notre modèle proposé à travers des cas pratiques sur plusieurs instances pour évaluer la performance du modèle, ainsi que pour interpréter et discuter les résultats obtenus sur CEPLEX associé avec EXCEL ou les facilités peuvent être configurées.

# Chapitre 4

## Développement d'un modèle pour le problème de la disposition des installations sur plusieurs rangées

### 4.1 Introduction :

Le problème de la disposition des installations sur plusieurs rangées consiste à trouver la disposition optimale d'un ensemble d'installations sur 3 rangées ou plus de manière à minimiser le coût total du flux, ce coût est mesuré par la distance rectiligne séparant les départements, multipliée par le flux projeté entre eux. MRFLP est un cas industriel commun, car les dispositifs de manutention les plus utilisés sont : les robots de manutention (utilisés pour la disposition circulaire des machines), les véhicules guidés automatiquement (AGV) (utilisés pour la disposition sur une ou deux rangées) et les robots portiques (voir figure 4.1) utilisés pour la disposition sur plusieurs rangées, dans les systèmes de fabrication flexibles et dans les applications de prise (pick-up) et de mise en place (drop-off), les robots portiques ont des axes de commande linéaires et se déplacent de haut en bas et de gauche à droite, les directions de déplacement étant à angle droit, comme illustré à la figure 4.2. Cela rend les dispositions à rangées multiples particulièrement appropriées et la somme totale pondérée des distances rectilignes centre à centre est un bon indicateur de l'efficacité du système et une bonne mesure du déplacement total d'un tel robot pour accomplir une tâche donnée. Bien que le MRFLP soit un cas d'étude important, surtout lorsque l'espace est un facteur limité, ce problème n'a pas reçu beaucoup d'attention dans la littérature, MRFLP peut être un sujet difficile à étudier parce qu'un espace minimum entre les départements est normalement requis (appelé en anglais "clearance"), pour répondre aux exigences de sécurité et de fonctionnement et parfois, il est utilisé pour permettre aux opérateurs de se déplacer le long de l'allée lorsqu'il s'agit d'un système semi-automatique. dans ce chapitre, nous avons considéré ce clearance fait partie de la largeur de la rangée lors du développement de notre modèle mathématique pour simplifier et rendre notre modèle plus efficace

Ce chapitre aborde l'étude du MRFLP avec des départements de surface égale et de MRFLP avec départements de surface inégale, dans lesquels la complexité du système augmente, il est divisé en trois parties : dans la première partie, nous avons travaillé sur la minimisation du nombre de déplacements entre chaque paire de départements, la deuxième partie vise à maximiser l'adjacence totale et la troisième partie comprend les deux fonctions objectives avec une pondération.



FIGURE 4.1 – Image 3D d'un robot portique

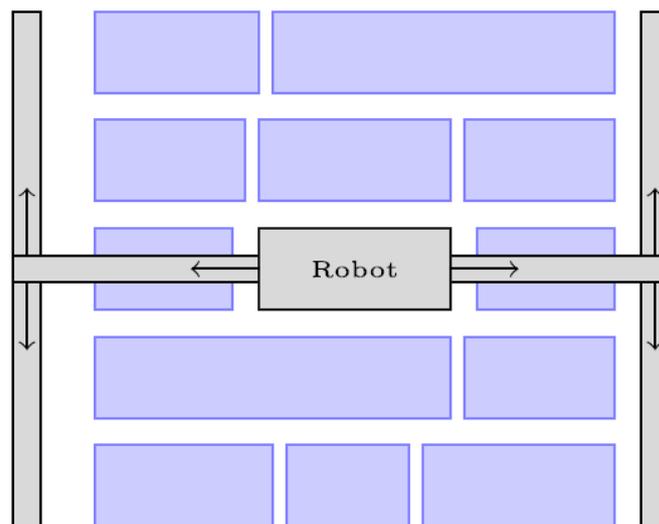


FIGURE 4.2 – configuration opérationnelle du robot portique.

## 4.2 Le modèle mathématique

### Les Hypothèses :

lors du développement de notre modèle mathématique, nous établissons les hypothèses suivantes afin de rendre notre modèle plus compréhensible et plus efficace :

- La forme des départements est rectangulaire et ils peuvent avoir une surface égale ou inégale.

- Toutes les rangées ont la même largeur.
- La largeur des départements est égale à la largeur de la rangée.
- Le coût du transport des produits entre chaque paire de départements est unitaire, car nous supposons que nous utilisons le même système de manutention.
- La matrice de flux est symétrique, ce qui signifie que le flux entre le département  $i$  et  $j$  est le même flux entre le département  $j$  et  $i$ .
- Les points de pick-up et drop-off sont considérés à partir du centre de l'installation.
- La distance entre les installations est calculée en utilisant la distance de Manhattan.
- Les produits fabriqués dans les départements (machines) sont identiques en type et en taille.

### Les paramètres du modèle :

- $N = \{f_i, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$  L'ensemble des installations.
- $l_i$  : La longueur de l'installation  $i$
- $F_{ij}$  : La matrice de flux entre les installations  $f_i$  et  $f_j$ .
- $C$  : la largeur de la rangée.
- $m$  : le nombre maximum de rangées .

