

République Algérienne Démocratique et Populaire
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Faculté des Mathématiques

DEPARTEMENT DE RECHERCHE OPERATIONNELLE

THESE DE MAGISTER

EN RECHERCHE OPERATIONNELLE

OPTION: MATHEMATIQUES DE GESTION

Présentée par: SI AHMED DHAOUIA

Thème

AGENCEMENT STATIQUE ET DYNAMIQUE
MULTICRITERE

Soutenue le : 23 / 05 / 2002

devant le jury :

A. BERRACHEDI

Maître conférence

Président.

M. ABBAS

Professeur

Directeur de thèse

M. AÏDER

Maître conférence

Examinateur

I. BOUCHEMAKH

Maître conférence

Examinatrice

S. MAAMRA

Chargé de cours

Examinateur

Année 2002

A ma chère famille

A mon tendre futur époux ;

A mes précieuses amies ;

A la mémoire de mon adorable cousine Bahia, qui a péri dans les eaux de Frais Vallon;

A tous ceux qui ont œuvré pour que ce jour arrive enfin.

SOMMAIRE

Introduction générale	7
Chapitre 1: Présentation du Problème d'Agencement Multicritère et Etat de l'Art	9
1.1 Généralités sur les systèmes de production.	9
1.2 Quelques définitions de base.	11
1.3 Représentation des ressources et de la cellule.	14
1.3.1 Caractéristiques de la cellule et des ressources.	14
1.3.2 Caractéristiques inter-ressources.	15
1.4 Position du problème d'agencement multicritère.	17
1.5 Complexité du problème d'agencement.	17
1.6 Etat de l'art.	19
1.6.1 Etat de l'art du problème d'agencement statique monocritère.	19
1.6.2 Etat de l'art du problème d'agencement statique multicritère.	22
1.6.3 Etat de l'art du problème d'agencement dynamique.	24
1.7 Conclusion	24
Chapitre 2: Formulation Mathématique du Problème d'Agencement Multicritère	26
2.1 Introduction	26
2.2 Critères du problème d'agencement	26
2.2.1 Qualité	27
2.2.2 Coûts de fabrication	27
2.2.3 Délais de fabrication	27
2.2.4 Relation de proximité	28
2.2.5 Critères qualitatifs	28
2.3 Formulation mathématique	29
2.3.1 Contraintes d'agencement	30
2.3.2 Coût d'agencement	31
2.4 Conclusion	36

Chapitre 3: Quelques Approches de Résolution	37
3.1 Introduction	37
3.2 Processus global de résolution	37
3.3 Méthode de hiérarchie multicritère	39
3.3.1 Description de l'AHP	39
3.3.2 Organigramme de l'AHP	40
3.4 Mesures de proximité	41
3.4.1 Etat de l'art	41
3.4.2 La relation de proximité et l'AHP	41
3.5 Poids des critères d'agencement	44
3.5.1 Modélisation du problème en hiérarchie	44
3.5.2 Synthèse des priorités	45
3.6 Résolution du problème d'agencement multicritère	45
3.6.1 Introduction	45
3.6.2 Mise en œuvre du Recuit simulé multicritère (RSM)	45
3.6.3 Mise en œuvre d'un algorithme génétique multicritère (AGM)	53
3.7 Comparaison des performances d'un algorithme	62
3.7.1 Performance on-line	63
3.7.2 Performance off-line	63
3.7.3 Performance de la meilleure solution	63
3.8 Conclusion	64
 Chapitre 4: Applications et Résultats	 65
4.1 Introduction	65
4.2 Mesures de proximité	65
4.3 Poids des critères d'Agencement	68
4.4 Application du RSM et analyse	69
4.4.1 Ascension de collines pour choisir les valeurs des paramètres	69
4.4.2 Test de Fisher	72
4.4.3 Analyse de sensibilité	74
4.4.4 Instances de Nugent	78
4.5 Application de l'AGM et analyse	81

4.5.1 Ascension de collines pour choisir les valeurs des paramètres	81
4.5.2 Analyse de sensibilité	84
4.6 Comparaison des performances du RSM et de l'AGM	88
4.6.1 Constatations	88
4.7 Conclusion	89
Chapitre 5: Introduction à l'agencement dynamique multicritère	90
5.1 Introduction	90
5.2 Modes d'agencement des systèmes dynamiques	90
5.2.1 Agencement robuste	90
5.2.2 Agencement dynamique	91
5.3 Position du problème	91
5.4 Formulation mathématique	92
5.4.1 Contraintes d'agencement	92
5.4.2 Coût agrégé de la séquence d'agencement	92
5.4.3 Coût non agrégé de la séquence d'agencement	93
5.5 Méthode de résolution	94
5.5.1 Choix des valeurs des paramètres de contrôle du RSDM	95
5.6 Conclusion	95
Conclusion générale	96
 Bibliographie	
 Annexes	

INTRODUCTION GENERALE

Depuis quelques années, les entreprises industrielles assistent à des changements importants et irréversibles de leurs conditions d'existence. Ces changements se traduisent par : l'intensification de la compétition économique internationale, la prolifération des produits et l'apparition de nouvelles technologies modifiant les relations entre producteurs et consommateurs. Pour résister à ces mutations et tenter de maîtriser leur évolution, les entreprises doivent élaborer et mettre en œuvre une stratégie qui privilégierait la politique de réponse aux besoins du marché, la politique de production et l'organisation du travail productif et administratif [66]. Une telle stratégie permettrait à l'entreprise de :

- ❑ Produire largement pour satisfaire un grand nombre de consommateurs et modérément pour éviter des pertes d'argent à l'entreprise,
- ❑ Améliorer la productivité et la qualité des produits à offrir au public,
- ❑ Innover constamment en lançant de nouveaux produits,
- ❑ Réaliser des gains importants, et
- ❑ Assurer sa pérennité,

La réalisation de cette stratégie ne peut se faire sans une bonne identification des compromis critiques existants entre la qualité, la quantité, la conception et le coût de production. La prise de décision sur ces compromis est d'une importance capitale car elle peut déterminer l'éventuel succès ou échec de l'entreprise [52].

Nous consacrons notre travail à l'étude d'une partie de cette stratégie qui est l'organisation du travail productif.

Dans une entreprise manufacturière, les ressources et les produits sont deux éléments qui jouent un rôle prépondérant dans l'organisation de la production. Les ressources peuvent être des machines, des postes de travail, des cellules de fabrication, des magasins d'outils, des départements, des entrepôts,...etc. En effet, une organisation du travail productif consiste à prendre des décisions sur les types de produits à fabriquer, l'affectation des produits aux ressources, la disposition des ressources dans l'atelier,...etc.

Une des premières décisions importantes à prendre concerne la disposition des ressources dans l'atelier. L'optimisation de ce problème est considéré comme le premier maillon de la chaîne de production qui permettrait de :

1. Diminuer le coût de fonctionnement du système de fabrication.
2. Offrir les meilleures conditions de travail aux ouvriers et de fabrication des produits.
3. S'intéresser aux autres problèmes de la production à savoir l'ordonnancement des produits sur les ressources, les cheminements des moyens de transports dans l'atelier,...etc.

Ce problème est connu dans la littérature sous le nom de problème d'agencement des ressources sur une surface (en anglais : Facility Layout Problem).

Dans beaucoup d'ouvrages, il a été étudié sous un aspect statique monocritère. Cependant, la réalité des ateliers flexibles dévoile une confrontation de plusieurs critères conflictuels. C'est sur ce problème que nous orientons notre recherche : nous cernerons d'abord les critères qui reviennent le plus souvent lors d'un agencement, ensuite, nous tenterons d'apporter une réponse au problème statique sous son aspect multicritère. Nous généralisons, à la fin, notre étude au cas dynamique multicritère.

Dans cette voie, la thèse est répartie en 5 chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons le problème d'agencement multicritère sous ses différents aspects et nous dressons un état de l'art des travaux faits à ce jour. Nous abordons, dans le deuxième chapitre, les critères d'agencement qualitatifs et quantitatifs, suivie d'une formulation mathématique du problème statique qui tient compte des contraintes d'affectation et des spécificités des critères (pondération, non pondération, agrégation et non agrégation). Cette formulation est bien adaptée pour les méthodes que nous proposons pour son éventuelle résolution.

Dans le troisième chapitre, nous décrivons trois techniques d'aide à la décision : "Analytical Hierarchy Process", le Recuit Simulé et un Algorithme Génétique, appliquées au problème d'agencement statique multicritère. Ces méthodes sont réputées pour leurs bonnes performances dans la résolution de beaucoup de problèmes pratiques.

Le quatrième chapitre est dédié aux applications et à l'analyse des comportements des trois méthodes citées ci-dessus face à des instances construites par nous mêmes et à des "benchmarks".

Dans le chapitre 5, nous introduisons le problème d'agencement dynamique multicritère. Et nous proposons d'appliquer le Recuit simulé pour obtenir de bonnes solutions.

Nous achevons ce travail par tracer quelques axes de recherche vers lesquels s'orienteront probablement de futurs travaux de recherche.

CHAPITRE 1 :

PRESENTATION DU PROBLEME D'AGENCEMENT MULTICRITERE & ETAT DE L'ART

1.1 GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE PRODUCTION

Le système de production est un système qui met en jeu de manière interactive, durant une certaine période, des conditions de production, des instruments de travail et de la matière première en vue de faire évoluer celle-ci vers un état d'achèvement.

Lors de la fabrication d'un produit, la matière première utilisée, pour cet effet, subit des opérations de transformation, d'assemblage et de contrôle de qualité. Ces opérations ajoutent de la valeur au produit fini et cumulent des coûts opérationnels qui engendrent le coût de la fabrication du produit.

La matière première subit également d'autres opérations telles que la manipulation sur les ressources, la manutention entre les ressources et le stockage. Ces opérations n'ajoutent aucune valeur de fabrication au produit mais font augmenter le coût de production.

Les systèmes de production dépendent de la nature des produits à réaliser et de leur processus de fabrication. Ils se partagent en deux groupes :

1. **Les systèmes continus :** Dans ces systèmes, un produit unique est réalisé de façon continue. Cette condition favorise l'automatisation. Ces systèmes sont caractérisés par des investissements importants et un personnel réduit dont les missions sont essentiellement la conduite et l'entretien des installations. Leur flexibilité est quasi nulle mais leur

productivité est très élevée. Les raffineries de pétrole, les cimenteries, les centrales électriques sont des exemples de systèmes de production continue [66].

