

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
-تمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel

Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par : TAIBI Amani et DJERBOUA Wafaa

Thème

**Optimisation mathématique d'une
disposition des ateliers à une seule
rangée « ligne »**

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

M.MALIKI Fouad	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Mme OUHOUD Amina	MCB	ESSA. Tlemcen	Encadrante
M.BENNEKROUF Mohammed	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M.BRAHAMI Mustapha	MCA	ESSA.Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2021 /2022

Table des matières

Liste des Figures	ix
Liste des tableaux	xi
Introduction Générale	xii
1 Généralités sur Facilities Design	2
1.1 Introduction	2
1.2 Définition du Facilities Design	3
1.3 Problème statique d'aménagement des installations (SFLP)	3
1.4 Problème d'aménagement dynamique des installations (DFLP)	3
1.5 Les objectifs majeurs d'une bonne Facilities design	3
1.6 Autres définitions	4
1.6.1 Des départements de surface égale	4
1.6.2 Des départements de surface inégales	4
1.6.3 Produit	4
1.6.4 Processus	4
1.6.5 Planning	5
1.6.6 Localisation de l'usine	5
1.7 Facteurs influençant l'aménagement	5
1.7.1 Variété et volume des produits	5
1.7.2 La forme et les dimensions de l'installation	7
1.7.3 Mouvement de flux	7
1.7.4 Les système de manutention des matériaux (MHS)	8
1.8 Configuration de la disposition	10
1.8.1 Une seule rangée (SRFLP)	10
1.8.2 Multi-rangées	10
1.8.3 La disposition en boucle	11
1.8.4 Champ ouvert	11
1.8.5 Multi-étages	11
1.9 Analyse des équipements et des Produits	11
1.9.1 Liste des produits	12
1.9.2 Diagrammes d'assemblage	12

1.9.3	Liste des matériaux	13
1.9.4	Diagramme de précédences	13
1.9.5	Feuille de route	14
1.9.6	Le diagramme du processus d'opération	14
1.9.7	Dessin technique	15
1.9.8	L'organigramme cartographie des processus	16
1.9.9	Acheter ou fabriquer	16
1.10	Besoin en équipements	17
1.11	Besoin en personnel	20
1.12	Données nécessaire pour mettre en place une disposition :	20
1.13	Données de flux	20
1.14	Types de données	20
1.14.1	Donnés qualitatives	20
1.14.2	Données quantitatives	21
1.15	Mesures des distances	22
1.15.1	La distance euclidienne	22
1.15.2	La distance euclidienne carrée	22
1.15.3	La distance Rectiligne	22
1.15.4	La distance de Tchebychev	22
1.15.5	Distance entre les allées	23
1.16	L'adjacence	23
1.17	État de l'art	25
1.18	Conclusion	26
2	Les approches de résolution	27
2.1	Introduction	27
2.2	L'approche traditionnelle	28
2.2.1	Systematic layout planning (SLP)	28
2.2.2	Les étapes de la méthode SLP	29
2.3	Les algorithmes d'optimisation	31
2.3.1	Algorithmes de construction	31
2.3.2	Les étapes de La théorie des graphes :	33
2.3.3	Algorithme MST (modified spanning tree) pour un problème de disposition d'une seule rangée	36
2.3.4	Les étapes de l'algorithme :	36
2.4	Les algorithmes d'amélioration	39
2.4.1	L'algorithme 2-Opt	40
2.5	Les algorithmes hybride	43
2.6	Les algorithmes optimal	43
2.6.1	L'algorithme Branch and bound	44
2.7	Recherche tabou	45

2.7.1	L'algorithme de la recherche tabou :	45
2.8	Conclusion	46
3	Single Row Layout Problem	47
3.1	Introduction	47
3.2	État de l'art	47
3.3	ABSMODEL	49
3.4	Linear Mixed integer programming	50
3.5	Le choix de M	52
3.6	Conclusion	52
4	Modèle mathématique pour le problème de la disposition des installations sur une seule rangée	53
4.1	Introduction	53
4.2	Le modèle mathématique	54
4.2.1	Expériences et résultats pour OF1 :	57
4.2.2	Présentation graphique avec EXCEL :	58
4.2.3	Expériences et résultats pour OF2 :	63
4.2.4	Présentation graphique avec EXCEL :	64
4.2.5	La normalisation des données :	65
4.3	Temps d'exécution sur CPLEX par rapport à la taille du problème :	74
4.4	Application de l'algorithme 2-opt	74
4.5	conclusion :	75
	Conclusion Générale	76
	Bibliographie	78

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 TAOUSSEER 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 , Adnane Ameer.

"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 Nacéra, 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

La conception des installations est un domaine qui a été développé depuis le milieu des années 90, et à mesure que de nouvelles technologies apparaissent et que la concurrence industrielle s'intensifie. Les entreprises manufacturières se concentrent de plus en plus sur cette science afin de concevoir un aménagement efficace et approprié qui contribue à la croissance de l'entreprise et à la réduction des coûts, Le problème de facility layout sur une seule rangée est un problème NP-difficile qui concerne la mise en place d'un ensemble d'installations avec différentes longueurs et largeurs. Notre travail vise à développer un modèle mathématique qui trouve la disposition optimale d'un ensemble d'installations le long d'une seule rangée qui minimise la distance parcourue et maximise l'adjacence en augmentant le total closeness rating (TCR).

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

Abstract

Facilities design is a field that has been developed since the mid-nineties, and with appearance of new technology and the growth of industrial competition. Manufacturing companies are paying more attention to this science in order to design an efficient and suitable layout that contributes to the growth of the company and reducing costs. The single row layout problem is an NP hard problem concerned with the arrangement of a set of facilities of different lengths and widths. Our work aims to develop a mathematical model that finds the optimal arrangement of a set of facilities along a single row that minimizes the traveled distance and maximizes the adjacency by increasing the total closeness rating (TCR).

KEYWORDS :FLP, flow, distance, TCR, optimization

ملخص

تصميم المرافق هو مجال تم تطويره منذ منتصف التسعينيات ، ومع ظهور تكنولوجيا جديدة ونمو المنافسة الصناعية ، الشركات المصنعة بدأت تولي مزيداً من الاهتمام لهذا العلم من أجل تصميم تخطيط فعال ومناسب يساهم في نمو الشركة وخفض التكاليف ، تعد مشكلة تخطيط الصف الفردي مشكلة صعبة فهي تتعلق بترتيب مجموعة من المرافق ذات طول وعرض معين ، يهدف عملنا إلى تطوير نموذج رياضي يجد الترتيب الأمثل لمجموعة من المرافق على طول صف واحد يقلل من المسافة المقطوعة ويزيد من التقارب عن طريق زيادة معدل التقارب الكلي TCR

الكلمات الرئيسية :FLP، تدفق، مسافة، TCR، التحسين .

Table des figures

- 1.1 Fixed product layout 5
- 1.2 Process layout 6
- 1.3 Product layout 6
- 1.4 forme régulière et irrégulière des installations. 7
- 1.5 backtracking et bypassing. 8
- 1.6 Disposition des installations sur une seule rangée. 10
- 1.7 Disposition des installations a rangées multiples 10
- 1.8 Disposition des installations en boucle 11
- 1.9 La liste des produits 12
- 1.10 Diagramme d'assemblage d'une bouilloire 12
- 1.11 La liste des matériaux 13
- 1.12 Le diagramme de précédences 13
- 1.13 La feuille de route 14
- 1.14 Le diagramme du processus d'opération d'une bouilloire 15
- 1.15 Le dessin technique 15
- 1.16 L'organigramme cartographie des processus 16
- 1.17 Coût total en fonction du niveau de production (pièces en plastique moulées) 18
- 1.18 la matrice de flux "de-à" 21
- 1.19 la matrice de flux entre départements 21
- 1.20 Calculs de la distance selon différentes mesures. 23
- 1.21 Calculs de distance pour les métriques de distance d'allée et d'adjacence.. . 23
- 1.22 La matrice d'adjacence 24
- 1.23 Disposition finale 24

- 2.1 Les étapes de la méthode SLP 28
- 2.2 la matrice de flux 29
- 2.3 activity relationships 30
- 2.4 Relationship diagram 30
- 2.5 Space Relationship diagram 31
- 2.6 Positionnement des nœuds 3 et 4 en fonction de leur flux maximum 33
- 2.7 Face triangulaire formée en reliant le nœud 2 qui a les plus grands débits
avec les nœuds 3 et 4. 33
- 2.8 Trois faces formées en plaçant le noeud 1 dans la face triangulaire. 34

2.9	Trois faces formées en plaçant le nœud 5 dans la face triangulaire 2-1-4. . .	34
2.10	dual graphe d'adjacence planaire maximal	35
2.11	Disposition finale obtenue à partir d'un dual.	35
2.12	matrices de flux	37
2.13	matrices de flux f'_{ij}	37
2.14	les étapes de l'algorithme 2-Opt	40
2.15	matrices de flux et de distance	41
2.16	Solution initiale en utilisant 2-opt	41
2.17	Solution après avoir échangé les positions des départements 1 et 2	42
4.1	L_i et W_i selon l'orientation de l'installation	55
4.2	illustration du calcul de la distance	56
4.3	disposition optimale en utilisant OF1 pour 3 départements	58
4.4	Données Excel pour le SRFLP pour la première fonction objectif.	59
4.5	Résultats Excel pour le SRFLP pour la première fonction objectif.	60
4.6	Résultats Excel pour le SRFLP pour la première fonction objectif.	61
4.7	Affichage du message de confirmation	61
4.8	Disposition optimale pour le SRFLP avec 5 départements en utilisant OF1 .	62
4.9	disposition optimale selon la fonction objectif 2 pour 3 départements	63
4.10	disposition optimale selon la fonction objectif 2 pour 5 départements	64
4.11	Données pour la fonction multi-objectifs pour les 3 instances	66
4.12	Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la première instance . . .	67
4.13	Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la la première instance .	68
4.14	disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la première instance .	68
4.15	Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance . .	69
4.16	Les resultats pour la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance . .	70
4.17	disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la deuxième ins- tance	70
4.18	Résultats de la fonction multi-objectifs pour la troisième instance.	71
4.19	Résultats de la fonction multi-objectifs pour la troisième instance.	72
4.20	La disposition optimal de la fonction multi-objectifs pour la troisième ins- tance.	72
4.21	Comparaison entre les 3 insatnces.	73
4.22	Les données insérées pour le programme 2-opt	74
4.23	Résultats finaux sur PyCharm de l'application de l'algorithme 2-opt	75
4.24	disposition pour le SRFLP avec 5 départements en utilisant OF1	75

Liste des tableaux

1.1	Données pour les trois alternatives	17
1.2	Tableau qui représente la sortie désirée et le taux de rebuts	19
1.3	Tableau qui représente l'entrée requise	19
1.4	Tableau qui représente le nombre de machines	19
2.1	Les données, la séquence des étapes que chaque article doit subir.	37
3.1	Comparaison des besoins en temps de calcul des algorithmes polynomiaux et non polynomiaux	49
4.1	Données et résultats de la résolution de SRFLP avec OF1 avec 3 départe- ments	57
4.2	résultats de la résolution de SRFLP avec OF2 avec 3 départements	63
4.3	Données et résultats pour SRFLP pour la fonction objectif 2	64
4.4	Résultats de la résolution de SRFLP avec OF 1, OF 2 et Multi-critere avec 5 départements	73
4.5	L'effet de la complexité du problème sur le temps d'exécution	74

Nomenclature

AGV	Automated guided vehicle
B&B	Branch and bound
FD	facilities design
LAP	linear assignement problem
LB	Lower bound
LMIP	: linear Mixed integer programming LMIP
MHDs	Material handeling devices
MHS	Material handeling system
MPG	Graphe planaire maximal
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
SLP	systematic layout planning
SRFLP	Single Row Facility Layout Problem
SRFLP	Single row facility layout problem
TCF	les fonctions de complexité temporelle
TCR	Total Closeness Rating
TSP	traveling salesman problem
UP	Upper bound
VRL	vertical reference line

Contexte général

Depuis le lancement de la dernière version de Manufacturing Facilities, la concurrence dans l'industrie des produits de consommation s'est intensifiée et la révolution industrielle a marqué le passage à la production de masse. Certains fabricants se positionnent en tant que leaders des tendances industrielles et cherchent à adapter leurs capacités opérationnelles pour répondre aux demandes tout en améliorant leurs performances de fabrication en assurant la flexibilité du système. De ce fait, les fabricants et les entreprises de services consacrent beaucoup de temps et d'argent à la conception ou à la reconfiguration de leurs installations de production [1].

Facility layout est un problème complexe qui nécessite des méthodes spécifiques pour être résolu, c'est un problème d'optimisation qui consiste à développer une conception optimale qui respecte les exigences de tous les types de production considérés, qui prend en compte l'utilisation adéquate de l'espace disponible, le flux entre les départements, ainsi que le choix des équipements de manutention et la détermination des espaces de stockage. Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à ce type de problème connu dans la littérature sous le nom de "Facility Layout Problem" "FLP". Il est reconnu que ce problème a un grand impact sur la productivité, les coûts de fabrication, la durée et les performances d'exécution de l'organisation adoptée. En effet, le FLP possède des champs d'application dans divers domaines tels que la conception de l'aménagement des hôpitaux [5], des écoles, des aéroports, des entrepôts et des chaînes de montage, etc. [3].

Dans ce mémoire, notre étude vise à développer un modèle mathématique d'une disposition sur une seule ligne (Single Row Facility Layout Planning (SFLP)), afin de trouver la disposition optimale. En réalité, l'étape de modélisation est rarement envisagée, car les entreprises n'ont pas les moyens de modéliser les problèmes de conception des installations et les gestionnaires ne sont pas conscients des économies importantes qui peuvent être réalisées en développant ces types de problèmes.

Ce travail traite des approches d'optimisation mathématique pour la disposition des installations, qui est l'un des aspects fondamentaux de la conception. L'objectif est de minimiser le nombre de voyages allers / retours (Flux) et de maximiser l'adjacence entre les installations, tout en respectant les contraintes liées à la localisation physique des différentes installations opérationnelles dans l'espace disponible.

Motivation

Le problème de la disposition des installations sur une seule rangée (SRFLP) a été largement étudié de manière approfondie au cours des premières années de la dernière décennie, en particulier avec la croissance de la concurrence industrielle et l'émergence de nouvelles technologies, il a été important que les gestionnaires trouvent l'aménagement optimal qui contribue le plus à la croissance de l'entreprise et à la réduction des coûts.