### Les variables de décision :

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le département } i \text{ est à gauche de } j \text{ dans la même rangée .} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\beta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si les départements } i \text{ et } j \text{ sont placés dans des rangées différentes et que } i \text{ est en dessous de } j. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.2)$$

- $x_i$  : la distance sur l'axe des  $x$  entre le centre de département  $i$  et la ligne de référence verticale (VRL).
- $y_i$  la distance sur l'axe des  $y$  entre le centre de département  $i$  et la ligne de référence horizontale (HRL).
- $D_{ij}$  : La distance entre l'installation  $i$  et  $j$ .
- $L$  : la somme de toutes les longueurs des départements ( $L = \sum_{i=1}^n l_i$  )

### La fonction objectif :

la fonction objectif qui minimise la distance des trajets entre les départements ce qui réduira les éventuels frais de transport, elle s'exprime comme suit :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n f_{ij} d_{ij} \quad (4.3)$$

**Les contraintes :**

d) *Distance entre deux installations*

$$D_{ij} \geq (x_i - x_j) + (y_i - y_j)$$

$$D_{ij} \geq (x_j - x_i) + (y_i - y_j)$$

$$D_{ij} \geq (x_i - x_j) + (y_j - y_i)$$

$$D_{ij} \geq (x_j - x_i) + (y_j - y_i)$$

Pour obtenir des valeurs positives et significatives de la distance, nous avons utilisé quatre cas, à savoir si l'installation i est à droite de j et si la distance verticale de l'installation i est supérieure à celle de j.

b) *Contrainte de non-chevauchement*

$$x_i - x_j \geq \frac{l_i + l_j}{2} - L(1 - \alpha_{ji}), \quad 1 \leq i < j \leq n. \quad (4.4)$$

$$x_j - x_i \geq \frac{l_i + l_j}{2} - L(1 - \alpha_{ij}), \quad 1 \leq i < j \leq n. \quad (4.5)$$

$$y_j - y_i \geq C - mC(1 - \beta_{ij}), \quad 1 \leq i < j \leq n. \quad (4.6)$$

$$y_i - y_j \geq C - mC(1 - \beta_{ji}), \quad 1 \leq i < j \leq n. \quad (4.7)$$

les contraintes 4.4 et 4.5 garantissent que deux départements ne doivent pas se chevaucher sur la même rangée. les contraintes 4.6 et 4.7 garantissent que les départements ne doivent pas se chevaucher sur l'axe y et créent simultanément les rangées.

$$y_i - y_j \leq (1 - \alpha_{ij} - \alpha_{ji})(m - 1)C, \quad 1 \leq i < j \leq n. \quad (4.8)$$

$$y_j - y_i \leq (1 - \alpha_{ij} - \alpha_{ji})(m - 1)C, \quad 1 \leq i < j \leq n. \quad (4.9)$$

Les équations 4.8 et 4.9 assurent que lorsque deux départements sont placés sur la même rangée, leurs valeurs y doivent être égales.

c) *restriction sur les variables  $y_i$  et  $x_i$*

$$y_i \geq 0 \quad 1 \leq i \leq n. \quad (4.10)$$

$$y_i \leq (m - 1)C \quad 1 \leq i \leq n. \quad (4.11)$$

$$x_i \geq \frac{l_i}{2} \quad 1 \leq i \leq n. \quad (4.12)$$

$$x_i \leq L - \frac{l_i}{2} \quad 1 \leq i \leq n. \quad (4.13)$$

$$\alpha_{ij} + \alpha_{ji} + \beta_{ij} + \beta_{ji} = 1, \quad 1 \leq i < j \leq n. \quad (4.14)$$

les équations 4.10 jusqu'à 4.13 assurent l'emplacement des départements dans les rangées données.

La contrainte 4.14 assure la séparation de deux départements sur l'une des deux dimensions .

## Partie 1 : Fonction objectif 1(OF1)

La première fonction objectif, comme nous avons dit précédemment, consiste à minimiser la distance parcourue. elle est modélisée comme suit :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n f_{ij} D_{ij} \quad (4.15)$$

### 4.2.1 Expériences et résultats pour OF1 :

Le modèle mathématique pour le MRFLP sera résolu à l'aide du logiciel d'optimisation CPLEX version 12.6 sur la plateforme Windows 8.1 professionnel avec les spécificités suivantes : Intel(R) Core(TM) i3-6006U CPU @ 2.00GHz et 4,00 GO de RAM .Nous avons également connecté cplex avec excel de manière que CPLEX lit les données et écrit les résultats dans ce dernier afin d'être utilisé par un macro Excel pour dessiner et visualiser la configuration donnée avec un clic de bouton qui a été programmé avec VBA .

### 4.2.2 Application du modèle sur des départements à surface égale

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Number of facilities	6									
2											
3					(Fij)						
4	facilities	length(li)							row's width	number of rows	L(sum of all lengths)
5	1	2	0	10	20	15	7	30	1	3	12
6	2	2	10	0	5	4	12	14			
7	3	2	20	5	0	6	2	4			
8	4	2	15	4	6	0	9	16			
9	5	2	7	12	2	9	0	12			
10	6	2	30	14	4	16	12	0			
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											

FIGURE 4.3 – Les données d'un exemple de MRFLP avec des départements de surface égale

La figure 4.3 représente les données du problème, nous avons 6 départements de surface égale avec une longueur de 2 unités de distance, chacun a une largeur égale à la largeur de la rangée qui est égale à 1. Ces 6 départements doivent être assignés à 3 rangées, le flux est symétrique, par exemple le flux entre le département 1 et 2 égale à 10 (10 déplacements du département 1 vers le département 2) et le flux entre le département 2 vers le département 1 également 10. la figure 4.4 représente les résultats, la disposition



## Disposition

	I	J	K	L	M
6					
7		3		2	
8		3		2	
9		3		2	
10		1		6	
11		1		6	
12		1		6	
13		4		5	
14		4		5	
15		4		5	
16					

FIGURE 4.6 – Disposition optimale pour le MRFLP avec 6 départements en utilisant OF1

la figure 4.9 montre la disposition optimale pour assigner 6 départements à 3 rangées selon la matrice de flux donnée, ce qui signifie que le programme a trouvé le meilleur emplacement des départements de sorte que la distance totale parcourue est minimale. Si l'on prend l'exemple du département 1, il a un nombre relativement important de flux avec tous les autres départements, sauf qu'avec les départements 2 et 5, c'est pourquoi la distance entre le département 1 et ces derniers est la plus grande par rapport à la distance entre le département 1 et les autres.