2. **Les systèmes discrets :** Dans ces systèmes, les produits sont des quantités finies et discrètes. On peut les trouver, par exemple, dans le domaine des biens des équipements industriels tels que les pièces mécaniques [66]. C'est à ce type de systèmes que nous consacrons notre étude.

Les technologies de production utilisées jusqu'aux années 80 étaient soit rigides et très productives, soit flexibles et peu productives. Les systèmes de production les plus utilisés étaient de deux types : système d'agencement orienté produit et le système d'agencement orienté opérations. Dans le premier système, les machines sont rassemblées en plusieurs groupements de machines fabriquant chacun totalement un ou plusieurs types de produits et dans le second système, les machines sont rassemblées selon le type d'opération qu'elles réalisent. Cependant vu les inconvénients des deux systèmes détaillés dans [62], les chercheurs ont tenté d'exploiter leurs avantages, rapidité pour le premier et flexibilité pour le second, afin de développer un nouveau type de système de production à savoir les systèmes cellulaires de fabrication. Ce type de système est particulièrement dédié aux job-shop qui fabriquent des produits ayant des gammes de fabrication courtes et non linéaires (i.e. la fabrication de quantités d'importance moyenne relatives à une grande variété de types de produits de gammes différenciées). Les produits peuvent être groupés en familles de gammes utilisant les mêmes ressources (cf. figure 1).

L'automatisation du système, sa capacité à fabriquer des types de produits différents et son adaptation aux changements dans la production ont permis de répondre rapidement à la demande du marché en améliorant la productivité, la rentabilité, la qualité et les conditions de travail.

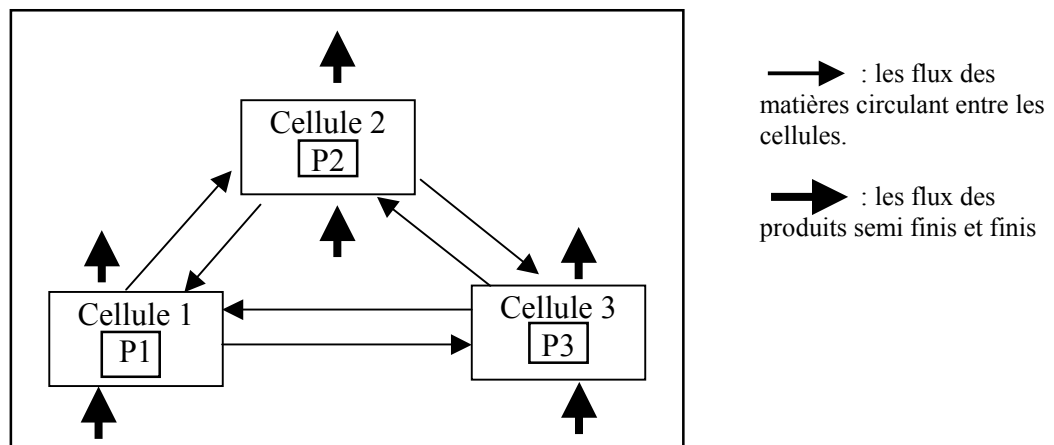


Figure 1: Les Système cellulaire de fabrication.

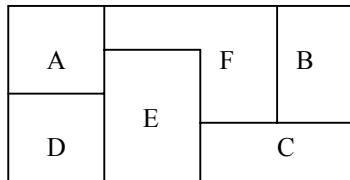
1.2 QUELQUES DEFINITIONS DE BASE

Nous donnons quelques définitions de base nécessaires pour la compréhension de ce travail.

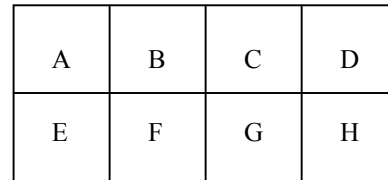
▪ **Agencement:** Disposition des ressources sur une surface donnée.

Quatre types d'agencements ont été cités dans la littérature [51], [44], [5] et [62], à savoir :

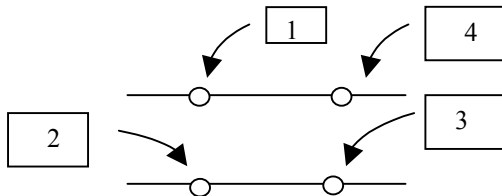
1. Agencement par partage de la surface (cf. figures 2.a et 2.b).
2. Agencement par affectation à des sites fixes (cf. figure 2.c).
3. Agencement par affectation à des sites flottants (cf. figure 2.d).
4. Agencement par affectation à des zones libres (cf. figure 2.e).



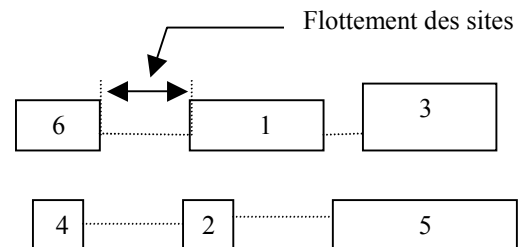
a. Agencement par partage de la surface avec des ressources de tailles différentes.



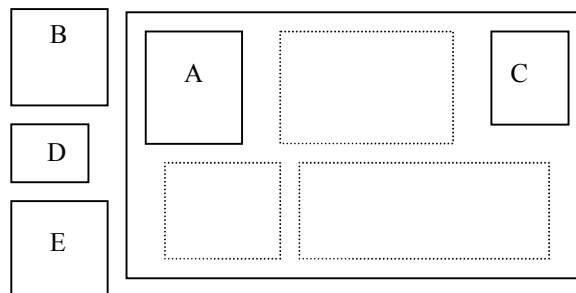
b. Agencement par partage de la surface avec des ressources de tailles égales.



c. Agencement par affectation à des sites fixes



d. Agencement par affectation à des sites flottants.



e. Agencement par affectation à des zones libres.

Figure 2 : Les différents types d'agencement.

- **Cellule:** l'ensemble des ressources groupées et destinées à réaliser aussi complètement que possible une famille de types de produits nécessitant les mêmes ressources.
- **Configuration de base d'un atelier (ou d'une cellule):** la manière dont sont disposés les sites auxquels seront affectées les ressources. Le choix de cette configuration de base dépend des moyens de manutention de l'usine et des produits à réaliser. Les modèles de base les plus connus sont (cf. figure 3):
 1. Configuration ligne simple.
 2. Configuration ligne double.
 3. Configuration circulaire.
 4. Configuration multiligne.
 5. Configuration en U ou en L.
 6. Configuration libre.

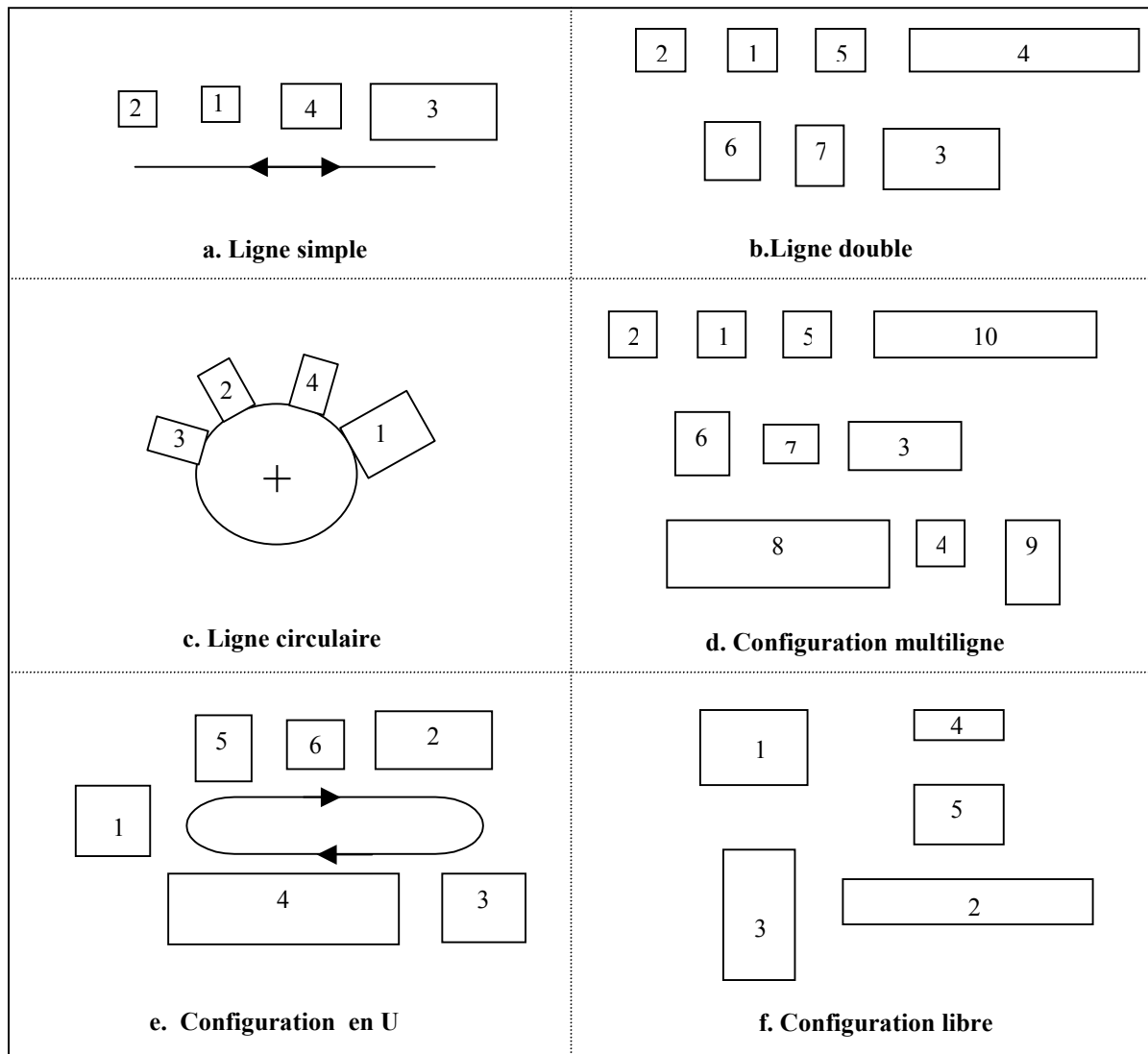


Figure 3 : les différentes configurations de base des ateliers.