Les chercheurs ont travaillé sur ce problème dans le but d'atteindre deux objectifs, le premier est de minimiser le coût total du transport des matériaux qui est calculé en multipliant la distance rectiligne (la distance du centre au centre des installations) par le flux entre les installations de sorte que la disposition finale génère la disposition qui donne le coût minimum de transport ;le deuxième objectif sur lequel les chercheurs ont travaillé est de maximiser l'adjacence qui est définie par une matrice de relation de proximité qui détermine la force de la relation entre chaque paire d'installations, autrement dit le degré de nécessité de mettre chaque installation l'une à côté de l'autre, ce besoin peut être défini selon une échelle internationale définie avec l'abréviation AEIOUX dans laquelle la lettre A exprime la désirabilité la plus forte de placer deux installations l'une à côté de l'autre en descendant jusqu'à la lettre x qui exprime l'indésirabilité, ce deuxième objectif peut parfois être si important, car il existe des normes internationales à respecter lors de la construction d'un aménagement qui peuvent par exemple interdire la disposition de deux installations spécifiques l'une à côté de l'autre.

Bien sûr, il y a eu des études avec des multiples objectifs qui ont pris en considération les deux fonctions objectives discutées précédemment, mais elles sont très peu nombreuses et la plupart d'entre elles ont utilisé une pondération dans la fonction objectif finale en attribuant un poids à chaque fonction objectif qui exprime l'importance d'une fonction objectif par rapport à l'autre, cette pondération ne peut pas toujours être vraie, car comparer un flux et une adjacence est deux choses différentes, chacune d'elles est basée sur une échelle différente, donc peu importe combien vous jouez sur le poids, la fonction objectif avec la plus grande échelle dominera toujours l'autre, c'est pourquoi dans notre travail, nous avons développé un nouveau modèle mathématique avec une fonction objectif qui donne la disposition optimale des installations sur une seule rangée qui minimise la distance du nombre de trajets et maximise l'adjacence, avec une pondération logique afin que le modèle soit adapté à toutes sortes de problèmes

Organisation du mémoire

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

- Le chapitre 1, présente les concepts généraux de la conception des installations est divisé en trois parties suivantes :
 - la première partie décrit les concepts généraux de la conception des installations et les facteurs qui influencent la conception, la seconde partie est consacrée à l'analyse des équipements ainsi qu'aux données nécessaires aux décisions de la conception. et enfin, la première partie présente un état de l'art des travaux de recherche qui ont déjà été effectués dans ce domaine.
- 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 tout en respectant les contraintes imposées.
- Le chapitre 3, est consacré à l'étude pratique qui se concentre sur le développement d'un modèle mathématique pour SRFLP, se compose des deux parties suivantes :
 - premièrement, présenter un état de l'art sur SRFLP, mettre en évidence les méthodes exactes de modélisation linéaire, deuxièmement, la formulation des contraintes exploitées dans notre travail de recherche.
- Le chapitre 4, est dédié à l'étude pratique qui présente nos hypothèses et le modèle mathématique ainsi que l'interprétation des résultats, l'exécution est réalisée à l'aide du solveur CPLEX version 12.6 sur plusieurs instances ou certains exemples sont configurés à l'aide d'un macro développé sur EXCEL et aussi confirmation des résultats en utilisant l'algorithme 2-OPT.

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 [60], un bon emplacement des installations contribue à l'efficacité globale des opérations et peut réduire jusqu'à 50% des dépenses totales d'exploitation.[5]

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[3]. 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[4].

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 [1, 5].

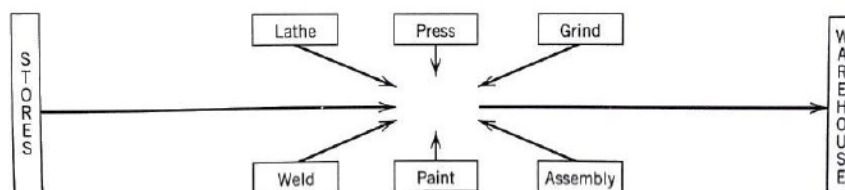


FIGURE 1.1 – Fixed product layout

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[37, 5].

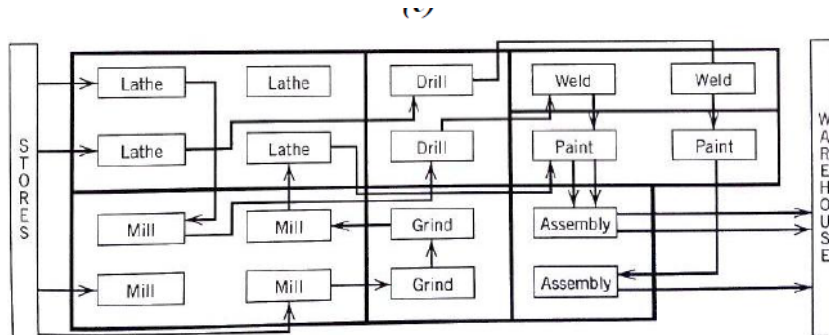


FIGURE 1.2 – Process layout .

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[5].

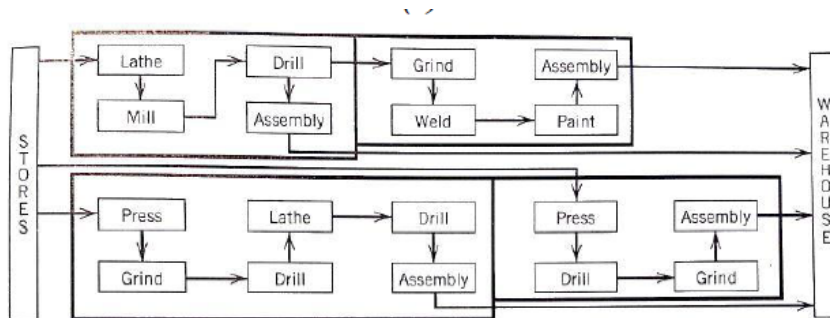


FIGURE 1.3 – Product layout .

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° , **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.

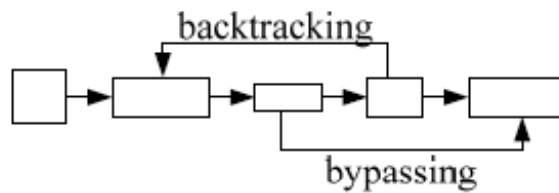


FIGURE 1.5 – backtracking et bypassing.

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.[2]

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.[2]

- 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 [37].

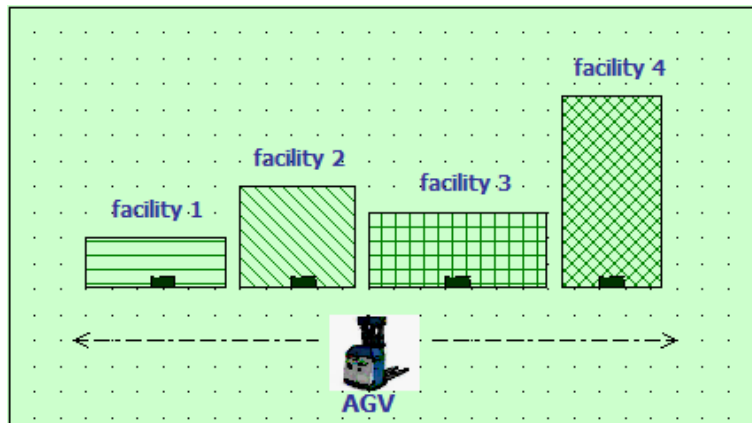


FIGURE 1.6 – Disposition des installations sur une seule rangée.

1.8.2 Multi-rangées

La disposition en plusieurs rangées prévoit de multiples rangées d'installations[37].

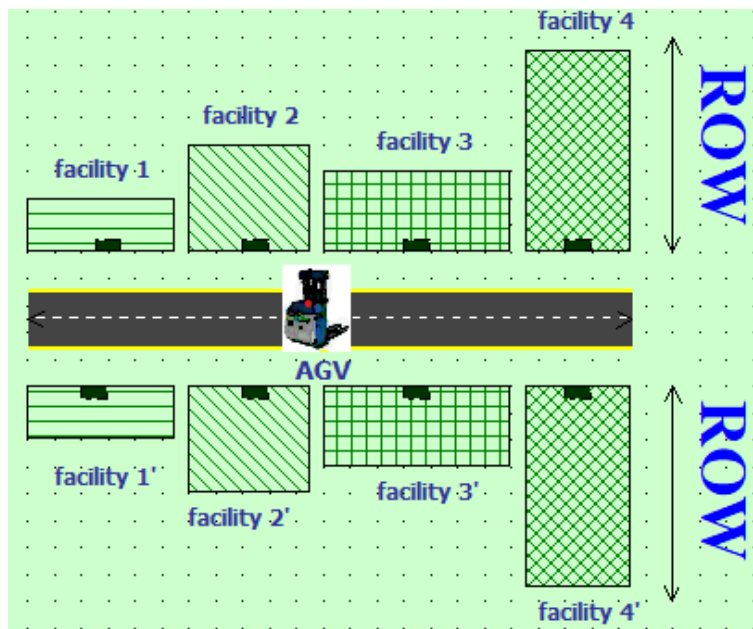


FIGURE 1.7 – Disposition des installations a rangées multiples

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[37].

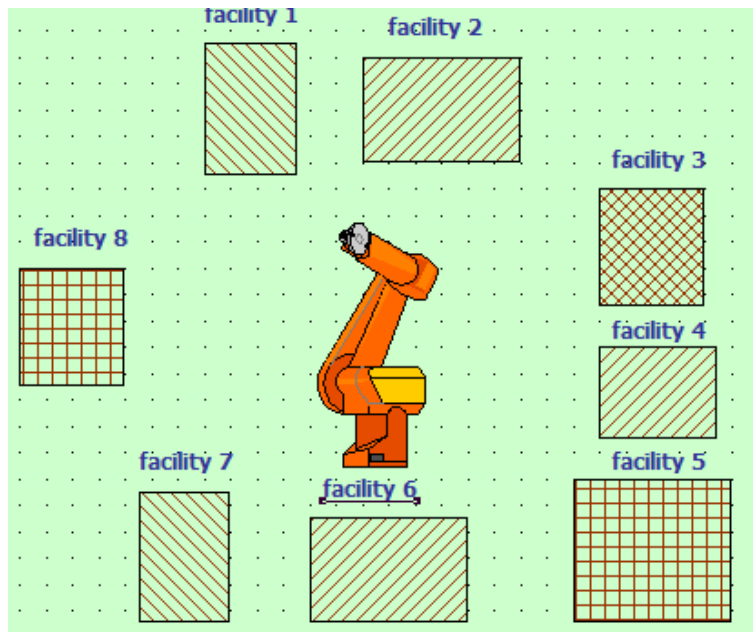


FIGURE 1.8 – Disposition des installations en boucle

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[37].

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)[37].

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[2].

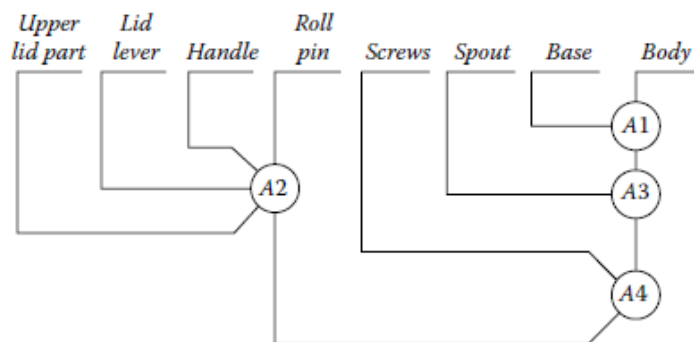


FIGURE 1.10 – Diagramme d'assemblage d'une bouilloire

1.9.3 Liste des matériaux

L'ensemble des pièces utilisées par l'entreprise pour assurer la production[2].

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.

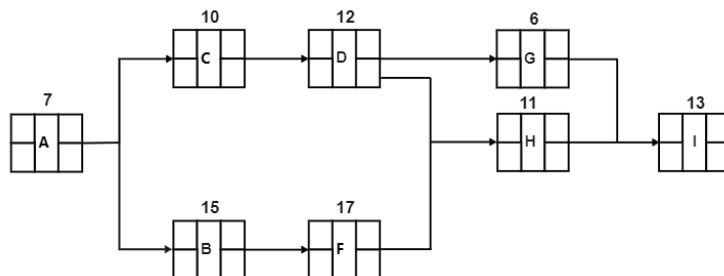


FIGURE 1.12 – Le diagramme de précédences

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 [2, 1].

Product: Teakettle Part: U. lid part Part No.: 6
 Prepared by: Chong Date: Jan 28 Sheet: 1 of 1

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 [2] :

- 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

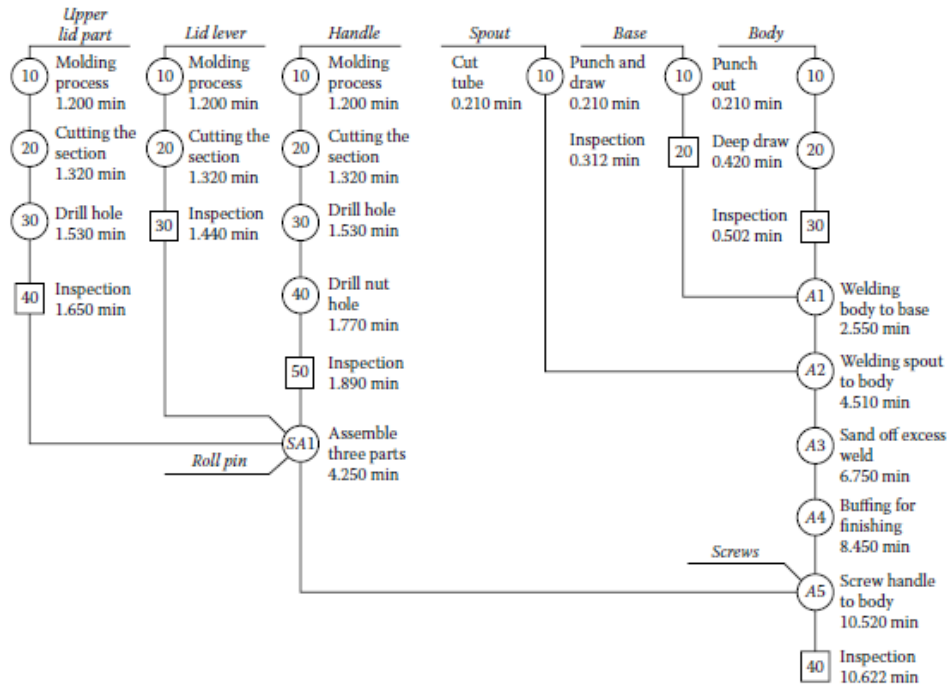


FIGURE 1.14 – Le diagramme du processus d’opération d’une bouilloire

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

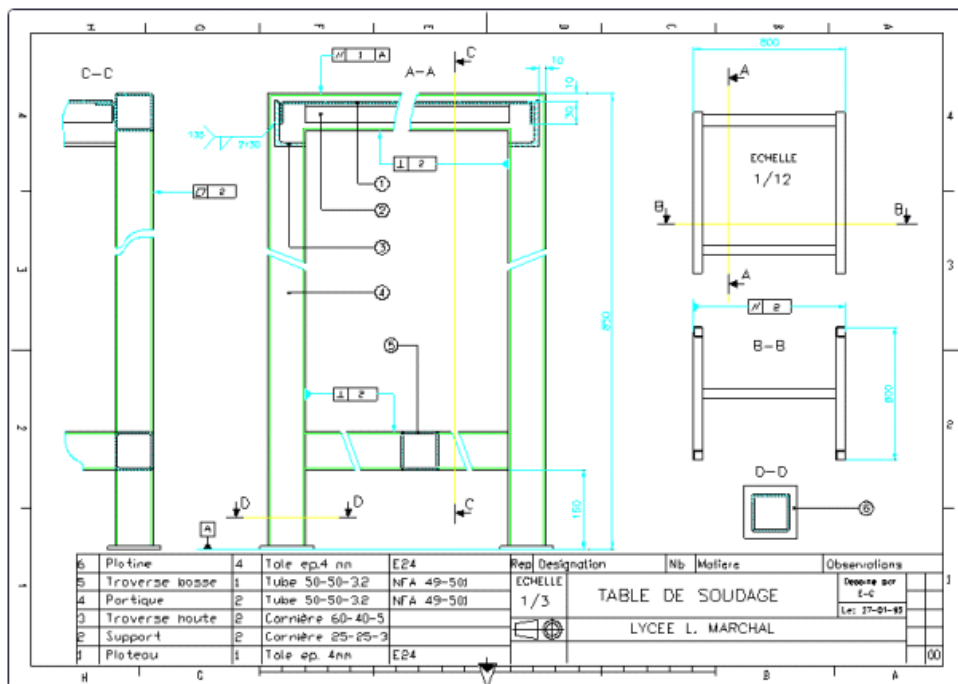


FIGURE 1.15 – Le dessin technique

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[2].