### 4.2.2.1 Application de l'algorithme 2-OPT

Le 2-OPT est un algorithme d'amélioration qui résout heuristiquement un problème d'affectation. Comme son nom l'indique, il nécessite une solution initiale pour l'améliorer, simplement en échangeant des départements par paires et en observant la valeur de la fonction objectif, si la valeur de la fonction objectif des départements échangés est plus petite que la précédente, l'algorithme stockera cette dernière et la disposition qu'elle a établie, ainsi que les valeurs des  $i$  et  $j$  correspondants qui représentent l'emplacement dans lequel les départements ont été affectés. (pour plus de détails sur l'algorithme 2-OPT, voir le chapitre 2).

Pour tester la crédibilité de notre algorithme, nous avons appliqué l'algorithme d'amélioration 2opt sur les résultats établis par OF1 pour voir si la disposition donnée peut être améliorée.

## Application

l'algorithme 2-opt nécessite les données suivantes : le nombre d'installations, la disposition initiale, la matrice de distance et la matrice de flux, toutes ces données ont été observées en tant que résultats sur le logiciel cplex. Nous avons également codé l'algorithme 2-opt en utilisant le langage de programmation **PYTHON** sur **PYCHARM** , la figure 4.7 est une capture d'écran du programme python qui représente les données , la figure 4.8 est les résultats de la solution de l'algorithme 2-opt .

```
matflux = [[0,10,20,15,7,30],[10,0,5,4,12,14],[20,5,0,6,2,4],[15,4,6,0,9,16],[7,12,2,9,0,12],[30,14,4,16,12,0]];
matdist=[[0,3,1,1,3,2],[3,0,2,4,2,1],[1,2,0,2,4,3],[1,4,2,0,2,3],[3,2,4,2,0,1],[2,1,3,3,1,0]];
soli = [4,5,1,6,3,2];
solg = [0, 0, 0,0,0,0];
sol = [0, 0, 0,0,0,0];
n = 6;
```

FIGURE 4.7 – les données de l'algorithme 2 opt .

```
('dispostion finale :', [4, 5, 1, 6, 3, 2])
6
7
('fonction objectif', 640)

Process finished with exit code 0
```

FIGURE 4.8 – Les résultats de l'algorithme 2-OPT.

la solution trouvée par l'algorithme 2-opt est la même solution initiale. Cette dernière est la solution trouvée par notre modèle d'optimisation. Cela signifie que l'algorithme 2-opt n'a pas pu trouver une meilleure disposition avec une fonction objectif plus petite, ce qui prouve que notre modèle d'optimisation que nous avons établi donne une disposition optimale avec la plus petite valeur de la fonction objectif .

	I	J	K	L	M
6					
7					
8		3		2	
9					
10					
11		1		6	
12					
13					
14		4		5	
15					
16					

FIGURE 4.9 – Disposition optimale pour le MRFLP avec 6 départements donnée par OF1 et l'algorithme 2-OPT .

### 4.2.3 Application du modèle sur des départements à surface inégale

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Number of facilities	6									
2											
3					(Fij)						
4	facilities	length(li)							row's width	number of rows	L(sum of all lengths)
5	1	2	0	10	20	15	7	30	1	3	12
6	2	1	10	0	5	4	12	14			
7	3	3	20	5	0	6	2	4			
8	4	4	15	4	6	0	9	16			
9	5	2	7	12	2	9	0	12			
10	6	2	30	14	4	16	12	0			
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											

FIGURE 4.10 – Les données d'un exemple de MRFLP avec des départements de surface inégale.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2						Objectif function	702	
3	facilities	xi	yi					
4	1	4	1					
5	2	5,5	0					
6	3	1,5	1					
7	4	4	2					
8	5	6	1					
9	6	4	0					
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								

FIGURE 4.11 – Les résultats d'un exemple de MRFLP avec des départements de surface inégale.



FIGURE 4.12 – Disposition optimale pour le MRFLP avec 6 départements de surface inégale.

La figure 4.10 représente les données relatives au problème, nous disposons de 6 départements de surface inégale avec des longueurs différentes ; nous introduisons la même matrice de flux que celle de l'exemple précédent, ces 6 départements doivent être affectés à 3 rangées, La figure 4.11 montre les résultats, la figure 4.12 montre la disposition optimale.