- **Moyen de manutention** : c'est un moyen de déplacement à faible et moyenne portée des produits semi-finis et finis entre les ressources. Parmi les moyens de manutention les plus utilisés, citons : le pont roulant, le véhicule autoguidé, le convoyeur et le robot manipulateur (cf. figure 4).
- **Flux entre deux ressources** : c'est la quantité de produits qui passent entre deux ressources par unité de temps. Il dépend principalement des routages des différents produits et de la taille du lot transporté.
- **Gamme de fabrication** : c'est une suite ordonnée et temporisée des opérations que subit un produit durant sa fabrication.
- **Routage** : c'est une suite ordonnée des ressources sur lesquelles doit passer un produit lors de sa fabrication.
- **Scénario de demande** : c'est l'ensemble des couples (type de produits, demandes) à fabriquer.
- **Système de fabrication** : c'est un sous ensemble du système de production. Il est caractérisé par les différents outils et ressources qui interviennent directement dans la fabrication d'un produit donné.
- **Horizon de planification** : c'est la période de temps durant laquelle se fait la production. Elle se mesure en jours, en mois, en trimestres ou en années.

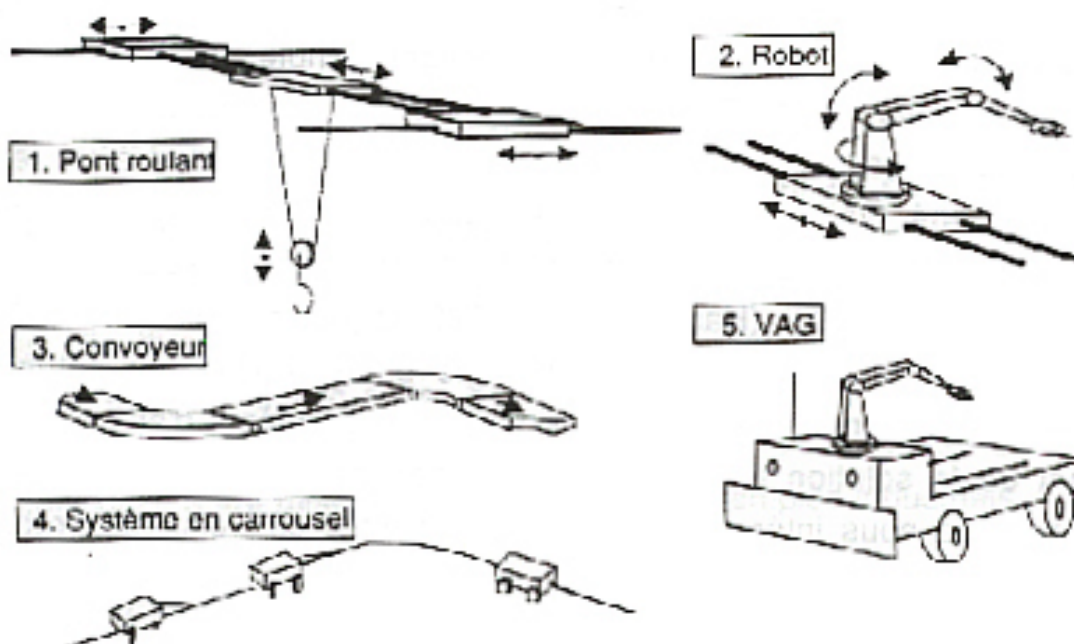


Figure 4 : Les différents types de moyens de manutention

1.3 REPRESENTATION DES RESSOURCES ET DE LA CELLULE

1.3.1 Caractéristiques de la cellule et des ressources

Dans notre étude, nous considérons le modèle géométrique par affectation à des sites flottants avec une configuration multiligne. Cette dernière, généralisant la plupart des configurations, se pose fréquemment dans le domaine industriel où la configuration de la cellule se concrétise par les lignes de production.

La cellule de fabrication et les ressources sont de forme géométrique rectangulaire et de dimensions connues. Dans le cas où elles ont des formes quelconques, elles sont représentées par les plus petits rectangles pouvant les contenir (cf. figure 5).

Elles possèdent des entrées /sorties pour la réception de la matière et pour l'évacuation des produits finis ou semi-finis.

Pour repérer les entrées/sorties d'une ressource, deux repères orthonormés (o,a,b) et (o',a',b') sont respectivement associés à la cellule et à la ressource (cf. figure 6).

Les ressources peuvent contenir des aires de stockage de la matière en attente d'être traitée ou d'être évacuée (cf. figure 5).

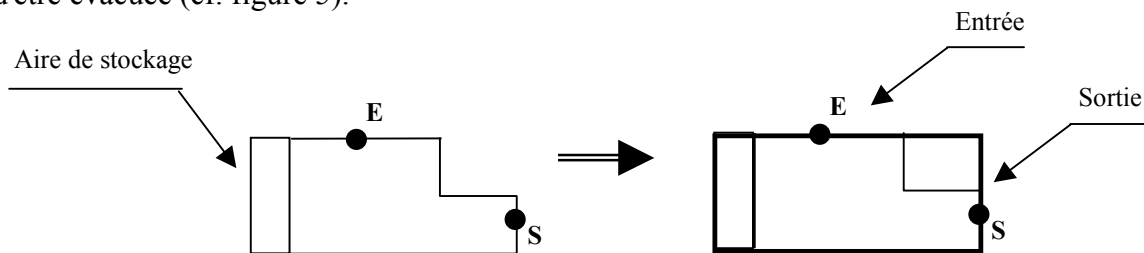


Figure 5 : Représentation des ressources

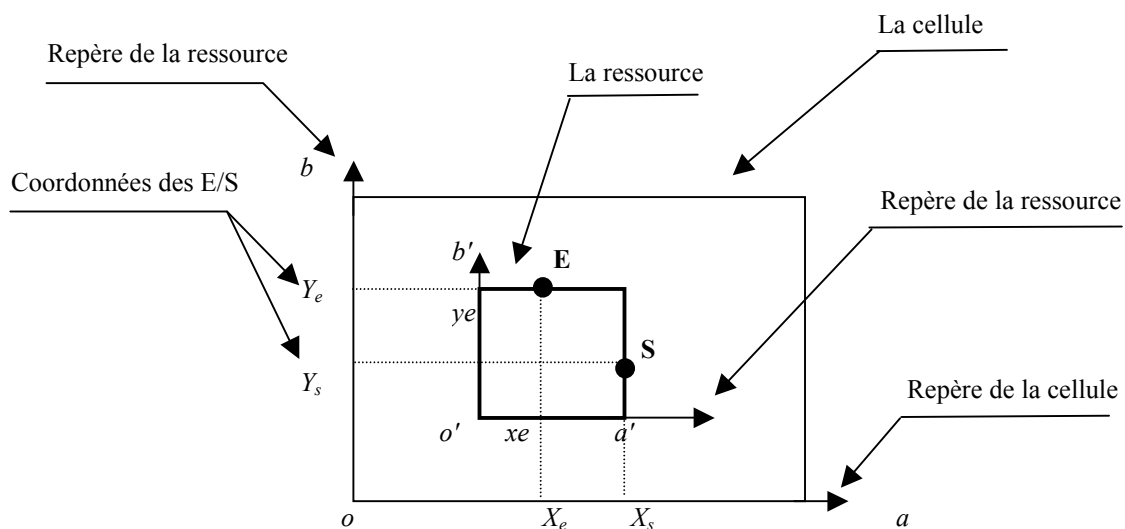


Figure 6 : Les repères relatifs à la cellule et à la ressource.

Chaque ressource dispose généralement de quatre orientations possibles lors de son affectation. Ces orientations sont obtenues en déplaçant la ressource dans le sens des aiguilles d'une montre d'un angle égal à $\frac{\pi}{2}$ (cf. figure 7).

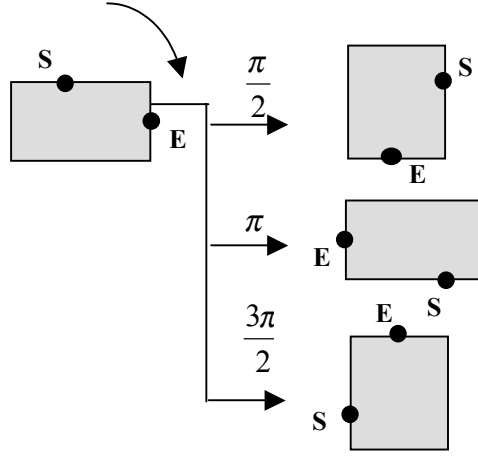


Figure 7 : Les différentes orientations possibles d'une ressource

1.3.2 Caractéristiques inter-ressources

Pour chaque couple de ressources (i, j) , nous définissons :

- Le coût de manutention par unité de distance, noté c_{ij} .
- Le temps de fabrication par unité de distance, noté t_{ij} .
- Le degré d'adjacence, noté r_{ij} .
- Le flux de matières partant de la ressource i vers la ressource j , noté f_{ij} et calculé par :

$$f_{ij} = \sum_{k \in E_{ij}} r_k \times \frac{V_{ij}^k}{U_{ij}^k}$$

où :

- r_k : est le ratio de production des produits de la famille k .
- V_{ij}^k : est le nombre de fois où la ressource i suit la ressource j dans le routage du produit k .
- U_{ij}^k : est la taille du lot des produits de la famille k transporté entre les ressources i et j .
- E_{ij} : est l'ensemble des familles de produits qui circulent entre les ressources i et j .

- La distance séparant la sortie de la ressource i de l'entrée de la ressource j , notée d_{ij} . Cette distance peut être calculée, selon le type des moyens de manutention, de plusieurs manières, parmi lesquelles nous citons les plus utilisées:

- a. Distance de Manhattan :** c'est la somme des distances respectivement parallèles aux axes horizontal et vertical (cf. figure 8). Sa formule de calcul est :

$$d_{ij} = |Xe_j - Xs_i| + |Ye_j - Ys_i|$$

où : (Xe_i, Ye_i) : les coordonnées de l'entrée de la ressource i dans le repère (o, a, b) .

(Xs_i, Ys_i) : les coordonnées de la sortie de la ressource i dans le repère (o, a, b) .

Cette formule est utilisée lorsque le type du moyen de manutention est le pont roulant qui se déplace successivement sur les axes horizontal et vertical.