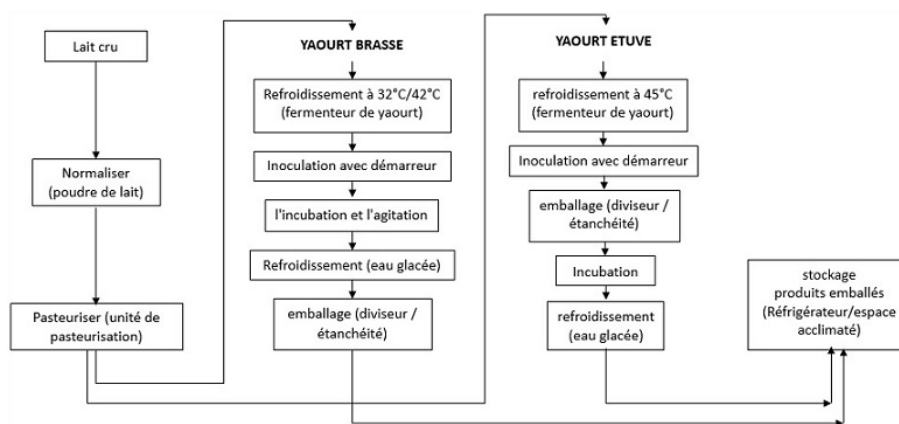


FIGURE 1.16 – L'organigramme cartographie des processus

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[2]

- 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 :

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

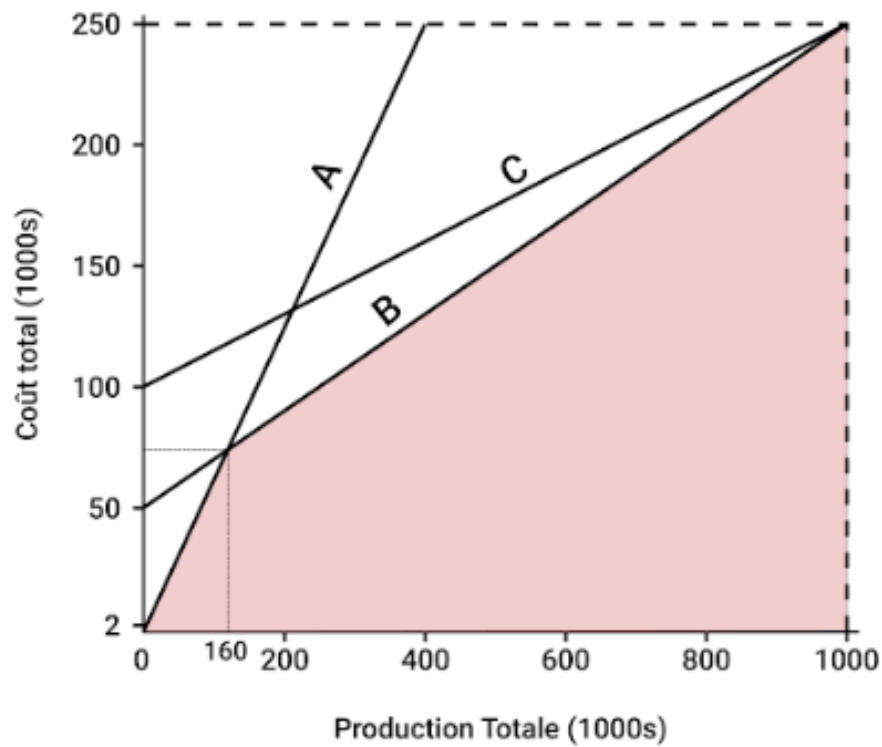
$$50\$ * Y_2 = 50,000\$ * Y_2 \quad (1.5)$$

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

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[1] :

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



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

η : Rendement de la machine

τ : 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

η 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[1].

1.14 Types de données

1.14.1 Données 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 $|y_i - y_j|$. $d_{ij} = \max(|x_i - x_j|, |y_i - y_j|)$

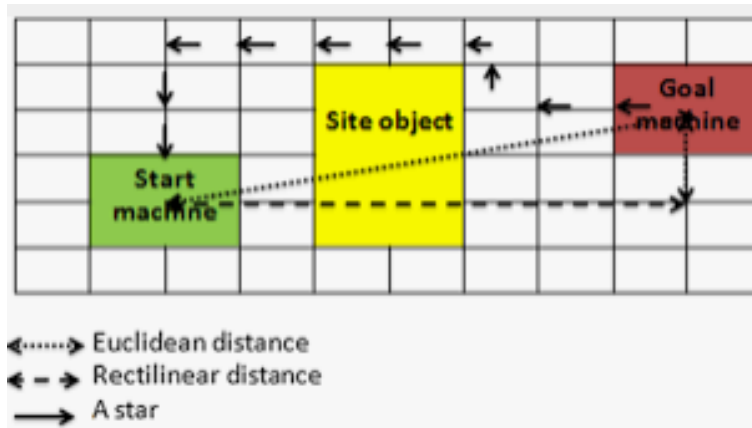


FIGURE 1.20 – Calculs de la distance selon différentes mesures.

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.

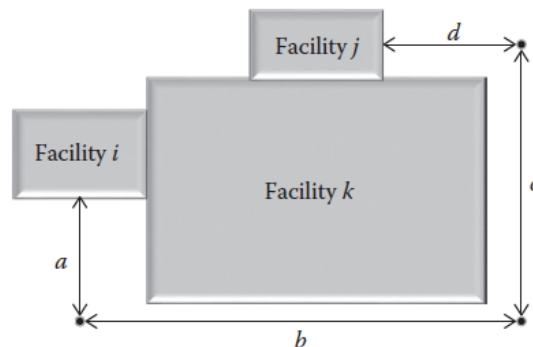


FIGURE 1.21 – Calculs de distance pour les métriques de distance d'allée et d'adjacence..

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

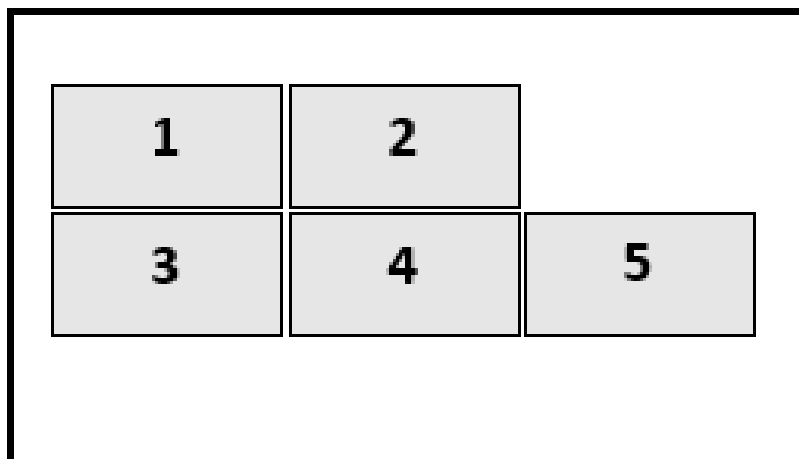


FIGURE 1.23 – Disposition finale

- 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 [39] dans un arrangement planaire orthogonal sans chevauchement des installations dans un atelier rectangulaire donné en minimisant la distance [13]. Sachant que le FLP sert à déterminer les emplacements relatifs et la répartition de l'espace disponible entre un nombre donné d'installations [42], 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 [41]. 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) [67]. 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 [40], 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 [43]. 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 [44, 45, 46]

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 [27], ALDEP [47] et COFAD [48], SHAPE [49] et des algorithmes d'amélioration tels que CRAFT [26], FRAT [50], DISCON. [51, 52] 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, [65] 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 [53, 40, 46], ont trouvé un optimum global lorsque de nombreux optima locaux sont présents.

[56] 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).[66] 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 (**Muther**, 1973), est largement utilisé dans la pratique. La deuxième c'est une approche d'optimisation basée sur les concepts de la théorie des graphes (**Foulds**, 1983). Depuis que **Koopmans et Beckman** (1957) ont formulé le FLP, la recherche de solutions a considérablement progressé. 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

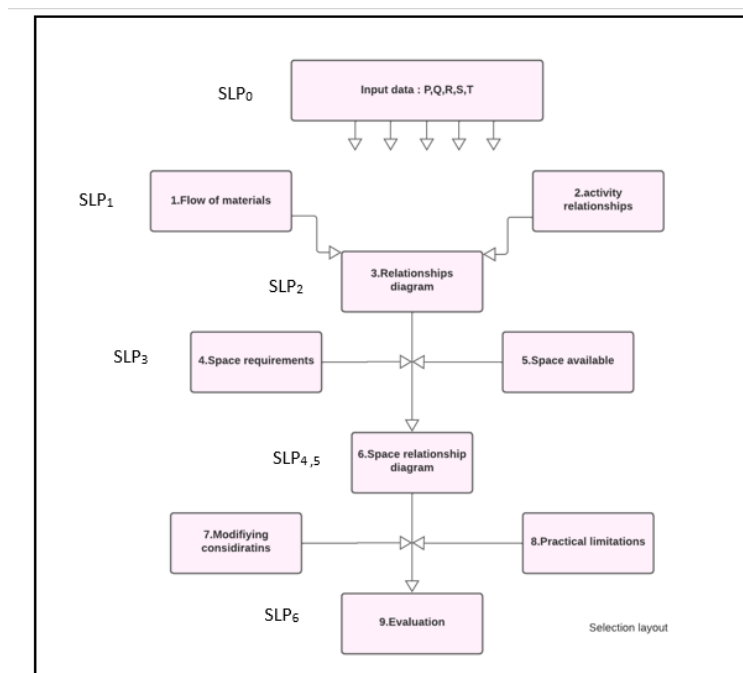


FIGURE 2.1 – Les étapes de la méthode SLP

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

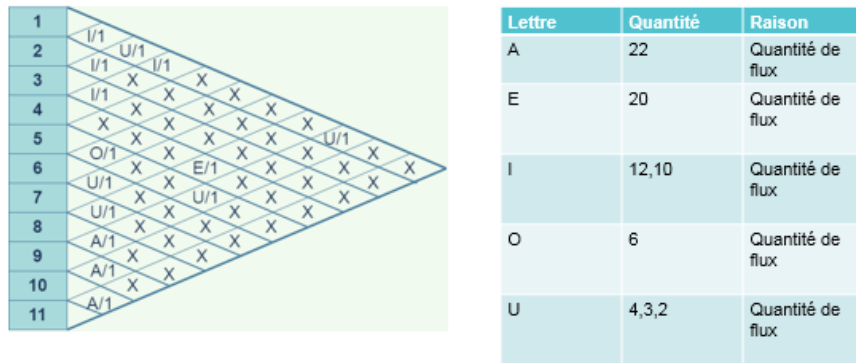


FIGURE 2.3 – activity relationships

- 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.

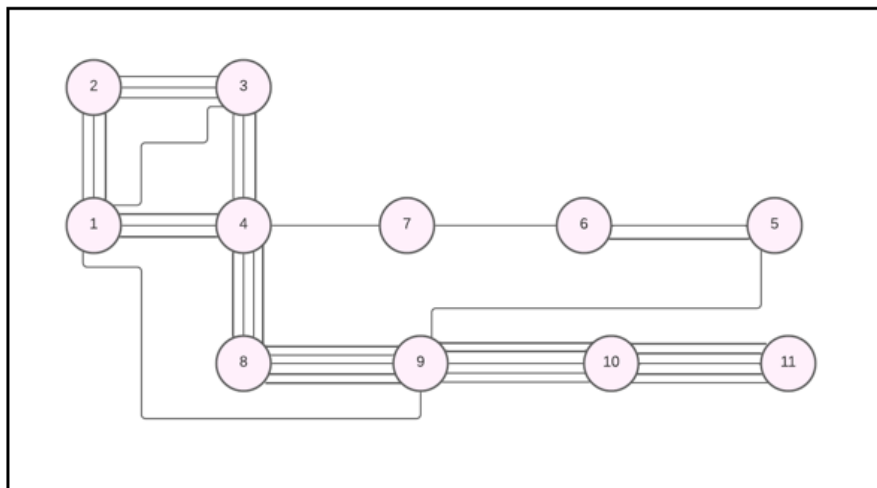


FIGURE 2.4 – Relationship diagram

- $SLP_{4,5}$: 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.