## Partie 2 : Fonction objectif 2(OF2)

La deuxième fonction objectif basée sur l'approche qualitative, elle consiste à maximiser l'adjacence. Cette dernière est une relation de proximité (en d'autres termes, à minimiser la distance ). Cette proximité est calculée par le TCR, elle peut être calculée une fois que la disposition est choisie en introduisant une matrice de relation de proximité qui exprime la désirabilité de la localisation des installations les unes à côté des autres, cette désirabilité est exprimée avec une échelle internationale qui a l'abréviation " AEIOUX " qui est exprimée comme suit : Nécessaire (A), très important (E), important (I), importance ordinaire (O), sans importance (U) et indésirable (X). Avec les valeurs suivantes A=16, E=8, I=4, O=2, U=0 and X=-2, l'OF2 est modélisée comme suit :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n R_{ij} D_{ij} \quad (4.16)$$

### 4.2.4 Expériences et résultats pour OF2 :

Pour avoir une meilleure comparaison entre la configuration donnée par OF1 et OF2 nous avons utilisé les mêmes données en changeant seulement la matrice de flux ( $f_{ij}$ ) avec la matrice de relation de proximité ( $R_{ij}$ ).

**Disposition** : La configuration montrée dans la figure 4.15 donne la distance minimale entre les départements avec une grande proximité. Si nous prenons l'exemple du département 2, il est placé près du département 1 parce qu'il a une forte proximité et une faible relation avec les autres départements.

Après la mise en place des différents département, nous calculons le TCR obtenue à partir de cette disposition  $TCR = 16+8+8+4+2+8+4+1+1+1=53$

Plus la valeur de TCR est grande plus il y a une maximisation d'adjacence tout en respectant la matrice d'adjacence bien sûr.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
3					(Rij)						
4	facilities	length(li)							row's width	number of rows	L(sum of all lengths)
5	1	2	0	16	2	8	0	4	1	3	12
6	2	2	16	0	8	4	0	2			
7	3	2	2	8	0	4	0	8			
8	4	2	8	4	4	0	2	2			
9	5	2	0	0	0	2	0	4			
10	6	2	4	2	8	2	4	0			
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											

FIGURE 4.13 – Les données pour MRFLP pour la fonction objectif 2

	A	B	C	D	E	F	G
2						Objectif func	212
3	facilities	xi	yi				
4	1	1	1				
5	2	1	0				
6	3	3	0				
7	4	1	2				
8	5	3	2				
9	6	3	1				
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							

FIGURE 4.14 – Résultats pour MRFLP pour la fonction objectif 2



FIGURE 4.15 – Disposition optimale selon la fonction objectif 2 pour 6 départements.

## Partie 3 : La fonction d'objectif multi-critères :

La fonction objective finale est une somme pondérée des deux fonctions objectives précédentes où  $\alpha + \beta = 1$ , elle est exprimée à travers l'équation suivante :

$$\alpha \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n OF1' + \beta \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n OF2' \quad (4.17)$$

où OF1' est la première fonction objectif mais en remplaçant la matrice de flux par une matrice de flux normalisée et OF2' est la seconde fonction objectif mais en remplaçant la matrice de relation de proximité par une matrice de relation normalisée, dans le prochain titre, nous entrerons dans les détails de la normalisation.

Pour avoir une meilleure observation, nous avons utilisé les mêmes données dans la figure 4.10 de OF1 et la figure 4.13 de OF2 pour comparer entre la disposition donnée par les deux fonctions objectif précédentes et celle générée par la fonction objectif finale. Nous avons également effectué quelques simulations avec différentes valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$ , pour voir comment les différentes valeurs de ces deux dernières affectent la disposition finale et la fonction objectif .

### 4.2.5 La normalisation des données :

De nombreux algorithmes tentent à trouver des structures dans les données en comparant leurs caractéristiques. Cependant, un problème se pose lorsque les caractéristiques sont à des échelles radicalement différentes, car la caractéristique ayant la plus grande échelle dominera complètement l'autre. C'est pourquoi, dans notre modèle, nous avons choisi de normaliser la matrice des flux et la matrice des relations de proximité avec la loi de normalisation suivante, de sorte que nous obtenions des valeurs comprises entre 0 et 1 pour les deux matrices, on note que  $f1_{ij}$  est la matrice normalisée pour le flux et  $R_{ij}$  est la matrice normalisée pour la relation de proximité

$$X_{nomrnormalized} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4.18)$$

#### les différentes instances pour $\alpha$ et $\beta$

Nous avons utilisé les mêmes données pour les 3 instances en variant uniquement les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$ , les données sont représentées dans la figure 4.16.

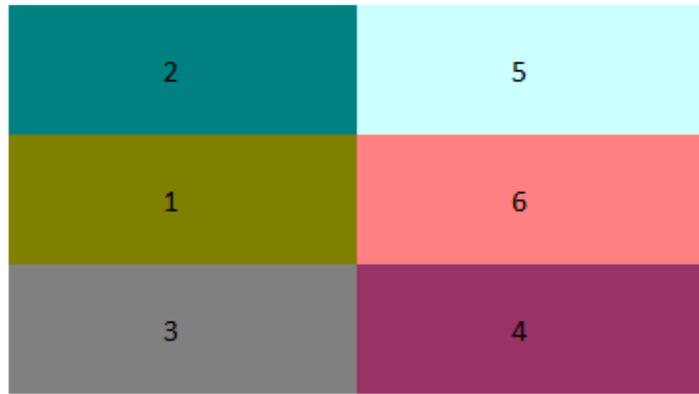
Nb facilities		Data																								
6																										
		R				R1				flow (f)				f1												
facilities	length(l)	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	row's width
1	2	0	16	2	8	0	4	0	1	0,1	0,5	0	0,25	0	10	20	15	7	30	0	0,33	0,67	0,5	0,23	1	1
2	2	16	0	8	4	0	2	1	0	0,5	0,3	0	0,13	10	0	5	4	12	14	0,33	0	0,17	0,13	0,4	0,47	number of rows
3	2	2	8	0	4	0	8	0,13	0,5	0	0,3	0	0,5	20	5	0	6	2	4	0,67	0,17	0	0,2	0,07	0,13	3
4	2	8	4	4	0	2	2	0,5	0,25	0,3	0	0,13	0,13	15	4	6	0	9	16	0,5	0,13	0,2	0	0,3	0,53	sum of all length
5	2	0	0	0	2	0	4	0	0	0	0,1	0	0,25	7	12	2	9	0	12	0,23	0,4	0,07	0,3	0	0,4	12
6	2	4	2	8	2	4	0	0,25	0,13	0,5	0,1	0,25	0	30	14	4	16	12	0	1	0,47	0,13	0,53	0,4	0	

FIGURE 4.16 – Données pour la fonction multi-objectifs pour les 3 instances.