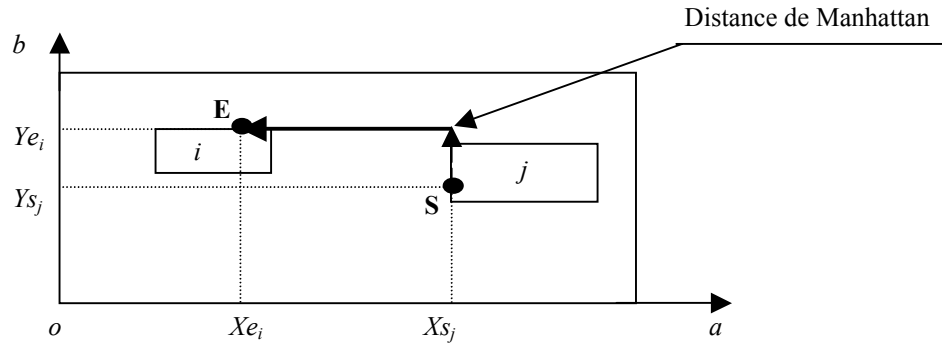


Figure 8 : Distance de Manhattan.

- b. Distance euclidienne:** c'est la longueur du segment de droite qui sépare la sortie de la ressource i et l'entrée de la ressource j (cf. figure 9). Elle se calcule comme suit :

$$d_{ij} = \sqrt{(Xe_j - Xs_i)^2 + (Ye_j - Ys_i)^2}$$

Cette formule est utilisée lorsque le type du moyen de manutention est le pont roulant qui se déplace simultanément sur les axes horizontal et vertical.

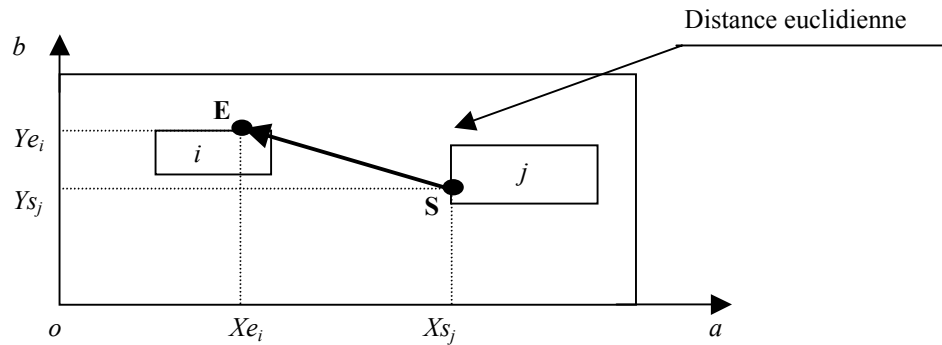


Figure 9 : Distance euclidienne.

1.4 POSITION DU PROBLEME D'AGENCEMENT MULTICRITERE

Le problème d'agencement statique multicritère se pose comme suit :

Etant données :

- Une surface S de dimensions connues à configuration multiligne et sites flottants.
- m ressources de tailles quelconques.
- P familles de produits à réaliser sur une période donnée.
- Un ensemble de critères qualitatifs et quantitatifs $C=\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$.

Il s'agit, dans ce problème:

1. de choisir une famille cohérente de critères F à partir de C .
2. d'évaluer les critères d'agencement qualitatifs
3. d'évaluer l'importance des critères quantifiés
4. de trouver une disposition des ressources sur les lignes de la surface S qui soit un compromis pour les critères de F , et qui respecte les contraintes suivantes :
 - non chevauchement des ressources entre elles (cf. figure10).
 - non débordement des ressources sur les limites de la cellule (cf. figure 11).

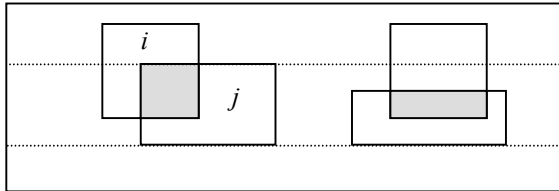


Figure 10 : Chevauchements des ressources

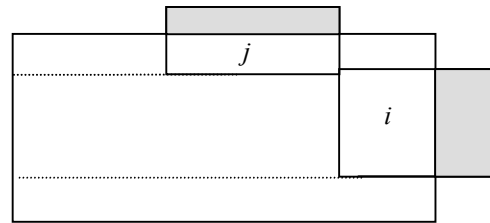


Figure 11 : Débordement des ressources sur les limites de la cellule.

1.5 COMPLEXITE DU PROBLEME D'AGENCEMENT

Le problème d'agencement des ressources sur des sites fixes a été modélisé sous forme d'un problème d'affectation quadratique. Sahni et Gonzalez [60] ont démontré en 1976 que ce dernier appartient à la classe des problèmes NP-Complet, donc difficile à résoudre. Ils ont démontré que le problème de voyageurs de commerce (PVC) est NP-Complet. Puisque le PVC est un cas particulier du problème d'affectation quadratique, alors ce dernier est NP-Complet.

Dans un problème d'affectation quadratique, le nombre de possibilités d'affectation des ressources aux sites est $m !$ (m étant le nombre de ressources). Faisons une petite illustration :

Soient m : le nombre de ressources (qui est aussi le nombre de sites),

p : le nombre de possibilités d'affectation ($p = m!$)

t : le temps de réalisation d'une affectation.

Supposons qu'une affectation exige un temps futile pour son exécution, soit 10^{-9} secondes.

Les temps attendus pour résoudre des instances d'agencement de dimension 3 à 21 sont illustrés dans le tableau ci dessous.

m	p	t
3	6	$6 \cdot 10^{-9}$ sec.
6	720	$7,20 \cdot 10^{-7}$ sec.
10	3628800	0,0036 sec.
11	39916800	0,039 sec.
12	479001600	0,47 sec.
15	1307674368000	21,8 min.
20	2432902008176640000	77 ans
21	51090942171709440000	1620 années

Tableau 1: Illustration de la complexité du problème.

Le tableau 1 est plus qu'éloquent sur la difficulté de parcourir toutes les possibilités et d'en choisir la meilleure en un temps raisonnable.

Puisque le problème d'agencement des ressources sur des sites flottants est une généralisation du problème d'agencement sur des sites fixes, alors la difficulté de résolution s'élargit vu l'augmentation du nombre de solutions. En effet, la perturbation d'un agencement par le déplacement d'une ressource d'un pas génère une nouvelle solution.

Le plongement de ce problème dans un espace de critères de dimension d'au moins égale à deux ne fait qu'accentuer sa difficulté. De plus, la prise en compte de la manière avec laquelle m ressources seront affectées multiplie la complexité par une fonction puissance (r^m), r étant le nombre d'orientations de ces ressources.

L'axe de notre recherche est orienté sur le problème d'agencement sous plusieurs critères avec quatre possibilités d'orientations pour les ressources.

1.6. ETAT DE L'ART

Le problème d'agencement des ressources est un problème général qui s'est toujours posé et continue de se poser de plus en plus dans différents domaines, tels que l'industrie manufacturière, la micro-électronique, l'urbanisme, l'informatique, l'architecture, l'économie, l'audiovisuel,...etc. Ce sont d'ailleurs des besoins concrets qui ont incité les chercheurs à s'intéresser à ce problème.

L'agencement dans les systèmes de production a fait l'objet de plusieurs études. La littérature témoigne de l'abondance des travaux réalisés pour résoudre ce problème. En effet, pas moins de 100 articles ont été publiés entre 1986 et 1996, traitant le problème avec ses différentes variantes telles que : la conception des cellules dans l'atelier, l'agencement inter-cellulaires, l'agencement intra-cellulaire,...etc. La majorité de ces travaux s'est attelée à traiter le problème sous un aspect monocritère quantitatif ou qualitatif [61] et [43].

L'approche quantitative consiste en la minimisation des coûts (ou temps) de production, quant à l'approche qualitative, elle consiste en la maximisation des rapprochements entre les ressources en tenant compte des facteurs tels que : la sécurité, la flexibilité et le bruit.

1.6.1 Etat de l'art du problème statique monocritère

Sous son aspect monocritère, le problème d'agencement a été modélisé sous forme d'un problème d'affectation quadratique, de recouvrement quadratique, de théorie de graphes, d'intelligence artificielle, de logique floue, d'un programme linéaire en nombres entiers et d'un programme mixte en nombres entiers. Parcourons brièvement ces modèles.

a. Modèle d'affectation quadratique:

Koopmans et Beckman [4], en 1957, furent les premiers à introduire ce modèle pour formuler le problème d'implantation de diverses unités de production à des emplacements différents

fixes. Ce modèle a trouvé par la suite de larges applications, entre autres, dans le planning urbain et la conception des circuits en micro-électronique [43].

Plusieurs méthodes exactes ont été proposées pour résoudre ce modèle dont certaines se basent sur le principe de séparation et évaluation [27], [38], [44], [30], [40], [31] et [3], et d'autres se basent sur le principe de coupe "cutting plane" [38].

En 1985, Roucairol et Lavalley [27] ont suggéré la parallélisation des méthodes exactes par séparation et évaluation.

Hahn a repris dans son article [27], toutes les performances des méthodes par séparation et évaluation, proposées à ce jour pour résoudre le problème d'affectation à des sites fixes, appliquées à des benchmarks.

Cependant, malgré ces efforts, les méthodes exactes présentent des inconvénients. En effet, elles exigent des capacités mémoires importantes et des temps de traitement longs (ils augmentent avec le nombre d'objets à installer) à cause de la NP-Complétude du problème. Chose qui a incité les chercheurs à introduire des heuristiques qui fournissent rapidement de "bonnes solutions" en des temps acceptables. Ces heuristiques se classent en trois catégories :

- **Méthodes par construction:** Elles installent les ressources l'une après l'autre, en utilisant des règles de priorité. Parmi les logiciels utilisant cette technique, citons : HC66 [45], ALDEP, CORELAP, FATE et FLAT [38].
- **Méthodes par amélioration:** Elles commencent avec un agencement initial, donné aléatoirement ou par une technique spécifique, qui est amélioré au fil des itérations. Parmi ces méthodes connues, nous citons : CRAFT [4], HC63, FRAT, COFAD [38]. Citons également les travaux de [7], [68], [51], [44] et [58].
Pour l'agencement par partage de la surface, des algorithmes génétiques ont été proposés [65] et [36].
- **Méthodes hybrides:** Elles sont un mélange des deux précédentes méthodes. Citons les travaux de [44], [26], [67]. Ces méthodes ont même fait l'objet d'une parallélisation [10].

b. Modèle de recouvrement quadratique

Dans cette formulation, la surface à occuper par les ressources est divisée en blocs. L'inconvénient de ceci est que la taille du problème augmente lorsque les blocks sont de petite taille [38].

c. Programmation linéaire en nombres entiers

Lawler [43] fût le premier à modéliser le problème d'agencement sous cette forme, en 1963. Il a démontré aussi l'équivalence de ce programme au programme d'affectation quadratique. Citons également les travaux de Love et Wong [38].

d. Programmation linéaire mixte en nombres entiers

En 1978, Kaufman et Broeckx [38] ont développé ce modèle qui contient le plus petit nombre de variables et contraintes par rapport aux autres modèles mathématiques. Citons les travaux de Bazaraa et Sherali en 1980 [43], Montreuil en 1990 [42] et de Rajasekharan [51].