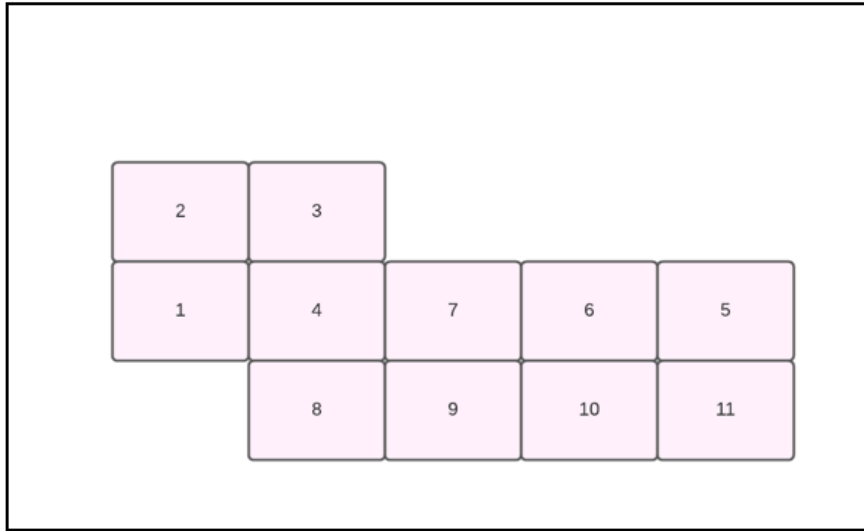


FIGURE 2.5 – Space Relationship diagram

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.[1]

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 [1].

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.

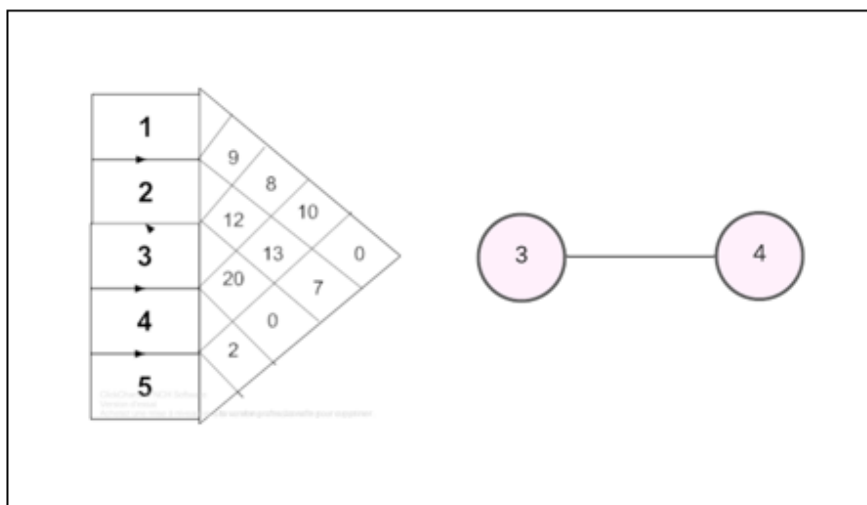


FIGURE 2.6 – Positionnement des nœuds 3 et 4 en fonction de leur flux maximum

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

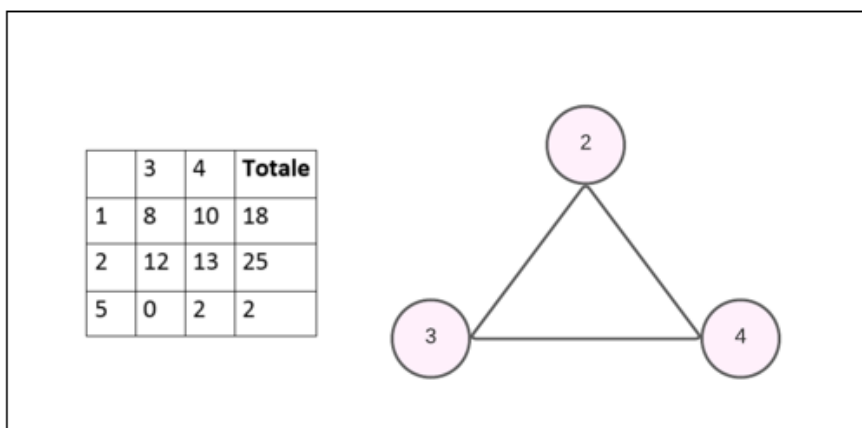


FIGURE 2.7 – Face triangulaire formée en reliant le nœud 2 qui a les plus grands débits avec les nœuds 3 et 4.

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

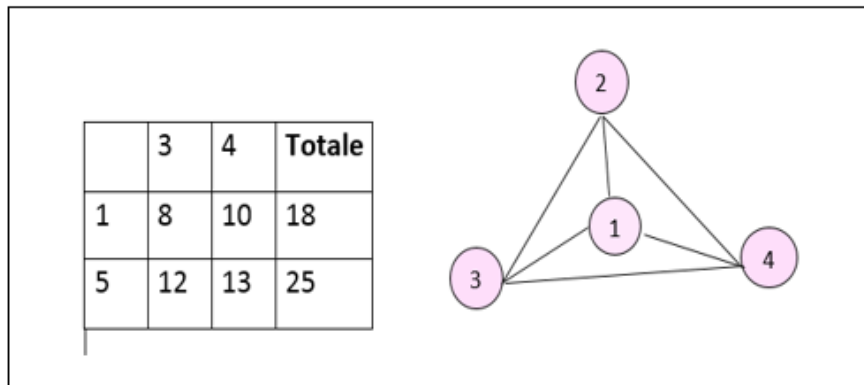


FIGURE 2.8 – Trois faces formées en plaçant le nœud 1 dans la face triangulaire.

- 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.

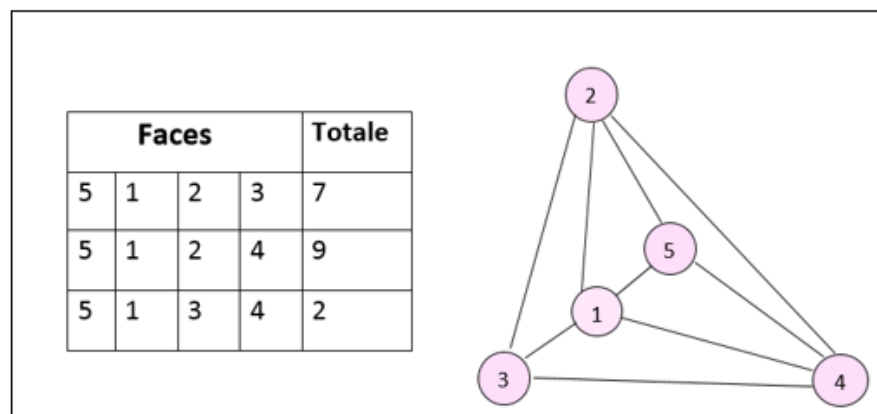


FIGURE 2.9 – Trois faces formées en plaçant le nœud 5 dans la face triangulaire 2-1-4.

- 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.

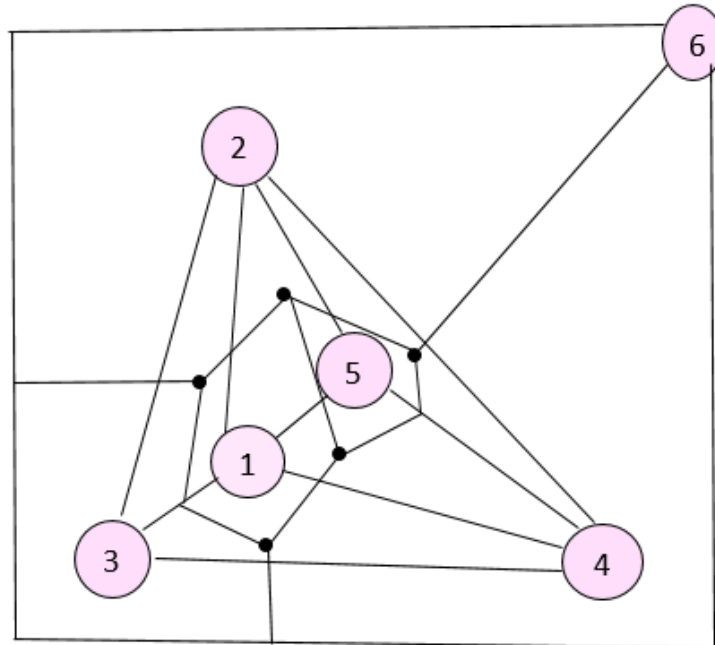


FIGURE 2.10 – dual graphe d'adjacence planaire maximal

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

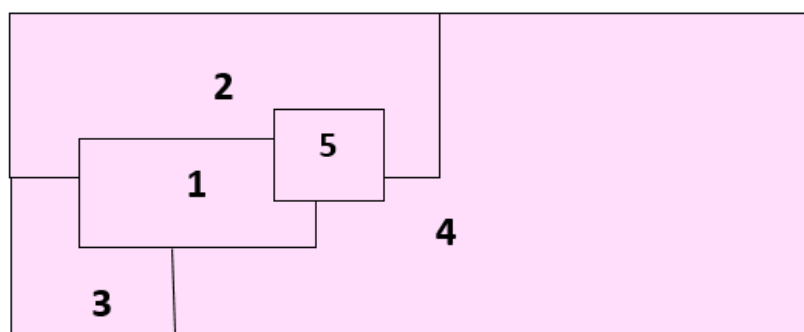


FIGURE 2.11 – Disposition finale obtenue à partir d'un dual.

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 noeuds reliés entre eux par des arcs sans former de cycle, ce qui signifie que chaque noeud à 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 noeuds 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 :

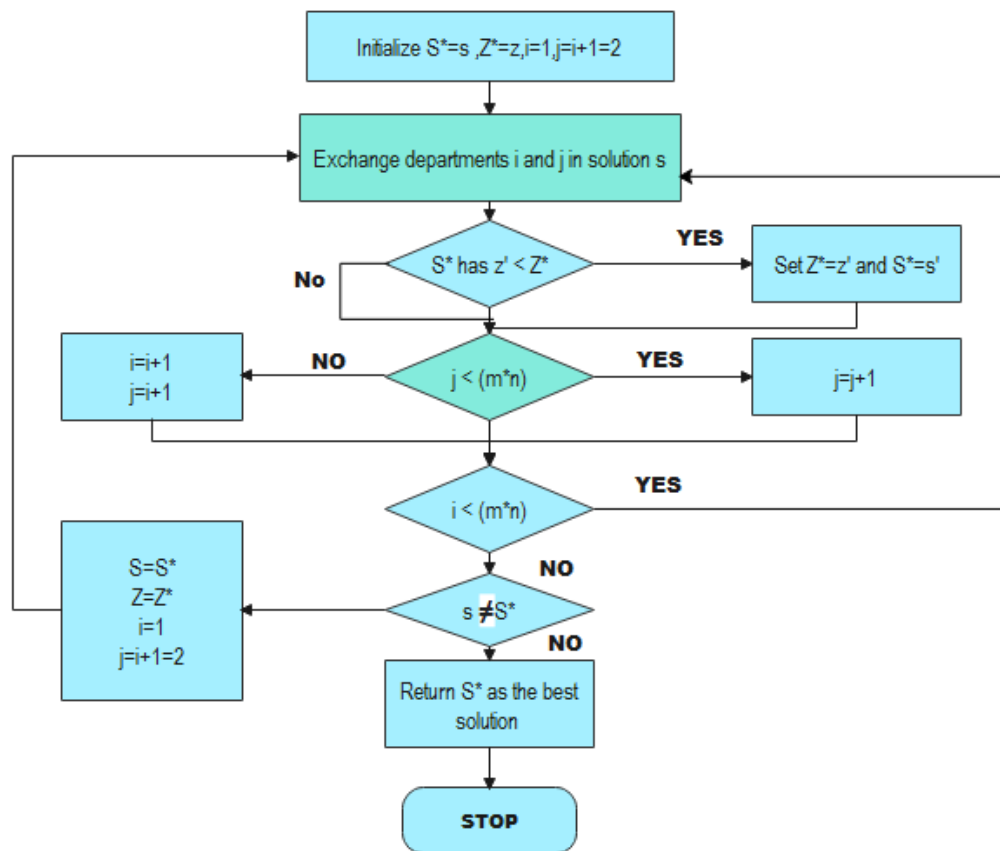


FIGURE 2.14 – les étapes de l'algorithme 2-Opt

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 $S^* = S$; $z^* = 83$; $i = 1$; $j = i + 1 = 2$.

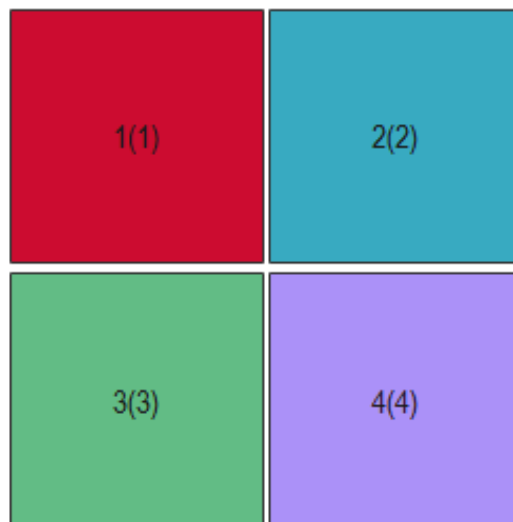


FIGURE 2.16 – Solution initiale en utilisant 2-opt

- 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.

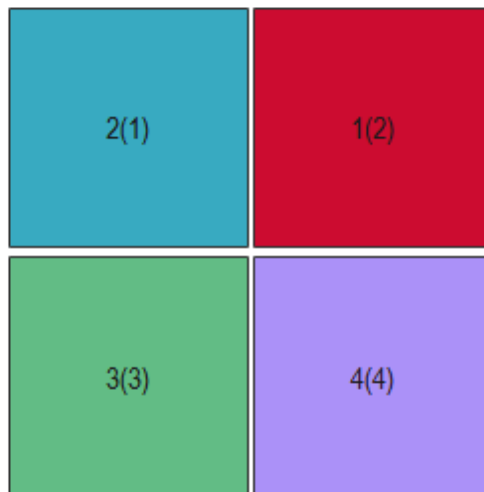


FIGURE 2.17 – Solution après avoir échangé les positions des départements 1 et 2

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

— *Étape₀* :

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.

— *Étape₁* :

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,

— *Étape₂* :

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 :

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

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_i et en réarrangeant les éléments restants en ordre décroissant et d_j est obtenu en supprimant l'élément d_j et en réarrangeant les éléments restants en ordre croissant

— *Étape₃* :

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 :

- *Étape₁* : 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
- *Étape₂* : 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 $k = 1$.

- *Étape₃* : 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 $LTM_{ij} = LTM_{ij} + 1$.
- *Étape₄* : 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

Single Row Layout Problem

3.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons identifié les éléments importants de l'analyse de la littérature SRFLP, dans ce chapitre, nous montrons comment la modélisation mathématique peut être utile pour analyser et résoudre ce problème, Nous examinons les méthodes basées sur l'optimisation et la linéarisation, en utilisant des expressions mathématiques (fonction objectif, contraintes, équations, ...) pour déterminer la position et l'orientation de chaque installation en fonction des normes industrielles et des contraintes techniques d'exploitation. Ceci nous a permis de travailler sur les aspects quantitatifs lors de la recherche de la meilleure disposition des départements.