Instance 1 :  $\alpha = 0.5$  ,  $\beta = 0.5$  :

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2						Objectif function	18,992
3	facilities	xi	yi				
4	1	1	1				
5	2	1	2				
6	3	1	0				
7	4	3	0				
8	5	3	2				
9	6	3	1				
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							

FIGURE 4.17 – Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la première instance .



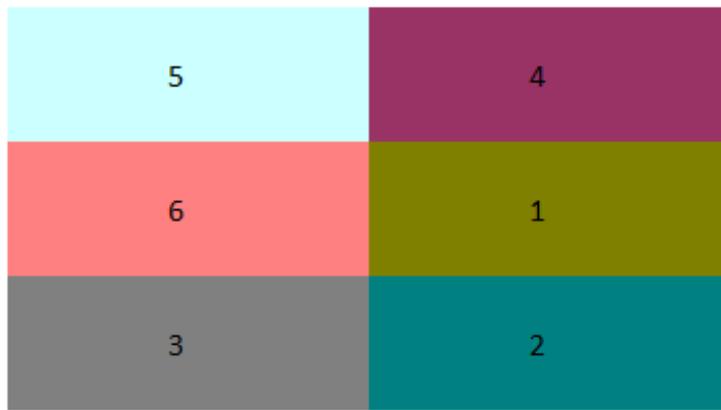
$\alpha = 0.5$     $\beta = 0.5$

FIGURE 4.18 – Disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la première instance .

**Instance 2 :**  $\alpha = 0.4$ ,  $\beta = 0.6$  :

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2						Objectif fonction	18,19
3	facilities	xi	yi				
4	1	3	1				
5	2	3	0				
6	3	1	0				
7	4	3	2				
8	5	1	2				
9	6	1	1				
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

FIGURE 4.19 – Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance .



$\alpha=0,4$	$\beta=0,6$
--------------	-------------

FIGURE 4.20 – Disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance.

**Instance 3** :  $\alpha = 0.6$  ,  $\beta = 0.4$  :

	A	B	C	D	E	F	G
2						Objectif function	19,54
3	facilities	xi	yi				
4	1	1	1				
5	2	1	0				
6	3	1	2				
7	4	3	2				
8	5	3	0				
9	6	3	1				
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							

FIGURE 4.21 – Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance .

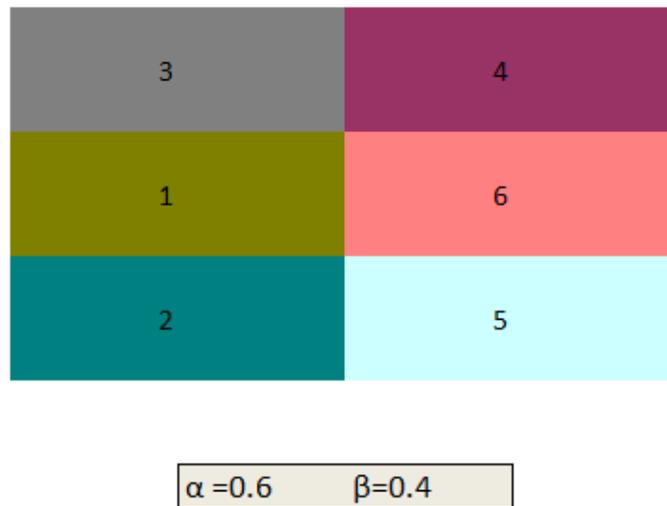


FIGURE 4.22 – Disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la troisième instance.

Après avoir effectué de nombreuses autres simulations, nous avons conclu que lorsque  $\alpha \geq 0.5$  ( ce qui signifie que  $\beta \leq 0.5$  ) l'algorithme favorise le flux et il établit une disposition qui minimise ce dernier ( ceci peut être confirmé en observant les instances 1 et 3 ). Par contre , en choisissant  $\alpha=0.4$  et  $\beta=0.6$ , on obtient une disposition qui prend en compte les deux fonctions objectifs précédentes sans privilégier l'une par rapport à l'autre, et on obtient une valeur minimale de la fonction objectif et une grande valeur de TCR. Pour avoir une meilleure vue, nous avons établi le diagramme montré dans la figure 4.23 qui illustre comment le choix de  $\alpha$  et  $\beta$  influence la fonction objectif et le TCR. Nous avons également établi un tableau récapitulatif 4.1