Deux articles de base, existant dans la littérature, retracent en détail les différentes formulations et méthodes de résolution. Le premier article, qui est de Kusiak et Heragu [38], se consacre à l'état de l'art du problème d'agencement sous ces différentes géométries du début des années 60 à la fin des années 80 et le deuxième article, qui est de Russel et Kai-Yin Gau [43], retrace l'itinéraire jusqu'à l'année 96.

e. Modèle par la théorie des graphes

Cette approche s'est intéressée à la résolution de l'approche qualitative, i.e. maximiser les rapprochements entre les ressources. Elle suppose que les mesures de proximité sont connues entre chaque paire de ressources. Les dimensions de celles-ci et de la surface devant les recevoir sont négligées au départ. Chaque ressource est représentée par un sommet dans le graphe et chaque paire de ressources ayant une mesure de proximité non nulle est représentée par une arête pondérée (la valeur de la mesure). L'objectif consiste à construire un graphe de proximité de poids maximum. Cette approche procède en trois étapes :

1. Construction d'un graphe de proximité à partir des relations de proximité existantes entre les ressources.
2. Construction du graphe dual du graphe de proximité.
3. Conversion du graphe dual en un agencement en blocs (en spécifiant les formes des ressources et de la surface de l'atelier).

Cependant pour faciliter la construction du graphe dual, il est nécessaire de limiter le nombre d'arêtes incidentes à chaque sommet, ce qui est en général un problème difficile. Ceci a engendré l'utilisation d'heuristiques pour la construction d'un graphe de proximité de poids maximum [43].

Le concept de graphes planaires a également été utilisé pour modéliser les proximités entre les ressources [17].

Les approches les plus connues sont: l'approche deltahedron de Foulds et Robinson [43] et l'approche de couplage de Montreuil, Ratliff et Goetschalckx [38].

f. Technique par l'intelligence artificielle

Les systèmes experts sont de simples systèmes cherchant à imiter le comportement et le raisonnement d'un expert humain face à un problème donné. Ils s'appuient sur une base de données, une base de connaissance et un moteur d'inférence. Cette technique a été utilisée dans l'agencement intra-cellulaire pour choisir les moyens de manutention et la configuration de base adéquats, citons dans ce cas, les travaux de Hamman [5] et Bennasroune et Mecheri [8].

g. Technique par la logique floue

Evans, Wilhelm et Karwowski [15] ont proposé une heuristique linguistique pour l'emplacement des services au sein d'une installation. Elle utilise des descripteurs imprécis pour deux catégories d'étude distinctes: proximité et importance, exprimées sous forme de rapports flous pour chaque paire de services.

Concernant la résolution du problème d'agencement des ressources dans un atelier de production à sites flottants et en tenant compte des données réelles du problème, citons les travaux de Hamman et d'Aït Zaï [5] utilisant le Recuit simulé. Quant à l'agencement sur une surface, nous relevons le travail de Souilah [62] qui a également proposé le Recuit simulé pour agencer les ressources sur cette surface contenant des obstacles et a décrit les différentes étapes de la conception d'un atelier flexible de production.

1.6.2 Etat de l'art du problème statique multicritère

Certains auteurs ont introduit le problème d'agencement des ressources multicritère où les deux approches quantitative et qualitative ont été traitées. Rosenblatt [50], Dutta et Sahu [13],

Fortenberry et Cox en 1985 et Urban [69] ont proposé un modèle d'affectation quadratique modifié dont la fonction objectif réunissait les deux critères conflictuels pondérés à savoir: la minimisation des coûts de manutention et la maximisation de la mesure de proximités entre les ressources. Cette mesure de proximités et les poids étaient donnés par le décideur.

Rosenblatt [50] a développé une heuristique qui donne un ensemble d'agencements efficaces à partir duquel une solution compromis est trouvée par spécification des différents poids ou gammes de poids des critères. Dutta et Sahu [13] ont proposé à leur tour une heuristique qui consistait à adopter un agencement initial et à l'améliorer étape par étape à l'aide d'une procédure d'échange des ressources par paires. Quant à Urban [69], il a appliqué le programme CRAFT 4.2 révisé pour résoudre le problème.

Shang [61] a proposé le modèle d'affectation quadratique qui agrège les deux critères, coûts de manutention et relation de proximité, et dans lequel il met l'accent sur les flux et les mesures de proximités. Ces dernières sont calculées à partir d'autres critères en utilisant la technique de l'AHP. Et enfin, il utilise l'heuristique du Recuit simulé pour trouver un bon agencement. Cependant, son étude néglige les temps de fabrication important dans le respect des délais de livraison que nous avons considéré dans cette étude.

Malakooti et D'souza [41] ont proposé un modèle d'affectation quadratique à plusieurs fonctions objectifs. Ils ont considéré dans leur étude trois critères à savoir : les coûts de manutention, les temps de déplacement et la flexibilité. L'heuristique mise au point est fondée sur l'échange par paire des ressources. Cette étude confond la flexibilité avec la relation de proximité ce qui est insuffisant.

D'autres approches ont été utilisées pour modéliser le problème d'agencement multicritère, tels que les systèmes experts par Malakooti et Tsurushima en 1989 et Heragu et Kusiak en 1990 [43].

Enfin, nous constatons qu'aucun travail n'a été cité sur le cas d'agencement multicritère à sites flottants, contrairement au cas à un seul critère. De plus, le critère temps de fabrication n'a été cité que dans l'étude de Malakooti et D'Souza [40], alors qu'il est important pour le respect des délais de livraisons dans l'industrie. Ces raisons nous ont incité à explorer le problème d'agencement multicritère à sites flottants, considérant les coûts de fabrication, les temps de fabrication et la relation de proximité.

1.6.3 Etat de l'art du problème dynamique

En 1986, Rosenblatt a développé le premier modèle mathématique pour résoudre le problème dynamique d'affectation quadratique multipériodique, avec des scénarios de demande déterministes. Il a résolu ce problème en générant un ensemble d'agencements pour chaque période, et à l'aide de la programmation dynamique, il trouve la séquence des agencements qui minimise la somme totale des coûts de fonctionnement et des coûts de réagencement.

Batta en 1987 a proposé un théorème stipulant que le problème d'agencement dynamique pouvait être résolu comme un problème statique où la matrice des flux entre les ressources est une combinaison linéaire des différentes matrices de flux des scénarios probables. En 1994, Souilah [62] a proposé d'utiliser le Recuit simulé pour résoudre le problème dynamique dans les deux cas: déterministe et aléatoire des scénarios de demande.

En 1998, Aït Zaï [5] a appliqué le recuit simulé et la recherche taboue pour résoudre ce problème sous les aspects déterministe et aléatoire. Ce dernier cas a été étudié en considérant les probabilités d'apparition des scénarios de demande, les probabilités de transition entre les différents scénarios et l'aspect aléatoire de la demande.

Pour l'agencement dynamique multicritère, aucun travail n'a été recensé dans la littérature. Pour cela, nous nous sommes également intéressés à l'étude de cet aspect.

1.7 CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur les systèmes flexibles de production et présenté le problème d'agencement statique multicritère avec ses contraintes, ses critères et sa complexité. Nous avons également survolé de près les différents et nombreux travaux réalisés dans ce domaine sous les aspects statique et dynamique, monocritère et multicritère. Il ressort de l'état de l'art une grande concurrence pour trouver une méthode qui résout n'importe quelle instance du problème statique et dynamique à un seul critère ou une heuristique qui atteint des solutions quasi optimale. Cet engouement est dû aux nombreuses applications du problème d'agencement dans la vie et aussi à sa résistance à toutes les méthodes proposées jusqu'à ce jour.

L'agencement statique multicritère a fait aussi l'objet d'intérêts de recherches, mais uniquement dans le cas de sites fixes. Alors qu'aucun travail n'a été recensé dans le domaine de l'agencement statique et dynamique multicritère à sites flottants. Ce que nous allons développer dans cette thèse.

Dans le prochain chapitre, nous proposons une formulation du problème statique multicritère, basée sur une étude de choix des critères et bien adaptée aux méthodes de résolution proposées dans les prochains chapitres.

CHAPITRE 2 :

FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME D'AGENCEMENT MULTICRITÈRE

2.1 INTRODUCTION

Dans une cellule flexible de fabrication, plusieurs critères peuvent être considérés pour évaluer un agencement donné. Ces critères se répartissent en deux aspects: quantitatif et qualitatif. La modélisation de l'aspect qualitatif doit maximiser les souhaits du manager tout en se rapprochant de la réalité des ateliers de production. Cependant, elle est confrontée à la difficulté de réunir tous les facteurs intrants et de les évaluer. Ce chapitre recense les critères d'agencement les plus importants et propose une modélisation qui prend en compte les critères qualitatifs. Ensuite, une formulation mathématique du problème est donnée. Elle étudie toutes les possibilités d'évaluation multicritère: agrégation des critères pondérés et des critères non pondérés, principe de préférence sur des critères pondérés et sur des critères non pondérés.

2.2 CRITERES D'AGENCEMENT

Les critères se scindent, lors de leur exposé, en deux aspects:

- Aspect quantitatif : il est représenté par les critères quantifiables, tels que les coûts et les temps de fabrication.
- Aspect qualitatif : il est représenté par les critères non quantifiables tels que la qualité, la sécurité, la flexibilité, l'impact du bruit, les rapprochements et les éloignements des ressources.