3.2 État de l'art

Le SRFLP (Single Row Facility Layout Problem) est un problème consiste à trouver une disposition optimale d'équipements rectangulaires placés le long d'une rangée afin de minimiser le coût total de manutention et les distances totales parcourues. Ce problème est considéré comme un problème d'optimisation NP-difficile[23], parfois appelé problème unidimensionnel d'allocation d'espace[62], il dispose de nombreuses applications pratiques[31], par exemple, dans la conception des hôpitaux[32] et des centres commerciaux ; ils occupent un rôle considérable dans le secteur de la fabrication industrielle [33], etc.

Il existe plusieurs modèles d'agencement proposées pour traiter ce problème comme le modèle de programmation mathématique non linéaire en nombres entiers mixtes est proposé pour déterminer la disposition optimale des machines dans une zone bi-dimensionnelle, un algorithme basé sur l'approche de B&B est proposé pour obtenir la solution optimale de ce modèle, la technique est illustrée par un exemple simple, suivi de la résolution de petits, moyens et grandes instances, cependant, cette approche est inefficace pour les grands problèmes, ce qui nécessite l'utilisation de méta-heuristiques[24]. Comparaison de solutions globalement optimales pour SRFLP comportant jusqu'à 30 installations, précé-

demment étudiés dans la littérature, à l'aide de modèles de programmation semi-définie et de plans de coupe[61]. Deux implémentations de la recherche tabou sont présentées, l'une impliquant une recherche de voisinage exhaustive à 2-opt et l'autre impliquant une recherche de voisinage exhaustive à insertion, sont étudiées pour 43 instances de référence SRFLP dans la littérature et ont amélioré les meilleures solutions pour 23 des 43 grandes instances de ces références [28]. Étude d'un théorème permettant d'obtenir la solution optimale d'un cas particulier de SRFLP et le développement d'un nouveau algorithme tabou qui explore les solutions quasi-optimales de SRFLP pour 50 instances existantes dans la littérature à partir des solutions initiales générées par ce théorème afin de montrer l'efficacité de l'algorithme[29]. En tenant compte de différents types de contraintes imposées sur le placement des installations qui doivent être placées dans certaines positions ou dans des ordres spécifiques, la formulation de nouveaux modèles de programmation mixte en nombres entiers ainsi qu'un algorithme amélioré de feux d'artifice sont étudiés pour résoudre SRFLP de manière à minimiser le coût de la manutention [36]. La résolution de problèmes d'agencement avec des surfaces inégales d'un atelier de production de climatiseurs et application de l'algorithme génétique (NSGA-II) pour identifier la disposition optimal en tenant compte du coût de manutention et le taux de proximité, pour un grand nombre de départements[30]. L'hybridation de la recherche par voisinage variable avec l'optimisation par L'algorithme de colonies de fourmis pour résoudre SRFLP et un critère inverse basé sur la mesure de la distance de modification est appliqué pour aider les fourmis à converger vers la meilleure solution et réduire l'espace de solution[64]. L'algorithme de colonie de fourmis est proposé pour résoudre le problème de la disposition d'une seule rangée dans les systèmes de fabrication flexibles[11]. Une comparaison entre le problème d'arrangement d'installations équidistantes à une seule rangée, qui est un cas particulier de SRFLP, et l'arrangement linéaire, qui est également un cas particulier de SREFLP, en utilisant les approches exactes et heuristiques les plus compétitives sur des multiples instances [63].

Il a été démontré que SRFLP est un problème NP-complet[35], similaire au QAP qui est utilisé pour formuler le problème d'agencement [37]. Afin de comprendre cette notion, nous devons comprendre les fonctions de complexité temporelle (TCF) des algorithmes. Ces algorithmes optimaux ne sont capables de générer des solutions que pour de petits problèmes, c'est-à-dire des problèmes comportant 20 départements ou moins. En raison, le temps d'exécution est tellement grand et ce que l'on appelle NP (exponentiel) peut prendre des années à être exécuté sur un ordinateur.¹

1. La TCF d'un algorithme est la plus grande quantité de temps requise par l'algorithme pour résoudre un problème donné.

On dispose de quelques exemples dans le tableau suivant[38] :

TCF	Problem Size				P- or NP-Complete
	10	20	40	60	
N	0.001 second	0.002 second	0.004 second	0.006 second	P-complete
N^3	0.001 second	0.008 second	0.064 second	0.216 second	P-complete
2^n	0.001 second	1.0 second	12.7 days	366 centuries	NP-complete

TABLE 3.1 – Comparaison des besoins en temps de calcul des algorithmes polynomiaux et non polynomiaux

3.3 ABSMODEL

C'est un modèle non linéaire composé de termes absolus dans la fonction objectif et les contraintes. Notant qu'il y a quelques approximations et considérations à prendre en compte lors de la construction de ce modèle. La première, est que la forme de chaque machine est considérée comme rectangulaire ou carrée, même si ce n'est pas le cas dans la vie réelle, Cependant cela simplifie grandement le modèle d'optimisation. pour les calculs de distance nous établissons une ligne de référence verticale (VRL) pour calculer la distance en fonction de celle-ci, disons que la distance entre le département i et VRL est la distance entre ce dernier et le centre du département, donc lorsque nous calculons la distance entre le département i et j, nous devons calculer la différence en valeur absolue entre la distance du département i et VRL et le département j et VRL : $|x_i - x_j|$
Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'objectif est de minimiser la distance parcourue afin de minimiser le coût de la manutention sur toutes les valeurs possibles de la variable x_i . Nous pouvons donc donner à la fonction objectif la formule suivante :

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} f_{ij} |x_i - x_j| \quad (3.1)$$

Avec c_{ij} est le coût du déplacement d'une unité de charge sur une distance unitaire entre les départements i et j et f_{ij} est nombre de charges unitaires entre les départements i et j.

Il est évident que sans contraintes, la solution de l'OFV 3.1 est 0 ; elle correspond à une solution optimale dans laquelle tous les départements sont placés les uns sur les autres et donc la distance totale parcourue est égale à zéro. donc pour empêcher le chevauchement des départements, nous devons ajouter la contrainte suivante :

$$|x_i - x_j| \geq \frac{l_i + l_j}{2} + d_{ij} \quad (3.2)$$

La contrainte stipule que la distance entre une paire de machines doit être supérieure ou égale à la demi-longueur des deux machines (puisque nous mesurons la distance depuis le centre de la machine) plus l'espace libre qui est l'espace réel entre les deux machines. de plus les restrictions sur la taille du bâtiment ne sont pas prises en compte, nous supposons en fait que la taille du bâtiment est fixée à l'infini puisque nous sommes dans un problème d'optimisation, l'OFV va chercher la disposition optimale qui minimise la distance parcourue et donc la distance entre les départements, mais si la taille du bâtiment est connue à l'avance, nous pouvons l'ajouter comme une contrainte à respecter même si cela ne changera rien, cette contrainte est la suivante :

$$H - \frac{l_i}{2} \geq x_i \geq \frac{l_i}{2} \quad (3.3)$$

H est la somme de la longueur de tous les départements qui est la valeur minimale requise pour construire une disposition faisable, nous avons supposé que la clarté entre chaque paire de machines est nulle, si ce n'est pas le cas, nous devrions l'ajouter à la valeur de H , pour mieux comprendre cette contrainte 3.3, examinons les départements extrêmes gauche et droit, considérons le département i comme le département extrême gauche, la distance entre la VRL et le département i doit être au moins supérieure à sa demi-longueur, considérons maintenant le département j comme étant à l'extrême droite du bâtiment, la distance entre ce dernier et la VRL doit être inférieure à la longueur totale du bâtiment moins la demi-longueur du département. Vous pouvez examiner ce qui a été discuté sur la figure.

Nous notons que les solutions optimales aux problèmes de programmation non linéaire sont difficiles à trouver. l'avantage de linéariser un NLP est que le linear Mixed integer programming LMIP qui en résulte peut être résolu de manière optimale à l'aide d'un algorithme spécialisé, c'est pourquoi dans le prochain titre, nous allons essayer de linéariser le modèle NLP qui a été discuté précédemment.

3.4 Linear Mixed integer programming

Dans un problème de disposition sur une seule ligne, pour transformer ABSMODEL en un modèle linéaire, nous remplaçons avec des nouvelles variables $x_{ij}^+ + x_{ij}^-$ la distance non linéaire précédente, $|x_i - x_j|$ ce qui donne l'OFV suivante :

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n f_{ij} c_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^-) \quad (3.4)$$

dans laquelle :

$$x_{ij}^+ = \begin{cases} x_i - x_j & \text{si } x_i - x_j > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$x_{ij}^- = \begin{cases} x_j - x_i & \text{si } x_i - x_j \leq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$$

Puisque le flux et le prix unitaire du transport sont positifs, la nouvelle formule linéaire de la distance doit aussi être positive, l'idée est que si $x_i - x_j$ est négatif ou égal à zéro alors la distance entre les deux départements est $0 + (x_j - x_i)$ et donc $x_j - x_i$ sinon la distance est $x_i - x_j + 0$ donc une des deux valeurs de x_{ij}^+ ou x_{ij}^- est égale à zéro et les constituants suivants sont ajoutés à la formulation :

$$x_i - x_j = x_{ij}^+ - x_{ij}^- \quad i = 1, 2, \dots, n-1; j = i+1, \dots, n \quad (3.7)$$

$$x_{ij}^+, x_{ij}^- \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1; j = i+1, \dots, n \quad (3.8)$$

maintenant nous devons aussi linéariser la contrainte de non-chevauchement 3.2(3.2); pour ce faire, nous introduisons une variable binaire z où z est égal à 1 si le département i est à gauche du département j et 0 dans le cas contraire :

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i < x_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.9)$$

et la contrainte de non-chevauchement est la suivante :

$$x_i - x_j + Mz_{ij} \geq 0.5(l_i + l_j) + d_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = i+1, \dots, n \quad (3.10)$$

$$x_j - x_i + M(1 - z_{ij}) \geq 0.5(l_i + l_j) + d_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = i+1, \dots, n \quad (3.11)$$

où M est un nombre suffisamment grand

— si z_{ij} est égal à zéro (c.-à-d. que le département i est à droite du département j) la contrainte (3.10) sera : $x_i - x_j > 0.5(l_i + l_j) + d_{ij}$ et la contrainte 3.11 aura une grande valeur du côté gauche de l'équation à cause de M , quelle que soit la valeur choisie pour x_i et x_j

— De même, si z est égal à 1, la contrainte 3.10 aura une grande valeur à sa gauche et la contrainte 3.11 sera : $x_j - x_i > 0.5(l_i + l_j) + d_{ij}$

notez que là dans les deux cas et alternativement la contrainte de non-chevauchement peut être activée et désactivée.

3.5 Le choix de M

Dans notre cas, M est utilisé pour activer les contraintes de non-chevauchement afin que le terme $|x_i - x_j|$ soit toujours linéarisé correctement.

Il peut être difficile de fixer une valeur pour M. En effet, si M est trop petite, on risque d'avoir une solution infaisable, qui ne satisfait pas les contraintes.

D'autre part, si la valeur de M est trop grande, les performances du solveur d'optimisation peuvent être influencées, premièrement, une instabilité numérique peut se produire, deuxièmement, la résolution de problèmes d'optimisation avec des variables entières continues est effectuée en combinant un algorithme de branchement et de liaison (tel que, branch-and-bound) avec des relaxations et les faibles relaxations peuvent ralentir considérablement le processus de solution.

À partir des contraintes 3.10 et 3.11, nous pouvons choisir une valeur minimale de M et nous pouvons définir une valeur négative aussi petite de la différence entre x_i et x_j .

Supposons le cas $z_{ij} = 1$ avec les départements i et j aussi éloignés que possible l'un de l'autre dans une rangée de longueur L, et que i est à gauche de j.

Alors, $x_i = \frac{1}{2}l_i$ et $x_j = \frac{1}{2}(l_i + l_j)$, et par conséquent,

$$x_j - x_i = \frac{1}{2}l_i - (L - \frac{1}{2}l_j) = \frac{1}{2}(l_i + l_j) - L.$$

En conclusion, dans ce cas, $M = L$ est un choix valide pour 3.10. Cette valeur est aussi valable pour 3.11, pour le cas $z_{ij} = 0$.

3.6 Conclusion

L'idée principale est de fournir une formulation du problème FLP qui permet de placer les installations sur une seule rangée. Plusieurs hypothèses ont été prises en compte tout en respectant certaines contraintes fondamentales pour les applications réelles telles que les limites de l'atelier, l'élimination des chevauchements et l'orientation optimale des départements où l'objectif est de minimiser les distances parcourues entre les départements et de maximiser le taux de proximité désiré. On a appliqué des modèles de programmation mixte en nombres entiers comme approche de résolution, nous avons discuté des techniques pour convertir les ABSMODELS en modèles mixtes linéaires et en modèles linéaires. Ces approches sont limitées aux petits problèmes.

Finalement, la modélisation permet de clarifier le problème et de prendre en compte les facteurs qui sont critiques dans le développement d'un layout sur une seule rangée. Dans le prochain chapitre, nous appliquerons le modèle conçu dans ce chapitre à plusieurs configurations pour interpréter et déduire les résultats.

Chapitre 4

Modèle mathématique pour le problème de la disposition des installations sur une seule rangée

4.1 Introduction

dans ce chapitre, nous introduirons un modèle de programmation linéaire pour le problème de disposition des installations sur une seule rangée avec des départements de surfaces égale et inégales, notre modèle vise à minimiser la distance parcourue entre les départements comme premier objectif (OFV1) et à maximiser la relation d'adjacence comme deuxième objectif (OFV2). Pour voir l'impact de la combinaison de deux fonctions objectif en une seule, nous étudierons d'abord chacune d'entre elles indépendamment, c'est pourquoi la partie 1 est consacrée à l'étude de la fonction objectif 1 qui sera nommé plus tard (OF1) qui consiste à minimiser la distance multipliée par le nombre de voyages allers-retours et la partie 2 est consacrée à l'étude de la fonction objectif 2 qui sera nommé plus tard (OF2) qui consiste à minimiser la distance multipliée par la matrice de relation de proximité, la partie 3 est la combinaison des deux fonctions objectif précédentes avec une pondération .

4.2 Le modèle mathématique

Les Hypothèses

Les principales hypothèses prises en compte dans cette étude sont les suivantes :

- Les départements peuvent avoir des surfaces égales ou inégales.
- L'orientation des installations est prise en considération (si elles sont placées verticalement ou horizontalement).
- Le coût du transport des produits entre chaque paire de départements est proportionnelle avec la distance multiplié par le nombre de voyages allée retour.
- 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 $f_{ij} = f_{ji}$
- 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.
- l'espace nécessaire au fonctionnement de la machine est intégrée dans les dimensions de l'installation.
- Les produits fabriqués dans les départements (machines) sont identiques en type et en taille.