### Comparaison entre les 3 instances (selon le choix de la pondération)

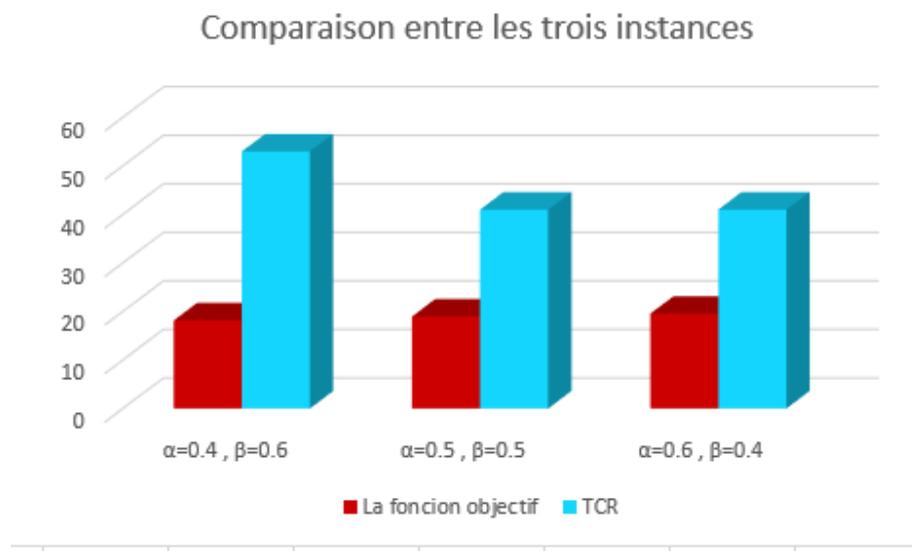


FIGURE 4.23 – Comparaison entre les 3 instances.

**Tableau récapitulatif**

	OF1	OF2	Fonction multi critere		
			$\alpha=0.4, \beta=0.6$	$\alpha=0.5, \beta=0.5$	$\alpha=0.6, \beta=0.6$
la fonction objectif	640	212	18.19	18.992	19.54
TCR		53	53	41	41
La disposition	(4-5) (1-6) (2-3)	(2-3) (1-6) (4-5)	(3-2) (6-1) (4-5)	(3-4) (1-6) (2-5)	(2-5) (1-6) (3-4)

TABLE 4.1 – Résultats de la résolution de SRFLP avec OF 1, OF 2 et Multi-critere avec 6 départements

### 4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité un cas particulier de la FLP qui est le multi-row FLP, ce dernier est concerné par l'affectation d'un ensemble de départements à 2 ou plusieurs rangées afin qu'une fonction objectif soit minimisée ou maximisée, dans la première partie de ce chapitre, nous avons choisi de travailler sur la minimisation de la distance totale parcourue en introduisant simplement une matrice de flux qui représente le nombre de déplacement entre chaque paire de départements et la deuxième partie vise à maximiser l'adjacence totale avec une matrice de relations et enfin, la troisième partie comprend les deux fonctions objectives pondérées visant à est de réduire la distance ce qui implique une meilleure production en termes de délais, d'efficacité et de qualité. Pour trouver l'emplacement optimal des départements qui donne une fonction objectif minimale, nous avons introduit un modèle mathématique linéaire qui contient un ensemble de contraintes, ces dernières garantissent que les départements ne se chevauchent pas et doivent se situer dans la largeur de la rangée donnée lors de la recherche du placement optimal, les résultats sont les positions par rapport x et y qui indiquent le centre de gravité de chaque département sur un plan orthogonal, ce modèle a été codé en utilisant le logiciel CPLEX .Nous avons connecté CPLEX avec EXCEL pour que cplex lit et écrit les résultats dans CPLEX .Ces résultats ont été exploité pour dessiner la configuration via un macro codé avec VBA (Excel)

Enfin, nous avons utilisé une comparaison avec l'algorithme 2-opt et l'exemple des départements à surface égale et nous avons obtenu une disposition qui correspond à une meilleure fonction objectif en utilisant notre algorithme que celui donné par l'algorithme 2-opt.

# Conclusion et Perspectives

Le problème de conception d'un système de fabrication FLP consiste à trouver le positionnement le plus efficace des équipements dans un espace donné, dans le but de réduire les coûts de manutention associés aux interactions entre chaque paire de départements, réduire les délais de fabrication, augmenter le rendement, la productivité globale ainsi que d'assurer la sécurité des travailleurs.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur les différentes règles de base de la conception, en tenant compte de modélisation mathématique d'une fonction objectif qui combine deux objectifs : minimiser la distance et maximiser la proximité, afin de réduire les coûts de manutention et d'augmenter la productivité, utiliser de manière plus performante l'espace disponible en vue de satisfaire un ensemble de contraintes qui correspondent à la réalité industrielle, afin d'obtenir un bon agencement, nous avons introduit le concept de rangées pour concevoir l'agencement en proposant des méthodes de résolution innovantes. Les quatre chapitres suivants ont été développés pour proposer une solution au problème MRFLP et pour définir plus en détail les objectifs de notre recherche :

- Le chapitre 1, est une introduction dans laquelle les motivations de ce travail sont présentées ainsi qu'un état de l'art des différents travaux de recherche liés au problème de l'implémentation. Ensuite, une description générale des différents aspects fondamentaux de FLP est donnée, afin de confronter le lecteur à certaines des notions abordées dans ce travail et de mettre en évidence les principales contributions.
- Le chapitre 2, traite des différentes approches classiques et modernes pour résoudre les problèmes de conception. Ces approches visent à fournir des meilleures solutions, plus rapides et plus faciles à appliquer pour mieux orienter nos recherches.
- Le chapitre 3, consacré à la formalisation du MRFLP pour des surfaces égales et inégales, nous commençons par présenter un état de l'art concernant les principaux axes de recherche existant dans la littérature, en ajoutant une description du problème, puis l'application de méthodes de modélisation permettant la linéarisation de la fonction objectif et d'un certain nombre de contraintes afin de résoudre ce problème et de concevoir une bonne implémentation.
- Le chapitre 4, consacré à la représentation de notre modèle mathématique pour déterminer l'emplacement et l'orientation des installations et la création de rangées en minimisant le nombre d'allers-retours, prend en compte plusieurs hypothèses. Ensuite, la résolution du modèle proposé avec le logiciel CPLEX version 12.6 sur de

petites instances en considérant l'effet de la complexité du problème sur le temps d'exécution. Enfin, l'interprétation des résultats obtenus à l'aide d'une application sur EXCEL qui présente graphiquement la configuration optimale ainsi que l'application de l'algorithme 2-OPT dans le cas de surfaces égales.