Une famille cohérente de critères, notée F , est un ensemble de k critères $g_1, g_2, g_3, \dots, g_k$, qui représentent aussi complètement que possible toutes les facettes du problème sans redondance

[70]. Pour évaluer un agencement par rapport à une famille cohérente de critères, il faut que ces critères soient quantifiables, ce qui manque en général aux critères qualitatifs. Dans la suite, nous décrivons quelques critères importants lors d'un agencement.

2.2.1 La qualité

Elle est traduite par les gammes des produits dont le choix a fait l'objet d'études au préalable, que nous ne reprenons pas ici. Ces gammes de production nous ont permis de calculer les flux de matières entre les ressources. Ces flux rentrent dans le calcul des trois autres variables comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre.

2.2.2 Coûts de fabrication

De récentes études ont montré que plus de 40% des coûts de fabrication sont consommés par la manutention de la matière entre les ressources [34].

Ces coûts de déplacements sont quantifiés par la fonction objectif C_1 suivante à minimiser:

$$C_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} \times f_{ij} \times d_{s(i)s(j)} + \sum_{i=1}^m c'_i \quad (1)$$

avec : m : le nombre de ressources.

c'_i : le coût d'installation ou d'affectation de la ressource i sur le sol de l'atelier.

c_{ij} : le coût de déplacement entre les ressources i et j par unité de distance.

f_{ij} : le flux de matières entre les ressources i et j .

$s(i)$: l'emplacement de la ressource i dans l'atelier.

$d_{s(i)s(j)}$: la distance séparant l'emplacement de la ressource i de l'emplacement de la ressource j .

2.2.3 Délais de fabrication

Afin de respecter les délais de livraison, la production de P types de produits doit se faire dans un environnement favorisant la rapidité d'exécution des opérations de fabrication. Vu que le temps de traitement sur chaque ressource est connu et que les routages sont connus, il ne reste plus qu'à placer les ressources aussi proches que possible entre elles, tout en respectant les contraintes d'éloignement et de rapprochement, afin de minimiser le temps total de déplacement des matières entre les ressources.

La quantification du délai de fabrication se résume par la fonction objectif C_2 à minimiser:

$$C2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m t_{ij} \times f_{ij} \times ds(i)s(j) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p t'_{ij} \quad (2)$$

t'_{ij} : le temps de traitement du produit j sur la ressource i .

t_{ij} : le temps de déplacement entre les ressources i et j par unité de distance.

2.2.4 Relation de proximité:

Ce critère exprime les souhaits du décideur à rapprocher ou à éloigner les ressources lors de l'agencement. Il est modélisé sous forme d'une fonction quadratique C_3 à maximiser :

$$C3 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m r_{ij} \times f_{ij} \times ds(i)s(j) \quad (3)$$

Cette fonction dépend des paramètres r_{ij} qui sont les mesures de proximité entre chaque paire de ressources $\{i,j\}$. Plus cette mesure est grande, plus il est important de placer la ressource i à côté de la ressource j .

2.2.5 Autres critères qualitatifs

La réalité des ateliers de production révèle l'existence d'autres critères à caractère qualitatif, tels que:

a. la sécurité: Le placement de deux machines doit répondre à un maximum de sécurité industrielle pour permettre d'effectuer aisément les travaux de maintenance sur elles et prévenir des incidents comme le dégagement de chaleur de certaines machines lors du processus de fabrication, nuisible à d'autres machines et aux ouvriers. Ce critère est important car sa négligence peut engendrer des pertes humaines et matérielles.

b. Le rapprochement technique: Par leur conception industrielle, quelques ressources partagent, par exemple, le même magasin d'outillage ou de stock ou la même source d'alimentation électrique. D'où le souhait de les rapprocher lors de l'agencement.

c. Le rapprochement de production: Les gammes de fabrication imposent des séquences de ressources à rapprocher ou à éloigner en fonction des flux de matières premières circulant entre elles. Plus le flux est grand, plus il est fortement souhaité de rapprocher les ressources qui le partagent.

d. La flexibilité de l'agencement : Pour faire face à un éventuel changement dans la production dû aux fluctuations du marché, il est intéressant de vérifier l'effet de la flexibilité sur le coût de l'agencement .

e. L'impact du bruit: Certaines machines émettent des vibrations qui affectent d'autres machines nécessitant une précision dans leur travail. D'où le souhait d'éloigner ces ressources et l'intérêt d'évaluer l'impact de ce bruit.

f. L'esthétique: Le placement des ressources sur le sol de l'atelier doit renvoyer un paysage aéré et harmonieux. Ce qui est bénéfique pour les ressources et la santé des travailleurs.

A ce niveau de l'analyse, deux questions se posent :

- Comment prendre en considération les critères qualitatifs dans le problème d'agencement?
- Comment évaluer les poids des critères choisis ?

Tous les critères mentionnés ci-dessus peuvent être réunis pour former une famille cohérente de critères car ils présentent plusieurs facettes du problème d'agencement sans redondance. Cependant, les critères qualitatifs présentent l'inconvénient d'être non quantifiables. Pour cela, nous avons décidé de les intégrer dans le calcul du critère C_3 , précisément dans le calcul des r_{ij} , comme le montre la figure 12. Donc, la famille cohérente de critères du problème d'agencement statique est réduite à $F = \{C_1, C_2, C_3\}$.

2.3 FORMULATION MATHÉMATIQUE

Après avoir défini les différents critères qui mesurent le coût d'un agencement, nous abordons dans cette partie, la formulation mathématique du problème.

Soient :

N : le nombre d'agencements dans un horizon de planification donné.

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$: l'ensemble des agencements réalisables.

$F = \{C_1, C_2, C_3\}$: la famille cohérente de critères

avec : C_1 : le Coût total de fabrication.

C_2 : le temps total de fabrication.

C_3 : La relation de proximité.

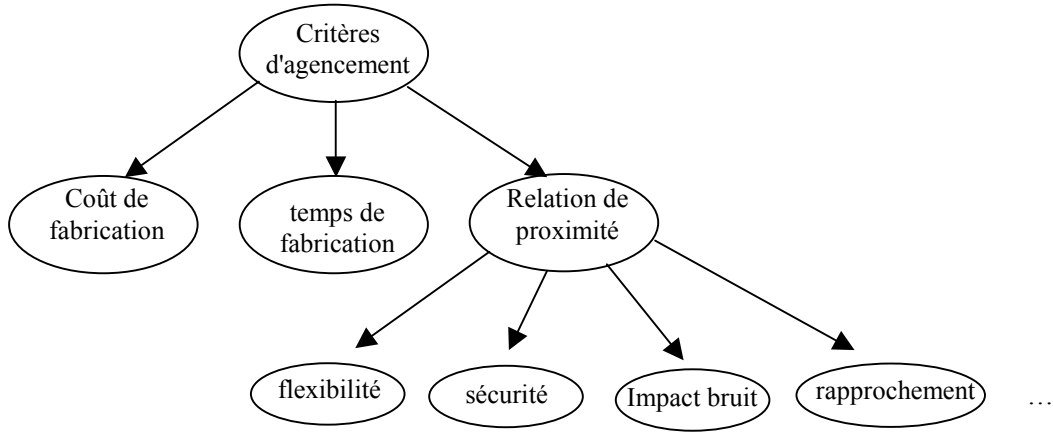


Figure 12: Les critères d'agencement

Il s'agit dans le problème d'agencement statique multicritère, de trouver, parmi les éléments de A , un agencement compromis A_k , qui satisfait le mieux la famille F (qui minimise C_1 et C_2 et maximise C_3).

2.3.1 Contraintes d'agencement

L'agencement compromis doit respecter les non chevauchements entre les ressources et les non débordements sur les limites de la cellule (cf. figures 10 et 11). Concernant cette dernière contrainte et vu que chaque ressource est affectée à droite du site désignée pour la recevoir, il n'y aurait donc pas de débordement sur les limites gauche et inférieure de la cellule.

Une formulation mathématique de ces contraintes serait:

$$d(x_i, y_i, x_j, y_j) \geq D_s, \quad i = 1 \dots m - 1 \text{ et } j = i + 1 \dots m \quad (4)$$

$$x_i + L_i + D_s \leq a, \quad i = 1 \dots m \quad (5)$$

$$y_i + l_i + D_s \leq b, \quad i = 1 \dots m \quad (6)$$

$$x_i \geq D_s, \quad y_i \geq D_s, \quad i = 1 \dots m \quad (7)$$

Où: (x_i, y_i) : les coordonnées de l'entrée/sortie de la ressource i dans le repère orthonormé associé à la cellule.

$d(x_i, y_i, x_j, y_j)$: la distance qui sépare les entrées/sorties des ressources i et j .

D_s : la distance de sécurité à respecter entre chaque paire de ressources.

(L_i, l_i) (resp. (a, b)): la longueur et la largeur de la ressource i (resp. de la cellule).

La contrainte (4) exprime le respect de la distance de sécurité entre chaque paire de ressources pour éviter les chevauchements. Et les contraintes (5) et (6) expriment le non débordement sur les limites droite et supérieure de la cellule.

2.3.2 Coût d'agencement

Le coût d'un agencement A_i peut être représenté par:

- a) une agrégation des critères pondérés de la famille F .
- b) une agrégation des critères non pondérés de la famille F .
- c) un vecteur de critères pondérés.
- d) un vecteur de critères non pondérés.

a. Agrégation des critères pondérés

Vu que les critères de la famille F ont une même forme quadratique, alors leur somme est significative et est de forme quadratique. Sa signification est la pondération des déplacements des produits dans l'agencement.

En donnant des poids α_1 , α_2 et α_3 respectivement aux critères C_1 , C_2 et C_3 , le coût agrégé de l'agencement A_k à minimiser, noté $C(A_k)$, est donné par la formule (8):

$$C(A_k) = \alpha_1 \times C_1(A_k) + \alpha_2 \times C_2(A_k) + \alpha_3 \times C_3(A_k) \quad (8)$$

Tels que :

$$C_1(A_k) = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^m c_{ij} \times f_{ij} \times d(x_i, y_i, x_j, y_j) \right) + \sum_{i=1}^m c'_i \quad (9)$$

$$C_2(A_k) = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^m t_{ij} \times f_{ij} \times d(x_i, y_i, x_j, y_j) \right) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p t'_{ij} \quad (10)$$

$$C_3(A_k) = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} \times f_{ij} \times d(x_i, y_i, x_j, y_j) \right) \quad (11)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

Le poids α_i représente l'importance du critère i .

a.1 Problème des unités et des ordres de grandeur

Cette agrégation des critères pondérés posent deux problèmes qui sont :

- **Problème des unités:** Les unités des critères de la famille F sont différentes: L'unité de C_1 est (unité monnaie x unité distance), l'unité de C_2 est (unité temps x unité distance) et l'unité de C_3 est l'unité distance. Donc, l'homogénéisation des unités s'impose.