Les paramètres du modèle :

- $N = \{i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ L'ensemble des installations .
- l_i : La longueur de l'installation i
- w_i : La largeur de l'installation j
- f_{ij} : La matrice de flux entre les installations i et j.
- X_{max} : la longueur maximale de la rangée.
- Y_{max} : la largeur maximale de la rangée.
- R_{ij} : Matrice des relations de proximité.
- M : Un grand nombre.

Les variables de décision :

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{si la longueur de l'installation est parallèle à l'axe des x (orientation horizontale) .} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$Zx_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'installation i est placée à droite de l'installation } f_j. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.2)$$

x_i : la distance sur l'axe des x entre le centre de l'installation i et la ligne de référence verticale (VRL)

y_i la distance sur l'axe des y entre le centre de l'installation i et la ligne de référence horizontale (HRL)

D_{ij} : La distance entre l'installation f_i et f_j

L_i : La longueur de l'installation f_i sur l'axe des x

W_i : La largeur de l'installation f_i sur l'axe des y

Les contraintes :

a) Contrainte d'orientation

Cette contrainte détermine la longueur et la largeur de l'installation sur l'axe x et y respectivement. La figure 4.1 montre les deux orientations potentielles de l'installation.

$$L_i = l_i V_i + w_i(1 - V_i) \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (4.3)$$

$$W_i = l_i(1 - V_i) + w_i V_i \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (4.4)$$

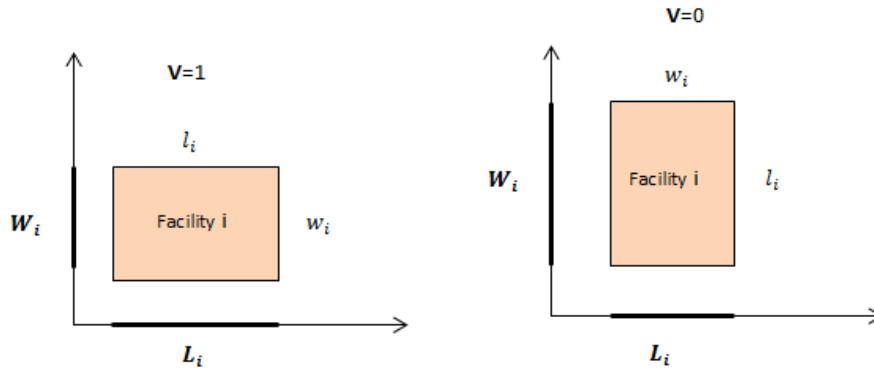


FIGURE 4.1 – L_i et W_i selon l'orientation de l'installation .

b) Contrainte de non-chevauchement

$$x_i - x_j + M(1 - Zx_{ij}) \geq \frac{L_i + L_j}{2} \quad \forall i, j \neq i \in \mathbb{N} \quad (4.5)$$

$$x_j - x_i + M(1 - Zx_{ji}) \geq \frac{L_i + L_j}{2} \quad \forall i, j \neq i \in \mathbb{N} \quad (4.6)$$

$$Zx_{ij} + Zx_{ji} = 1 \quad \forall i, j \neq i \in \mathbb{N} \quad (4.7)$$

Les contraintes 4.5 et 4.6 garantissent que la distance sur l'axe des x entre deux installations est au moins égale à la moitié de leur longueur, afin qu'elles ne se chevauchent pas. puisque toutes les installations sont affectées à la même rangée, la contrainte 4.7 garantit que chaque installation est soit à droite, soit à gauche de l'autre installation.

c) Les contraintes liées aux dimensions de l'atelier

$$x_i \geq \frac{L_i}{2} \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (4.8)$$

$$x_i + \frac{L_i}{2} \leq X_{max} \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (4.9)$$

$$y_i \geq \frac{W_i}{2} \quad \forall i \in \mathbb{N}$$

$$y_i + \frac{W_i}{2} \leq Y_{max} \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (4.10)$$

Ces contraintes garantissent que les installations doivent être placées en respectant les limites de la rangée définie par (xmax, ymax).

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.

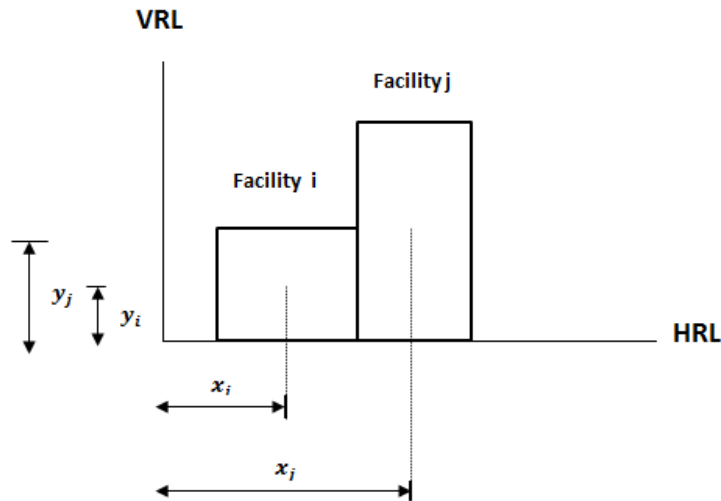


FIGURE 4.2 – illustration du calcul de la distance .

Partie 1 : Fonction objectif 1(OF1)

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le modèle a deux fonctions objectives que nous allons étudier chacune indépendamment, la première consiste à minimiser la distance entre les départements. Elle s'exprime comme suit :

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n f_{ij} D_{ij} \quad (4.11)$$

4.2.1 Expériences et résultats pour OF1 :

Notre modèle mathématique pour le problème de disposition des installations sur une seule rangée sera utilisé pour résoudre une petite instance de problème, nous avons commencé avec 3 installations et puis 6. Le modèle est résolu de manière optimale en utilisant le solveur 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 à ce que cplex lit les données et écrit les résultats dans ce dernier afin d'utiliser les résultats obtenus pour être utilisés comme entrée à macro Excel pour dessiner la configuration donnée en cliquant sur le bouton "dessiner a disposition". (La version d'Excel utilisée est Microsoft Excel 2010).

Exemple 1 :

TABLE 4.1 – Données et résultats de la résolution de SRFLP avec OF1 avec 3 départements

Les données												
Nombre d'installations	n	Longueur		Largeur		Flux (f_{ij})						
		(l_i)	(w_i)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
3	1	4		2			-	10		20		
	2	3		1		10		-		5		
	3	5		3		20		5		-		
L'atelier (Xmax Ymax)		10		5								
Les variables de décision												
Nombre d'installations	n	x_i	y_i	d_{ij}			v_i	L_i	W_i	z_{ij}		
				1	2	3				1	2	3
3	1	4	2.5	0	1.5	2.5	0	2	4	0	0	1
	2	5.5	2.5	1.5	0	4	0	1	3	1	0	1
	3	1.5	2.5	2.5	4	0	0	3	5	0	0	0
fonction objectif=170												

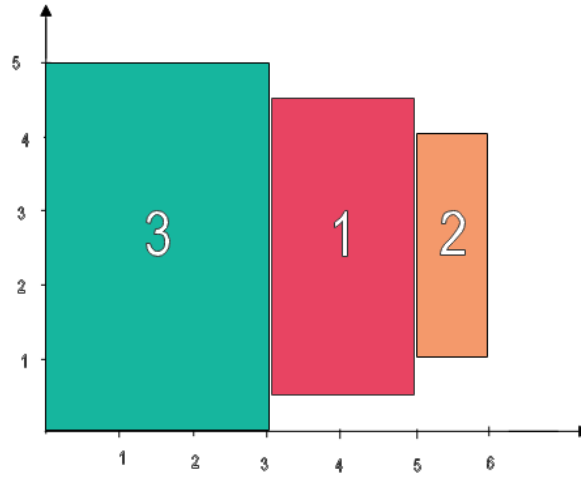


FIGURE 4.3 – disposition optimale en utilisant OF1 pour 3 départements .

Dans cet exemple, nous avons 3 installations à mettre en place sur une seule rangée avec des dimensions de 10×5 , les données et les résultats pour cet exemple sont présentés dans le tableau (4.1) et (4.2). Dans le premier tableau de données, la longueur et la largeur de l'installation 2 par exemple sont respectivement de 3 et 1 unité de distance et le nombre de déplacements de l'installation 2 vers 3 est de 5 déplacements, la configuration dessinée ci-dessous est schématisé en observant les valeurs des coordonnées (x_i, y_i)

nous remarquons que les départements 2 et 3 ont un grand nombre de déplacement avec le département 1 alors qu'ils ont un nombre relativement faible de flux entre eux, c'est pourquoi le département 1 est placé au milieu. En outre, puisque la distance calculée est la distance de Manhattan, le modèle a favorisé que tous les départements ont la même valeur, y_i de sorte que la distance sur l'axes y entre n'importe quelle paire de départements est égale à zéro, ce qui contribue à la fonction objectif en minimisant la distance.

Exemple 2 :

dans ce deuxième exemple, nous avons augmenté la taille du problème à 5 installations, afin d'avoir une configuration finale automatique sans avoir besoin de dessiner la configuration par nous-mêmes, nous avons utilisé un macro Excel qui fournit avec un clic de bouton la configuration finale des résultats bien sûr en le connectant avec CPLEX.

4.2.2 Présentation graphique avec EXCEL :

Dans le fichier excel nous avons trois feuilles, la première "Data" est pour les données, nous les insérons nous-mêmes pour que le cplex puisse les lire directement, voir la figure 4.4.

La deuxième feuille "Results" est destinée aux résultats dans laquelle cplex écrira automatiquement, nous avons créé le bouton " suivant " pour passer à la feuille "Graph" suivante. (voir figure 4.5).

La troisième feuille " Graph" est destinée à la disposition des départements le long d'une seule rangée à partir du plan (x, y) de point de départ (0,0)(voir figure 4.6).

Pour obtenir la disposition, on clique sur le bouton "dessiner les dispositions", puis une fenêtre de confirmation apparaît avec le message "voulez-vous dessiner la disposition?". en cliquant sur "oui" nous obtenons la disposition montrée dans la figure 4.8.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	number of facilities		Data								
2	5										
3						f					
4	facilities	length(l)	width(w)	1	2	3	4	5	Xmax	Ymax	
5	1	4	2	0	10	20	15	7	20	4	
6	2	3	1	10	0	5	4	12			
7	3	5	3	20	5	0	6	2			
8	4	4	3	15	4	6	0	9			
9	5	2	1	7	12	2	9	0			
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											

FIGURE 4.4 – Données Excel pour le SRFLP pour la première fonction objectif. .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2									
3	Results								
4	facilities	V	L	W	x	y			
5	1	0	2	4	6	2			
6	2	0	1	3	7,5	2			
7	3	1	5	3	2,5	2			
8	4	0	3	4	10,5	2			
9	5	0	1	2	8,5	2			
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									

SUIVANT

Objectif function 594

Results Graph Data

FIGURE 4.5 – Résultats Excel pour le SRFLP pour la première fonction objectif. .

Actualiser les dispositions		DESSINER LES DISPOSITIONS				RETOUR							
Results							Echelle						
facilitie	V	L	W	x	y	Facilities	V	L	W	x	Origine	I	Y
3	1	5	3	2,5	2	3	1	5	3	2,5	1	5	2
1	0	2	4	6	2	1	0	2	4	6	6	7	2
2	0	1	3	7,5	2	2	0	1	3	7,5	8	8	2
5	0	1	2	8,5	2	5	0	1	2	8,5	9	9	2
4	0	3	4	10,5	2	4	0	3	4	10,5	10	12	2

FIGURE 4.6 – Résultats Excel pour le SRFLP pour la première fonction objectif.

Actualiser les dispositions		DESSINER LES DISPOSITIONS				RETOUR							
Data							Echelle						
facilitie	V	L	W	x	y	Facilities	V	L	W	x	Origine	I	Y
3	1	5	3	2,5	2	3	1	5	3	2,5	1	5	2
1	0	2	4	6	2	1	0	2	4	6	6	7	2
2	0	1	3	7,5	2	2	0	1	3	7,5	8	8	2
5	0	1	2	8,5	2	5	0	1	2	8,5	9	9	2
4	0	3	4	10,5	2	4	0	3	4	10,5	10	12	2

Demande de confirmation

Voulez-vous dessiner la disposition ?

Oui Non

FIGURE 4.7 – Affichage du message de confirmation .

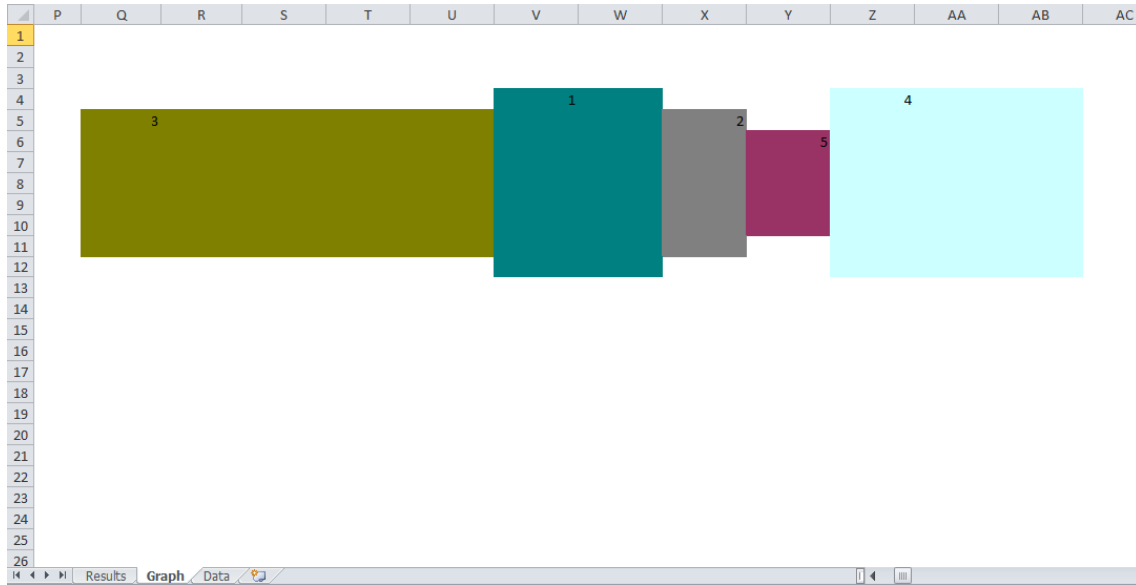


FIGURE 4.8 – Disposition optimale pour le SRFLP avec 5 départements en utilisant OF1

Dans la disposition donnée, les départements qui ont un grand nombre de flux entre eux sont placés les uns à côté des autres, car affecter une plus petite distance entre eux attribuera plus à la fonction objectif. Aussi puisque la largeur de la rangée est égale à 4, le département 3 ne peut pas être placé verticalement, il est placé horizontalement et tous les départements ont la même valeur y (pour minimiser la distance).