## Perspectives

Pour prolonger cette étude, il est possible d'améliorer certains aspects. Ces aspects pourraient être classifiés selon deux types de perspectives :

1. **Au niveau des hypothèses**, on peut tenir compte :
  - La variation des types et les tailles des produits.
  - Les installations peuvent prendre des formes irrégulières et non rectangulaires.
  - Étudier le problème sur plusieurs périodes qui contribuent au changement de chemin de flux.
  - Aborder en profondeur le cas des machines reconfigurables ou leurs structures peuvent être modifiés.
  - Tenir en compte les couloirs et l'orientation des installations.
  - Les distances entre les postes de travail sont calculées de centre à centre. Cette hypothèse ne s'avère pas totalement réaliste parce que tous les départements possèdent des points d'entrée et de sortie. Il est donc nécessaire de proposer une formulation mathématique qui tienne compte de la distance entre les points d'entrée/sortie des équipements
  - En considérant l'orientation des installations
2. **Au niveau de la formulation des modèles MRFLP** : plusieurs prolongements peuvent être proposés :
  - Plusieurs contraintes prises en compte dans la situation industrielle réelle pourraient être utilisées pour améliorer la résolution et réduire la complexité du problème
  - Concernant les méthodes de résolution de ce problème, nous prévoyons également d'explorer des méthodes heuristiques et méta-heuristiques pour traiter des cas de plus grande taille.
  - Modélisation de ce problème avec un modèle multi-objectif, avec des objectifs contradictoire.
  - Concernant les méthodes de résolution de ce problème, nous prévoyons également d'explorer des méthodes heuristiques et méta-heuristiques pour traiter des cas de plus grande taille.
  - Les environnements statiques ne sont pas toujours adéquats dans les cas où les flux entre les départements et les demandes sont presque constants dans le temps. Mais, en réalité, les données d'entrée sont plutôt variables au cours de l'horizon de planification et les prochaines démarches consisteront à envisager la formulation du problème dans un environnement dynamique.

- Application de ce modèle sur un cas d'étude.
- Le fichier EXCEL où la disposition finale est configurée à l'aide de Visual Basic for Applications (VBA) et des macros sur Excel, peut être utilisé avec n'importe quel programme.

# Bibliographie

- [1] Pourvaziri H, Azimi P. A tuned-parameter hybrid algorithm for dynamic facility layout problem with budget constraint using GA and SAA. *J Optim Ind Eng* 2014;15 :65–75.
- [2] Anjos, M. F., et Vieira, M. V. (2017). Mathematical optimization approaches for facility layout problems : The state-of-the-art and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 261(1), 1-16.
- [3] Liu, S., Zhang, Z., Guan, C., Liu, J., Gong, J., et Dewil, R. (2022). Mathematical formulation and two-phase optimisation methodology for the constrained double-row layout problem. *Neural Computing and Applications*, 1-20.
- [4] Herrán, A., Colmenar, J. M., et Duarte, A. (2021). An efficient variable neighborhood search for the Space-Free Multi-Row Facility Layout problem. *European Journal of Operational Research*, 295(3), 893-907.
- [5] Lenin, N., et Siva Kumar, M. (2021). Harmony search algorithm for simultaneous minimization of bi-objectives in multi-row parallel machine layout problem. *Evolutionary Intelligence*, 14(4), 1495-1522.
- [6] Muther, R. (1973). Systematic layout planning (No. 658.5 m8.).
- [7] Foulds, L. R. (1983). Techniques for facilities layout : deciding which pairs of activities should be adjacent. *Management Science*, 29(12), 1414-1426.
- [8] Hungerländer, P., et Anjos, M. F. (2015). A semidefinite optimization-based approach for global optimization of multi-row facility layout. *European journal of operational Research*, 245(1), 46-61.
- [9] Armour, G. C., et Buffa, E. S. (1963). A heuristic algorithm and simulation approach to relative location of facilities. *Management science*, 9(2), 294-309.
- [10] Lee, R. C. (1967). CORELAP-computerized relationship layout planning. *J. Ind. Eng.*, 18(3), 195-200.
- [11] Tompkins, J. A., & Reed Jr, R. U. D. D. E. L. L. (1976). An applied model for the facilities design problem. *The International Journal Of Production Research*, 14(5), 583-595
- [12] Tubaileh, A., et Siam, J. (2017). Single and multi-row layout design for flexible manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(12), 1316-1330.