- **Problème de grandeurs:** Les ordres de grandeur des valeurs de C_1 , C_2 et C_3 sont différents aussi. En effet, les mesures de proximité sont des valeurs comprises entre 0 et 1 (voir chapitre 3). Tandis que les coûts et les temps unitaires c_{ij} et t_{ij} , peuvent être importants. Exemple: $c_{ij}=20$ \$/m, $t_{ij}=2$ sec et $r_{ij}=0.78$.

Cette disproportion peut avantager certains critères et désavantager d'autres. Ce qui impose la réduction des c_{ij} , t_{ij} et r_{ij} à la même échelle de valeurs, afin de préserver l'impact de chaque critère sur le problème.

- **Remarque:** Pour homogénéiser les unités des critères et uniformiser leurs ordres de grandeur, nous proposons de remplacer chaque critère C_l par le critère normalisé C_l^N . Ce dernier s'exprime par l'équation suivant:

$$C_l^N = \frac{1}{S_l} \times \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^m b_{ij} \times f_{ij} \times d(x_i, y_i, x_j, y_j) \right) + \epsilon_l \quad (13)$$

$$\text{Où : } S_l = \begin{cases} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m b_{ij} & l = 1, 2. \\ l & l = 3 \end{cases}, \quad b_{ij} = \begin{cases} c_{ij} & \text{si } l = 1 \\ t_{ij} & \text{si } l = 2 \\ r_{ij} & \text{si } l = 3 \end{cases} \quad \text{et} \quad \epsilon_l = \begin{cases} \sum_{i=1}^m c'_{i1} & \text{si } l = 1 \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p t'_{ij} & \text{si } l = 2 \\ 0 & \text{si } l = 3 \end{cases}$$

a. Proposition 1

Etant donnés les programmes suivants :

$$\begin{aligned} (P_1) \quad \min_{x \in D} C(x) & \qquad (P_2) \quad \min_{x \in D} \frac{C(x)}{a} \end{aligned}$$

Si $a > 0$ alors (P_1) est équivalent à (P_2) .

Démonstration :

Soient x' et x'' les solutions optimales resp. des problèmes (P_1) et (P_2) .

1/. (P_1) et (P_2) partagent le même domaine des solutions réalisables D .

2/. x' solution optimale de (P_1) alors $\forall x \in D, C(x') \leq C(x)$ (14)

En particulier, $C(x') < C(x'')$ (15)

x'' solution optimale de (P_2) alors $\forall x \in D, \frac{C(x'')}{a} \leq \frac{C(x)}{a}$

$$\text{En particulier, } \forall a > 0, \frac{C(x'')}{a} < \frac{C(x')}{a} \quad (16)$$

$$(15) \Rightarrow C(x'') < C(x') \quad (\text{car } a > 0) \quad (17)$$

A partir de (15) et (17) nous déduisons que $C(x)'=C(x'')$. Donc les programmes (P1) et (P2) sont équivalents.

a.3 Conséquences

La normalisation des critères C_k rend homogène :

- les unités des critères C_k pour permettre leur agrégation additive.
- les intervalles de valeurs pour ne pas négliger un critère par rapport à l'autre dans le coût total de l'agencement.

Le coût agrégé d'un agencement A_k devient :

$$C(A_k) = \alpha_1 \times \frac{C_1(A_k)}{S_1} + \alpha_2 \times \frac{C_2(A_k)}{S_2} - \alpha_3 \times C_3(A_k) \quad (18)$$

La formule (18) ramène le problème d'agencement multicritère au problème d'agencement monocritère.

b. Agrégation des critères non pondérés

Dans le cas où le décideur est indifférent aux poids des critères, nous proposons de calculer le coût d'un agencement A_k , noté $C(A_k)$, par la distance euclidienne séparant le point $(C_1(A_k), C_2(A_k), C_3(A_k))$ de l'origine du repère associé à l'espace des critères de la famille F (figure 13). Le meilleur agencement est le plus proche en terme de distance euclidienne de l'origine de l'espace vu que l'objectif est de minimiser le coût d'agencement total.

L'expression de ce coût est:

$$C(A_k) = \sqrt{C_1(A_k)^2 + C_2(A_k)^2 + C_3(A_k)^2} \quad (19)$$

Remarque : Les critères à maximiser sont ramenés en critères à minimiser.

b.1 Généralisation

Nous pouvons généraliser la formule (19) à n critères $(C_1(A_k), C_2(A_k), \dots, C_n(A_k))$, en posant

$$C(A_k) = \left(\sum_{i=1}^n C_i(A_k)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Ce coût représente la distance séparant le point de coordonnées $(C_1(A), C_2(A), \dots, C_n(A))$ de l'origine de l'espace à n dimensions. Donc, le meilleur agencement est celui qui partage la plus petite distance avec l'origine de l'espace.

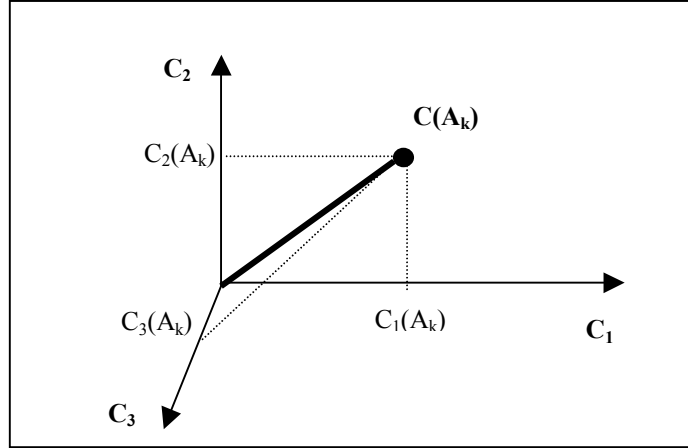


Figure 13: L'espace des critères.

c. Vecteur de critères pondérés

Pour choisir entre deux agencements, nous proposons d'utiliser un concept de choix basé sur la notion de degré de préférence.

Etant donnés deux agencements a et b , de vecteurs coûts respectifs $(C_1(a), C_2(a), \dots, C_n(a))$ et $(C_1(b), C_2(b), \dots, C_n(b))$, et un vecteur de poids des critères $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$.

Le degré de préférence $d(a, b)$ que nous proposons, pour des critères à minimiser, se base sur la différence entre les écarts de coûts réalisés par b sur a , par rapport aux critères favorisant a , et les écarts de coûts réalisés par a sur b par rapport aux critères favorisant b , autrement dit: L'agencement a est préférable à b s'il réalise un accroissement lent par rapport à l'agencement b sur tous les critères. Il est donné par la formule suivante:

$$d(a, b) = \sum_{\{i / C_i(b) - C_i(a) > 0\}} \alpha_i \times (C_i(b) - C_i(a)) - \sum_{\{j / C_j(a) - C_j(b) > 0\}} \alpha_j \times (C_j(a) - C_j(b)) \quad (21)$$

Notations :

On désigne par:

- $a P b$: a préférable à b .
- $a I b$: a indifférent à b .
- $a R b$: a incomparable à b .

c.1 Proposition 2

La relation de préférence P et la relation d'indifférence I vérifient:

$$a P b \Leftrightarrow d(a,b) > 0. \quad (\text{resp. } d(a,b) < 0 \text{ en cas de maximisation des critères})$$

$$a I b \Leftrightarrow d(a,b) = 0.$$

La paire de relations $\{P, I\}$ constitue une structure de préférence sur l'ensemble des agencements. De plus, étant donnés deux agencements a et b , une et une seule des situations suivantes est vérifiée : $a P b$, $b P a$ ou $a I b$

c.2 Propriétés

Ces relations vérifient les propriétés suivantes:

1. a (non R) b : a est toujours comparable à b .
2. $(a P b)$ et $(b P c)$ alors $(a P c)$, P est transitive.
3. $(a I b)$ et $(b I c)$ alors $(a I c)$, I est transitive.

L'incomparabilité entre les agencements ne peut pas exister car les critères utilisés sont de vrais critères. Donc, la structure de préférence associée est une structure de préordre total.

S'il existe un seuil d'indifférence constant et positif q en dessous duquel la différence entre deux agencements n'existe pas ou que le décideur ne voudrait pas se prononcer, les relations P et I vérifient le modèle à seuil, objet de la proposition suivante:

c.3 Proposition 3

La relation de préférence P et la relation d'indifférence I vérifient:

$$a P b \Leftrightarrow |d(a, b)| > q$$

$$a I b \Leftrightarrow |d(a, b)| \leq q.$$

La structure de préférence associée est une structure de quasi ordre.

d. Vecteurs de critères non pondérés.

Pour ce cas, nous proposons de reprendre la formule (21) avec un vecteur de poids unitaire $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = (1, 1, \dots, 1)$. La formule devient :

$$d'(a,b) = \sum_{\{i / C_i(b) - C_i(a) > 0\}} (C_i(b) - C_i(a)) - \sum_{\{j / C_j(a) - C_j(b) > 0\}} (C_j(a) - C_j(b)) \quad (22)$$

d.1 Proposition 4

La relation de préférence P et la relation d'indifférence I vérifient:

$$a P b \Leftrightarrow d'(a,b) > 0.$$

$$a I b \Leftrightarrow d'(a,b) = 0.$$

En cas de considération d'un seuil d'indifférence constant q en dessous duquel la différence entre deux agencements n'existe pas ou que le décideur ne voudrait pas se prononcer, le modèle proposé est le suivant:

d.2 Proposition 5

La relation de préférence P et la relation d'indifférence I vérifient:

$$a P b \Leftrightarrow |d'(a, b)| > q$$

$$a I b \Leftrightarrow |d'(a,b)| \leq q.$$

La structure de préférence associée est une structure de quasi ordre.