Partie 2 : fonction objectif 2(OF2)

La deuxième fonction objectif a un aspect qualitatif, elle vise à minimiser la distance entre les départements qui ont un grand facteur de proximité entre eux (en d'autres mots, maximiser la proximité totale). Cette proximité est mesurée par le Total Closeness Rating 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 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, l'OF2 s'exprime comme suit :

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n R_{ij} D_{ij} \quad (4.12)$$

4.2.3 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 d'adjacence (R_{ij}).

Exemple 1 :

TABLE 4.2 – résultats de la résolution de SRFLP avec OF2 avec 3 départements

Les données												
Nombre d'installations	n	Longueur	Largeur	R_{ij}								
		(l_i)	(w_i)	1	2	3						
3	1	4	2	-	2	16						
	2	3	1	2	-	8						
	3	5	3	16	8	-						
L'atelier(xmax ymax)		10	5									
Les variables de décision												
Nombre d'installations	n	x_i	y_i	d_{ij}			v_i	L_i	W_i	z_{ij}		
				1	2	3				1	2	3
3	1	1	2.5	0	4.5	2.5	0	2	4	0	0	0
	2	5.5	2.5	4.5	0	2	0	1	3	1	0	1
	3	3.5	2.5	2.5	2	0	0	3	5	1	0	0
fonction objectif=130												

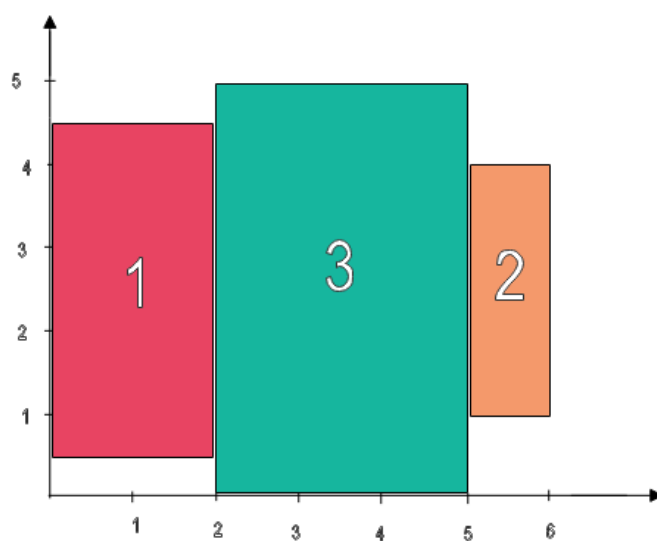


FIGURE 4.9 – disposition optimale selon la fonction objectif 2 pour 3 départements .

Dans cet exemple, l'installation 3 est placée au milieu parce qu'elle a une forte relation avec les installations 2 et 1 alors que ces deux dernières ont une faible relation entre eux, de plus le modèle a choisi de placer le département verticalement pour contribuer plus à la fonction objective en minimisant la distance.

le TCR est calculé en observant la disposition finale, en additionnant les valeurs de la matrice de relation de proximité des départements placés les uns à côté des autres. Pour cet exemple le $TCR = 16 + 8 = 24$

Exemple 2 :

Les données									
Nombre d'installations	n	Longueur (l_i)	Largeur (w_i)	R_{ij}					
				1	2	3	4	5	
5	1	4	2	-	16	2	8	0	
	2	3	1	16	-	8	4	0	
	3	5	3	2	8	-	4	0	
	4	4	3	8	4	4	-	2	
	5	2	1	0	0	0	2	-	
L'atelier(xmax ymax)		10	5						

Les variables de décision																
Nombre d'installations	n	x_i	y_i	d_{ij}					v_i	L_i	W_i	z_{ij}				
				1	2	3	4	5				1	2	3	4	5
5	1	7	2	0	1.5	4.5	2.5	5	0	2	4	0	1	1	0	0
	2	5.5	2	1.5	0	3	4	6	0	1	3	0	0	1	0	0
	3	2.5	2	4.5	3	0	7	9	1	5	3	0	0	0	0	0
	4	9.5	2	2.5	4	7	0	2	0	3	4	1	1	1	0	0
	5	11.5	2	5	6	9	2	0	0	1	2	1	1	1	1	0

fonction objectif=281.5

TABLE 4.3 – Données et résultats pour SRFLP pour la fonction objectif 2

4.2.4 Présentation graphique avec EXCEL :

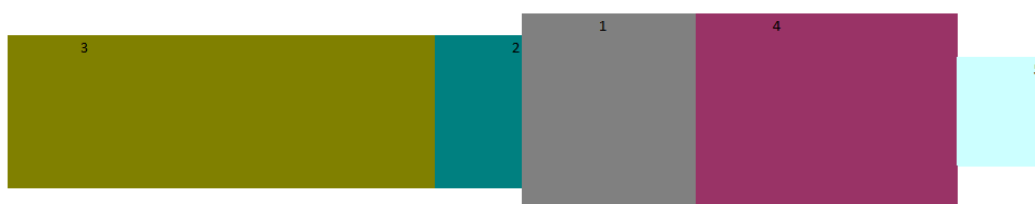


FIGURE 4.10 – disposition optimale selon la fonction objectif 2 pour 5 départements .

La configuration montrée dans la figure 4.10 donne la distance minimale aux départements avec une grande proximité, nous remarquons que le département 3 est placé horizontalement parce que la largeur de la rangée est égale à 4 tandis que sa longueur est de 5 unités de distance.

En observant la disposition finale et en additionnant les valeurs de la matrice de relation de proximité des départements placés les uns à côté des autres, nous obtenons le TCR suivant :

$$\text{TCR} = 8 + 16 + 8 + 2 = 34$$

Partie 3 : la fonction d'objectif multicritère :

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 :

$$\alpha \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n OF1' + \beta \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n OF2' \quad (4.13)$$

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 4.4 de OF1 et le tableau 4.3 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 α et β , 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 de 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 f_{ij} est la matrice normalisée pour le flux et R_{ij} est la matrice normalisée pour la relation de proximité

$$X_{normalized} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4.14)$$

les différentes instances pour α et β

Nous avons utilisé les mêmes données pour les 3 instances en variant uniquement les valeurs de α et β , les données sont représentées dans la figure 4.11

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y		
1	er of facilities	Data																									
2	5																										
3						R					R1					flow (f)					f1						
4	facilities	length(l)	width(w)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	Xmax	Ymax		
5	1	4	2	0	16	2	8	0	0	1	0,125	0,5	0	0	10	20	15	7	0	0,5	1	0,75	0,35	20	4		
6	2	3	1	16	0	8	4	0	1	0	0,5	0,25	0	10	0	5	4	12	0,5	0	0,25	0,2	0,6				
7	3	5	3	2	8	0	4	0	0,13	0,5	0	0,25	0	20	5	0	6	2	1	0,25	0	0,3	0,1				
8	4	4	3	8	4	4	0	2	0,5	0,25	0,25	0	0,125	15	4	6	0	9	0,75	0,2	0,3	0	0,45				
9	5	2	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0,125	0	7	12	2	9	0	0,35	0,6	0,1	0,45	0				
10																											
11																											
12																											
13																											
14																											
15																											
16																											
17																											
18																											
19																											
20																											
21																											
22																											
23																											
24																											

FIGURE 4.11 – 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	H	I
1									
2									
3	Results								
4	facilities	V	L	W	x	y			
5	1	0	2	4	6	2			
6	2	0	1	3	7,5	2			
7	3	1	5	3	2,5	2			
8	4	0	3	4	10,5	2			
9	5	0	1	2	8,5	2			
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									

SUIVANT

Objectif function 24,5375

Results Graph Data

FIGURE 4.12 – Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la première instance .

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

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1										
2										
3	Results									
4	facilities	V	L	W	x	y				
5	1	0	2	4	5	2				
6	2	0	1	3	6,5	2				
7	3	1	5	3	9,5	2				
8	4	0	3	4	1,5	2				
9	5	0	1	2	3,5	2				
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										

SUIVANT

Objectif function 23,255

FIGURE 4.15 – Les résultats pour la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	Actualiser les dispositions			DESSINER LES			RETOUR									
2																
3	Results						Echelle									
4	facilitie	V	L	W	x	y	Facilities	V	L	W	x	Origine	I	Y		
5	4	0	3	4	1,5	2	4	0	3	4	1,5	1	3	2		
6	5	0	1	2	3,5	2	5	0	1	2	3,5	4	4	2		
7	1	0	2	4	5	2	1	0	2	4	5	5	6	2		
8	2	0	1	3	6,5	2	2	0	1	3	6,5	7	7	2		
9	3	1	5	3	9,5	2	3	1	5	3	9,5	8	12	2		
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																

FIGURE 4.16 – Les resultats pour la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance .

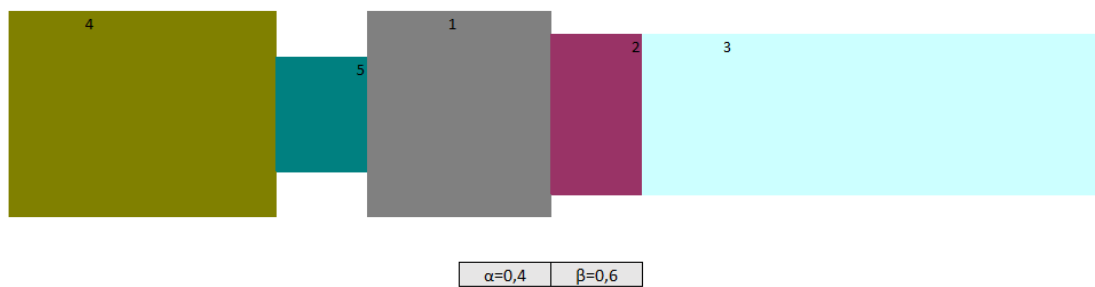


FIGURE 4.17 – disposition optimale de la fonction multi-objectifs pour la deuxième instance .

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

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1										
2										
3	Results									
4	facilities	V	L	W	x	y				
5	1	0	2	4	6	2				
6	2	0	1	3	4,5	2				
7	3	1	5	3	9,5	2				
8	4	0	3	4	1,5	2				
9	5	0	1	2	3,5	2				
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										

SUIVANT

Objectif function 25,57

Results Graph Data

FIGURE 4.18 – Résultats de la fonction multi-objectifs pour la troisième instance. .

Results							Echelle							
facilitie	V	L	W	x	y		Facilities	V	L	W	x	Origine	I	Y
4	0	3	4	1,5	2		4	0	3	4	1,5	1	3	2
5	0	1	2	3,5	2		5	0	1	2	3,5	4	4	2
2	0	1	3	4,5	2		2	0	1	3	4,5	5	5	2
1	0	2	4	6	2		1	0	2	4	6	6	7	2
3	1	5	3	9,5	2		3	1	5	3	9,5	8	12	2

FIGURE 4.19 – Résultats de la fonction multi-objectifs pour la troisième instance. .

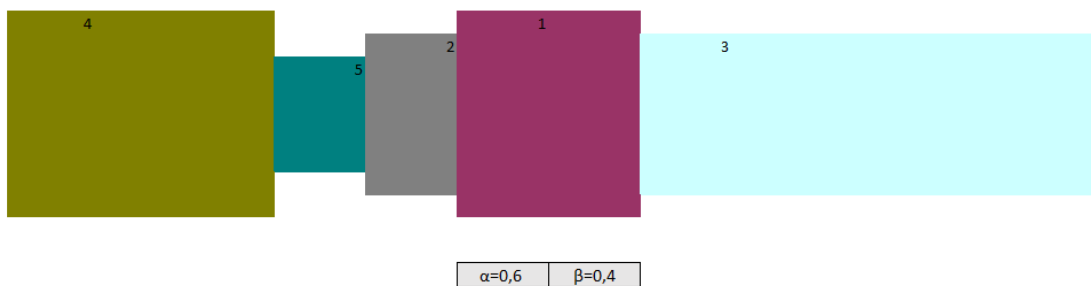


FIGURE 4.20 – La disposition optimal de la fonction multi-objectifs pour la troisième instance.

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 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 4.21 qui illustre comment le choix de α et β influence la fonction objectif et le TCR . Nous avons également établi un tableau récapitulatif 4.4

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

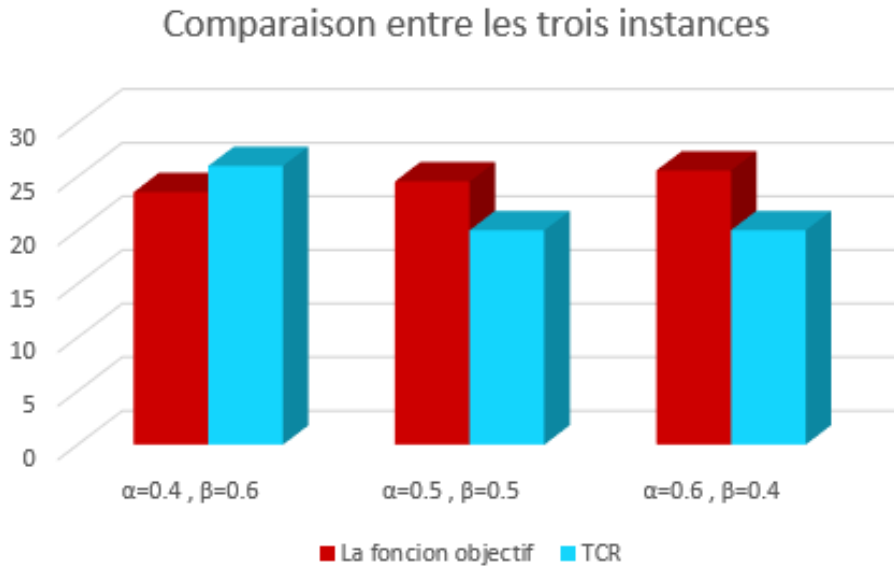


FIGURE 4.21 – Comparaison entre les 3 insatnces.

Tableau récapitulatif

	OF1	OF2	Fonction multi critere		
			$\alpha=0.4, \beta=0.6$	$\alpha=0.5, \beta=0.5$	$\alpha=0.6, \beta=0.4$
la fonction objectif	594	281.5	23.55	24.555	25.57
TCR		34	26	20	20
La disposition	3-1-2-5-4	3-2-1-4-5	4-5-1-2-3	3-1-2-5-4	4-5-2-1-3

TABLE 4.4 – Résultats de la résolution de SRFLP avec OF 1, OF 2 et Multi-critere avec 5 départements

4.3 Temps d'exécution sur CPLEX par rapport à la taille du problème :

facilities number	Run time on CORE I3 (in seconds)
3	0.14
4	0.17
5	0.20
6	0.32
7	0.64
8	4,75
9	6,04
10	23,39

TABLE 4.5 – L'effet de la complexité du problème sur le temps d'exécution

4.4 Application de l'algorithme 2-opt

Dans cette section nous appliquons l'algorithme d'amélioration 2-opt, comme son nom l'indique, l'algorithme 2-opt demande une disposition initiale et travaillera sur celle-ci pour voir si cette disposition peut s'améliorer en observant la valeur de la fonction objectif, qui est établie comme suit : $\min \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n f_{ij} d_{ij}$ (pour plus de détails sur l'algorithme 2-opt voir le chapitre 2), puisque la fonction objectif vise à minimiser le flux multiplié par la distance, nous allons comparer la disposition donnée par OF1 et celle de l'algorithme 2-OPT pour voir lequel des deux établit la distance minimale parcourue .