- [13] Loiola, E. M., de Abreu, N. M. M., Boaventura-Netto, P. O., Hahn, P., & Querido, T. (2007). A survey for the quadratic assignment problem. *European journal of operational research*, 176(2), 657-690.
- [14] Koopmans, T. C., & Beckmann, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica : journal of the Econometric Society*, 53-76.
- [15] Heragu, S. S., & Kusiak, A. (1988). Machine layout problem in flexible manufacturing systems. *Operations research*, 36(2), 258-268.
- [16] Miao Z, Xu KL (2009) Research of multi-rows facility layout based on hybrid algorithm. *Proceedings of the international conference on industrial engineering and engineering management*, Xi'an, China, pp 553–556
- [17] Drira, A., Hajri-Gabouj, S., & Pierreval, H. (2007). Design of a constrained multi-rows layout in presence of uncertainty. *IFAC Proceedings Volumes*, 40(18), 383-388.
- [18] Tompkins, J.A., J.A. White, Y.A. Bozer, E.H. Frazelle, J.M. Tanchoco and J. Trevino (1996).
- [19] Vitayasak, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2019). Robust machine layout design under dynamic environment : Dynamic customer demand and machine maintenance. *Expert Systems with Applications : X*, 3, 100015.
- [20] Kulkarni, M. H., Bhatwadekar, S. G., & Thakur, H. M. (2015). A literature review of facility planning and plant layouts.
- [21] Gary, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-completeness*.
- [22] Koopmans, T. C., & Beckmann, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica : journal of the Econometric Society*, 53-76.
- [23] Balakrishnan, J., Cheng, C. H., Conway, D. G., & Lau, C. M. (2003). A hybrid genetic algorithm for the dynamic plant layout problem. *International Journal of Production Economics*, 86(2), 107-120.
- [24] Wang, M. J., Hu, M. H., & Ku, M. Y. (2005). A solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithm. *Computers in Industry*, 56(2), 207-220.
- [25] Das, S. K. (1993). A facility layout method for flexible manufacturing systems. *The International Journal of Production Research*, 31(2), 279-297.
- [26] Lacksonen, T. A. (1997). Preprocessing for static and dynamic facility layout problems. *International Journal of Production Research*, 35(4), 1095-1106.
- [27] Dunker, T., Radons, G., & Westkämper, E. (2005). Combining evolutionary computation and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 165(1), 55-69.
- [28] Seehof, F. (1967). Automated Layout Design Problems. *Journal of IE.*, 18(12).

- [29] Tompkins, J. A., & Reed Jr, R. U. D. D. E. L. L. (1976). An applied model for the facilities design problem. *The International Journal Of Production Research*, 14(5), 583-595
- [30] Hassan, M. M., Hogg, G. L., & Smith, D. R. (1986). SHAPE : a construction algorithm for area placement evaluation. *International Journal of Production Research*, 24(5), 1283-1295.
- [31] Khalil, T. M. (1973). Facilities relative allocation technique (FRAT). *International Journal of Production Research*, 11(2), 183-194.
- [32] Drezner, Z. (1987). A heuristic procedure for the layout of a large number of facilities. *Management Science*, 33(7), 907-915.
- [33] Kim, J. G., & Kim, Y. D. (2000). Layout planning for facilities with fixed shapes and input and output points. *International Journal of Production Research*, 38(18), 4635-4653.
- [34] Balakrishnan, J., & Cheng, C. H. (2000). Genetic search and the dynamic layout problem. *Computers & Operations Research*, 27(6), 587-593.
- [35] Marinchek, D. A. (2014). *Manufacturing Facility Layout : A Methodology Incorporating Rotated Aisles into Layout Design* (Doctoral dissertation, Ohio University).
- [36] Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Fakhrzad, M. B. (2018). Classification of facility layout problems : a review study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1), 957-977.
- [37] McKendall Jr, A. R., & Hakobyan, A. (2010). Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 171-182.
- [38] Tari, F. G., & Neghabi, H. (2015). A new linear adjacency approach for facility layout problem with unequal area departments. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 93-103.
- [39] Chwif L, Barretto MRP, Moscato LA (1998) A solution to the facility layout problem using simulated annealing. *Comput Ind* 36(1-2) :125-132
- [40] Braglia, M. (1996). Optimisation of a simulated-annealing-based heuristic for single row machine layout problem by genetic algorithm. *International Transactions in Operational Research*, 3(1), 37-49.
- [41] Heragu, S. S. (2018). *Facilities design*. Crc Press.
- [42] Sule, D. R. (2008). *Manufacturing facilities : location, planning, and design*. CRC press.
- [43] Tubaileh, A., & Siam, J. (2017). Single and multi-row layout design for flexible manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(12), 1316-1330.

- [44] Chraibi, A. (2015). A decision making system for operating theater design : application of facility layout problem (Doctoral dissertation, Saint-Etienne).
- [45] Miguel F. Anjos, Facility Layout Mathematical Optimization Techniques and Engineering Applications ,2021.
- [46] Meller, R.D., V. Narayanan and P.H. Vance (1999). Optimal facility layout design. Operations Research Letters, 23 (3-5), 117 – 127.
- [47] Azadivar, F., & Wang, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. International Journal of Production Research, 38(17), 4369-4383.
- [48] Chiang, W. C., & Kouvelis, P. (1996). An improved tabu search heuristic for solving facility layout design problems. International Journal of Production Research, 34(9), 2565-2585.
- [49] Tari, F. G., & Neghabi, H. (2015). A new linear adjacency approach for facility layout problem with unequal area departments. Journal of Manufacturing Systems, 37, 93-103.
- [50] Shayan, E., Chittilappilly, A. (2004). Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure. International Journal of Production Research, 42(19), 4055-4067.
- [51] <https://chsystem.dk/robot-gantry/?fbclid=IwAR1n7tD0bJyb-6GZ-N-E0mYYJuA-LaS0w3aWVv7q5ECw39rKDgXK71Zx0>