L'algorithme a été codé en utilisant le langage de programmation **Python**, les données insérées pour le programme sont celles représentées dans la figure 4.22, la matrice de distance insérée pour le programme peut être facilement calculée en connaissant la disposition initiale , et la matrice des flux est la même que celle utilisée dans OF1.

```
matflux = [[0,10,20,15,7],[10,0,5,4,12],[20,5,0,6,2],[15,4,6,0,9],[7,12,2,9,0]];  
matdist=[[0,2,5,8.5,11.5],[2,0,3,7.5,9.5],[5,3,0,4.5,6.5],[8.5,7.5,4.5,0,3.5],[11.5,9.5,6.5,3.5,0]];  
soli = [1, 2, 3,4,5];  
solg = [0, 0, 0,0,0];  
sol = [0, 0, 0,0,0];  
n = 5;
```

FIGURE 4.22 – Les données insérées pour le programme 2-opt .


```

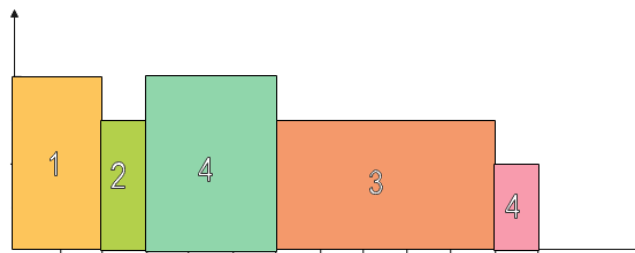
('disposition finale :', [1, 2, 4, 3, 5])
5
6
('fonction objectif', 881.0)

Process finished with exit code 0

```

FIGURE 4.23 – Résultats finaux sur PyCharm de l’application de l’algorithme 2-opt .

L’algorithme 2-opt a généré une valeur de la fonction objectif égale à 881 avec la disposition 1,2,4,3,5 (voir figure 4.23), tandis que la valeur de la fonction objectif 1 est égale à 594 avec la disposition donnée de 3,1,2,5,4, nous observons que la distance totale parcourue a été minimisée en utilisant notre algorithme précédent, en particulier avec OF1 car $594 < 881$.



disposition établie par l’algorithme 2-opt.



FIGURE 4.24 – disposition pour le SRFLP avec 5 départements en utilisant OF1 .

4.5 conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit un modèle mathématique linéaire pour le SR-FLP avec des départements de surface égale et inégale, nous avons d’abord étudié le modèle avec une seule fonction objectif qui est de minimiser le flux multiplié par la distance, en réalité minimiser cette formule réduira les coûts de transport des matériaux, la deuxième fonction objectif vise à maximiser l’adjacence totale entre les départements en fonction de la désirabilité de placer les départements les uns à côté des autres, elle est exprimée en multipliant la matrice de de relations par la distance, enfin nous avons combiné les deux fonctions objectif précédentes pour obtenir une disposition optimale qui prend en considération les aspects quantitatifs et qualitatifs à la fois.

Conclusion Générale

Le problème de l'aménagement d'une usine "FLP" est un problème industriel visant à trouver la meilleure disposition des installations sur un site donné, afin d'optimiser certaines performances pour réduire les coûts de manutention, augmenter la productivité, exploiter plus efficacement l'espace existant, d'adapter les installations aux modifications futures et de fournir aux travailleurs un environnement de travail confortable et sécurisé. Afin d'atteindre un ou plusieurs objectifs soumis à certaines contraintes liées au site de construction, aux exigences de fonctionnement du système et au choix des responsables.

Les travaux de recherche dans ce domaine se concentrent sur la classification du FLP dans laquelle ils ont introduit le concept de rangées pour concevoir la disposition en proposant des méthodes de résolution.

Dans cette étude, nous avons déterminé la meilleure configuration de l'équipement en respectant les diverses contraintes et en minimisant deux fonctions objectifs. Nous avons réalisé les quatre chapitres suivants afin de proposer une solution au SRFLP et définir plus en détail les objectifs de notre recherche :

- Le premier chapitre s'ouvre sur une introduction présentant les motivations de ce travail. Ensuite, une présentation de l'état de l'art de FLP est donnée au lecteur en s'appuyant sur un grand nombre de références bibliographiques. Enfin, quelques notions générales utilisées dans cette thèse sont mises en œuvre.
- Le deuxième chapitre présente les différentes approches traditionnelles et nouvelles pour résoudre les problèmes de conception. Ces approches visent soit à trouver de meilleures solutions, soit à trouver une solution optimale, globale ou locale, dans le but de mieux orienter notre recherche.
- Le troisième chapitre, consacré à la formulation du SRFLP, contient un état de l'art des principaux travaux de recherche déjà existants dans la littérature. Ensuite, l'application des méthodes de modélisation qui permettent la linéarisation de la fonction objectif et des contraintes. Enfin, les contraintes exploitées dans notre travail de recherche, l'élimination des chevauchements, ainsi que les limites de l'atelier et l'élimination des chevauchements sont mentionnés.
- Le quatrième chapitre, consacré à la représentation de notre modèle mathématique pour déterminer la localisation et l'orientation optimales des installations en minimisant le nombre d'allers-retours et en maximisant la proximité, considère plusieurs hypothèses plus proches de la réalité. Ensuite, le logiciel CPLEX version 12.6 est utilisé pour résoudre le modèle proposé sur de petites instances en considérant le

temps d'exécution, afin d'étudier la complexité du modèle. Enfin, l'interprétation des résultats obtenue à l'aide d'une application sur EXCEL qui présente graphiquement la configuration optimale ainsi que l'algorithme d'amélioration 2-opt pour valider les résultats.

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.
 - Les distances entre les postes de travail sont calculées de centre à centre. Il est donc nécessaire de proposer une formulation mathématique qui tienne compte de la distance entre les points d'entrée/sortie des équipements.
2. **Au niveau de la formulation des modèles SRFLP** : 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.
 - 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] Heragu, S. S. (2018). Facilities design. Crc Press.
- [2] Sule, D. R. (2008). Manufacturing facilities : location, planning, and design. CRC press.
- [3] Miguel F. Anjos, Facility Layout Mathematical Optimization Techniques and Engineering Applications ,2021.
- [4] 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.
- [5] Chraibi, A. (2015). A decision making system for operating theater design : application of facility layout problem (Doctoral dissertation, Saint-Etienne).
- [6] Mana Meskar. Kouros Eshghi, An Algorithm for Solving Generalized Single Row Facility Layout Problem, 2020.
- [7] Mariem Besbes. Modélisation et résolution du problème d'implantation des ateliers de production, proposition d'une approche combinée Algorithme Génétique–Algorithme A, 2019.
- [8] Silu Liu, Zeqiang Zhang, Chao Guan, Lixia Zhu, Min Zhang, Peng Guo, An improved fireworks algorithm for the constrained single-row facility layout problem, 2020.
- [9] Kulkarni, M. H., Bhatwadekar, S. G., & Thakur, H. M. International journal of engineering sciences & research technology a literature review of facility planning and plant layouts.
- [10] Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2006). Facility layout problems : A literature analysis. IFAC Proceedings Volumes, 39(3), 389-400.
- [11] Solimanpur, M., Vrat, P., & Shankar, R. (2005). An ant algorithm for the single row layout problem in flexible manufacturing systems. Computers & Operations Research, 32(3), 583-598.
- [12] W. Wiyaratn, & A. Watanapa Improvement Plant Layout Using Systematic Layout Planning (SLP) for Increased Productivity, 2010.
- [13] Meller, R.D., V. Narayanan and P.H. Vance (1999). Optimal facility layout design. Operations Research Letters, 23 (3-5), 117 – 127.

- [14] Syed Asad Ali Naqvi , Muhammad Fahad , Muhammad Atir , Muhammad Zubair , Muhammad Musharaf Shehzad, Productivity improvement of a manufacturing facility using systematic layout planning, 2016.
- [15] D Suhardini¹, W Septiani, & S Fauziah, Design and Simulation Plant Layout Using Systematic Layout Planning, 2017.
- [16] Miguel F. Anjos, Manuel V. C. Vieira, Mathematical optimization approach for facility layout on several rows, 2020.
- [17] Abdelahad Chraibi¹ · Ibrahim H. Osman² , Said Kharraja³, Adaptive layout for operating theatre in hospitals, different mathematical models for optimal layouts, 2018.
- [18] Kovács, G., & Kot, S. (2017). Facility layout redesign for efficiency improvement and cost reduction. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, 16(1), 63-74.
- [19] Ravi Kothari · Diptesh Ghosh, The single row facility layout problem, state of the art, 2012.
- [20] Ahmed, Z. H. (2014). The ordered clustered travelling salesman problem : A hybrid genetic algorithm. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [21] Belhouli, A. E. (2021). L'algorithme Séquentielle (Réduit Simulé+ Algorithme 2-Opt Pour La Résolution Du Problème De Routage De Véhicules avec Capacité (PRVC) (Doctoral dissertation, Université de Bordj Bou Arreridj Faculty of Mathematics and Computer Science).
- [22] Derakhshan Asl, A., & Wong, K. Y. (2017). Solving unequal-area static and dynamic facility layout problems using modified particle swarm optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6), 1317-1336.
- [23] Keller, B., & Buscher, U. (2015). Single row layout models. *European Journal of Operational Research*, 245(3), 629-644.
- [24] Solimanpur, M., & Jafari, A. (2008). Optimal solution for the two-dimensional facility layout problem using a branch-and-bound algorithm. *Computers et Industrial Engineering*, 55(3), 606-619.
- [25] Lee, J. K. P., Mark, S. K., Portner, P. M., & Moore, R. B. (1967). (p, d) reactions on light nuclei at 100 MeV. *Nuclear Physics A*, 106(2), 357-368.
- [26] 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.
- [27] Lee, R. C. (1967). CORELAP-computerized relationship layout planning. *J. Ind. Eng.*, 18(3), 195-200.
- [28] Kothari, R., & Ghosh, D. (2013). Tabu search for the single row facility layout problem using exhaustive 2-opt and insertion neighborhoods. *European Journal of Operational Research*, 224(1), 93-100.

- [29] Samarghandi, H., & Eshghi, K. (2010). An efficient tabu algorithm for the single row facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 205(1), 98-105.
- [30] Wei Guo, Pingyu Jiang, Maolin Yang. (2022) Unequal area facility layout problem-solving : a real case study on an air-conditioner production shop floor. *International Journal of Production Research* pages 1 - 18.
- [31] Meskar, M., & Eshghi, K. (2020). An Algorithm for Solving Generalized Single Row Facility Layout Problem. *American Journal of Operations Research*, 10(06), 299.
- [32] Chraibi, A., Osman, I. H., & Kharraja, S. (2019). Adaptive layout for operating theatre in hospitals : different mathematical models for optimal layouts. *Annals of operations research*, 272(1), 493-527.
- [33] Hammad, A. W. A., Akbarnezhad, A., & Rey, D. (2016). A multi-objective mixed integer nonlinear programming model for construction site layout planning to minimise noise pollution and transport costs. *Automation in construction*, 61, 73-85.
- [34] Li, J. Z., & Y. Tan. 2018. "The Bare Bones Fireworks Algorithm : A Minimalist Global Optimizer." *Applied Soft Computing* 62 : 454–462.
- [35] Suresh, G., & Sahu, S. (1993). Multiobjective facility layout using simulated annealing. *International Journal of Production Economics*, 32(2), 239-254.
- [36] Liu, S., Zhang, Z., Guan, C., Zhu, L., Zhang, M., & Guo, P. (2021). An improved fireworks algorithm for the constrained single-row facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 59(8), 2309-2327.
- [37] Kulkarni, M. H., Bhatwadekar, S. G., & Thakur, H. M. (2015). A literature review of facility planning and plant layouts.
- [38] Gary, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-completeness*.
- [39] Koopmans, T. C., & Beckmann, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica : journal of the Econometric Society*, 53-76.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Azadivar, F., & Wang, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4369-4383.

- [43] 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.
- [44] Das, S. K. (1993). A facility layout method for flexible manufacturing systems. *The International Journal of Production Research*, 31(2), 279-297.
- [45] Lacksonen, T. A. (1997). Preprocessing for static and dynamic facility layout problems. *International Journal of Production Research*, 35(4), 1095-1106.
- [46] 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.
- [47] Seehof, F. (1967). Automated Layout Design Problems. *Journal of IE.*, 18(12).
- [48] 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
- [49] 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.
- [50] Khalil, T. M. (1973). Facilities relative allocation technique (FRAT). *International Journal of Production Research*, 11(2), 183-194.
- [51] Drezner, Z. (1987). A heuristic procedure for the layout of a large number of facilities. *Management Science*, 33(7), 907-915.
- [52] 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.
- [53] Balakrishnan, J., & Cheng, C. H. (2000). Genetic search and the dynamic layout problem. *Computers & Operations Research*, 27(6), 587-593.
- [54] Marinchek, D. A. (2014). *Manufacturing Facility Layout : A Methodology Incorporating Rotated Aisles into Layout Design* (Doctoral dissertation, Ohio University).
- [55] Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Fakhrazad, M. B. (2018). Classification of facility layout problems : a review study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1), 957-977.
- [56] 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.
- [57] 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.

- [58] Chwif L, Barretto MRP, Moscato LA (1998) A solution to the facility layout problem using simulated annealing. *Comput Ind*36(1-2) :125-132
- [59] 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.
- [60] Tompkins, J.A., J.A. White, Y.A. Bozer, E.H. Frazelle, J.M. Tanchoco and J. Trevino (1996). *Facilities Planning*. Wiley, New York.
- [61] Anjos, M. F., & Vannelli, A. (2008). Computing globally optimal solutions for single-row layout problems using semidefinite programming and cutting planes. *INFORMS Journal on Computing*, 20(4), 611-617.
- [62] Hungerländer, P., & Rendl, F. (2013). A computational study and survey of methods for the single-row facility layout problem. *Computational Optimization and Applications*, 55(1), 1-20.
- [63] Hungerlaender, P. (2014). Single-row equidistant facility layout as a special case of single-row facility layout. *International Journal of Production Research*, 52(5), 1257-1268.
- [64] Guan, J., & Lin, G. (2016). Hybridizing variable neighborhood search with ant colony optimization for solving the single row facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 899-909.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.