2.4 CONCLUSION

Nous avons entamé ce chapitre par décrire les différents critères intervenant dans le calcul du coût total d'un agencement. Une analyse a été faite sur ces critères pour dégager une famille cohérente de critères qui représente toutes les facettes du problème sans redondance. Cette première partie a été suivie d'une modélisation du problème : nous avons formulé les contraintes et les objectifs du problème d'agencement statique multicritère en vu de sa résolution. Pour l'expression des critères, quatre formes ont été étudiées: la forme agrégée pondérée et non pondérée, qui concède une perte sur un critère mais compensé par un gain sur un autre critère, et la forme vectorielle pondérée et non pondérée, qui favorise une relation d'importance relative entre les critères. Nous laissons le choix au décideur de la forme qu'il veut donner au coût d'un agencement.

Dans le prochain chapitre, nous dresserons un tableau de quelques méthodes de résolution de ce problème.

CHAPITRE 3 :

QUELQUES APPROCHES DE RESOLUTION

3.1 INTRODUCTION

Après avoir identifié le problème d'agencement multicritère et les critères d'agencement à utiliser, nous proposons dans ce chapitre quelques approches de résolution basées sur des méthodes heuristiques eu égard à la complexité du problème. Nous proposons d'abord de modéliser les facteurs qualitatifs sous forme de hiérarchies intelligentes afin d'évaluer les mesures de proximité et les poids des critères d'agencement au moyen de la méthode de hiérarchie multicritère AHP, décrite dans la section 3.3. Ensuite, nous décrivons deux heuristiques, réputées dans la littérature pour leurs bonnes performances, que nous avons mis en œuvre pour traiter le problème d'agencement statique multicritère.

3.2 PROCESSUS GLOBAL DE RESOLUTION

Les étapes de résolution du problème d'agencement multicritère sont :

1. Calcul des mesures de proximité.
2. Calcul des poids des critères éventuellement.
3. Résolution du problème d'agencement par une heuristique efficace.
4. Discussion des résultats avec le manager.

Le processus global de résolution est retracé par la figure 14.

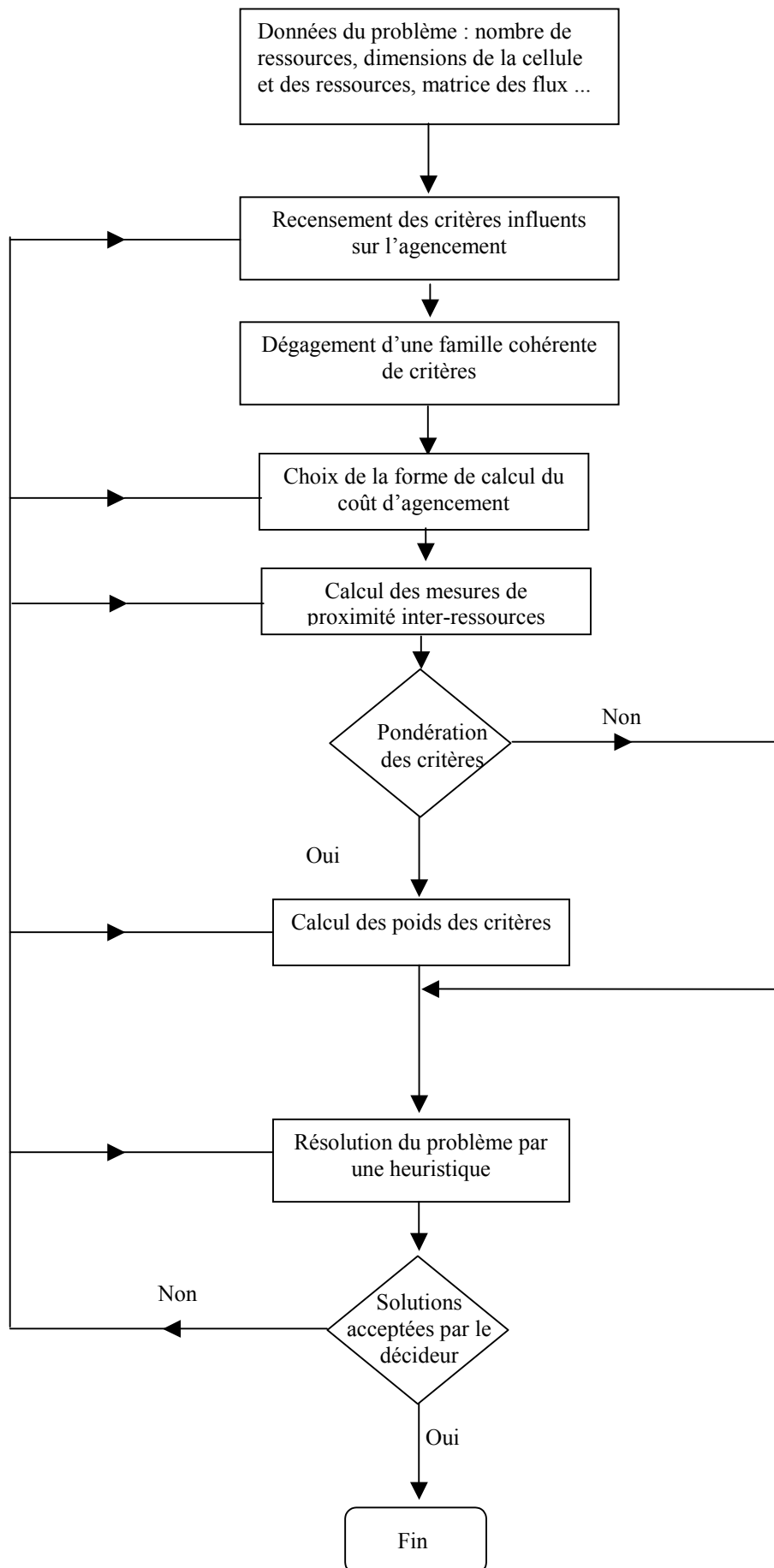


Figure 14 : Processus global de résolution du problème d'agencement multicritère

3.3 METHODE DE LA HIERARCHIE MULTICRITERE (AHP)

La méthode de la hiérarchie multicritère (AHP) se distingue des autres méthodes d'aide à la décision multicritère, par sa robustesse à résoudre des problèmes multicritères à caractère qualitatif dans un environnement complexe et par sa flexibilité aux changements dans la modélisation. Elle a d'ailleurs fait l'objet de plusieurs applications dans différents domaines avec succès [54] et [56]. Cette méthode fait intervenir le décideur par ses jugements et offre la possibilité de tester la cohérence de ses appréciations.

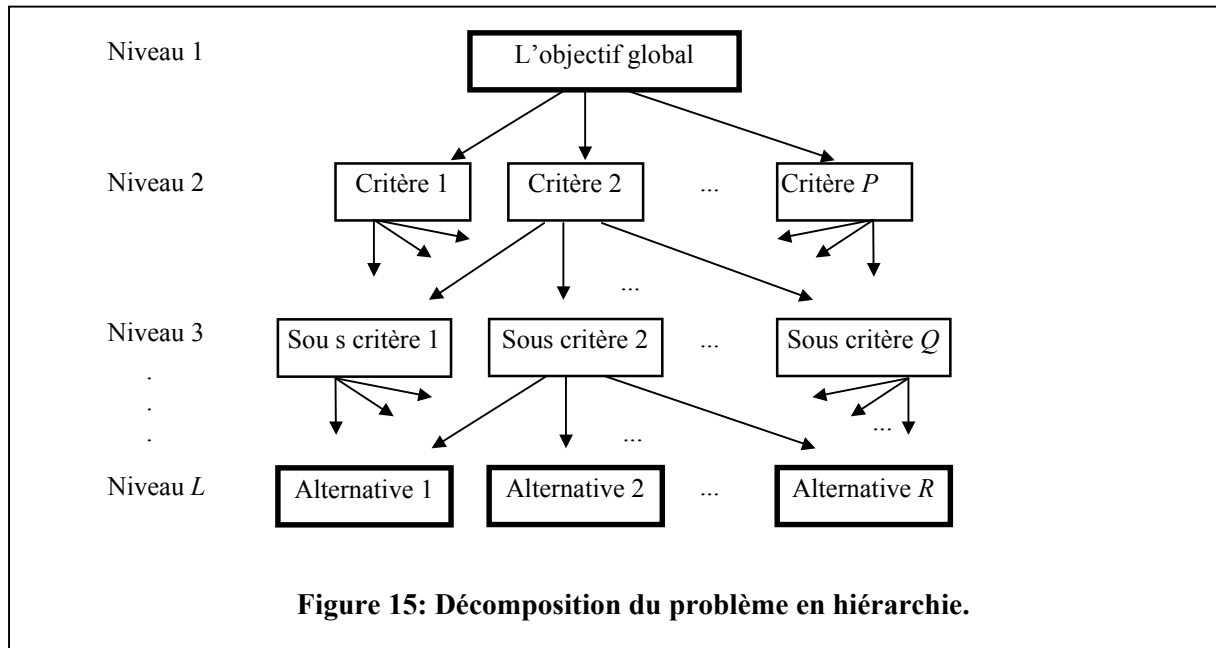
3.3.1 Description de l'AHP

L'AHP se base sur quatre axiomes : axiome de la réciprocité, axiome de l'homogénéité, axiome de la dépendance et axiome d'espérances (en anglais Expectations axiom).

Sur la base de ces quatre axiomes, elle procède comme suit:

1. Modélisation du problème en hiérarchie (cf. figure 15). Le premier niveau est l'objectif global, le deuxième niveau est l'ensemble des critères constituant l'objectif global et le dernier niveau regroupe les alternatives de décision du problème. Si le problème est plus complexe, des niveaux intermédiaires peuvent être rajoutés à la hiérarchie.
2. Collecte des jugements en comparant chaque paire d'éléments de la hiérarchie par rapport à un critère du niveau inférieur.
3. Utilisation de la méthode du vecteur propre pour calculer les priorités relatives des éléments de la hiérarchie [55] et [33].
4. Agrégation des priorités relatives des éléments pour obtenir les priorités globales et donc un classement des alternatives.

La méthode offre des outils de calcul pour mesurer le degré de cohérence de la hiérarchie et des jugements établis. En effet, lors de l'établissement des jugements et de la construction de la hiérarchie, un certain degré de cohérence est exigé pour éviter de prendre des décisions aléatoirement. Si ce degré n'est pas respecté, alors selon le cas, ou les jugements doivent être revus ou la hiérarchie doit être reconstruite en incluant de nouvelles informations.



3.3.2 Organigramme de l'AHP

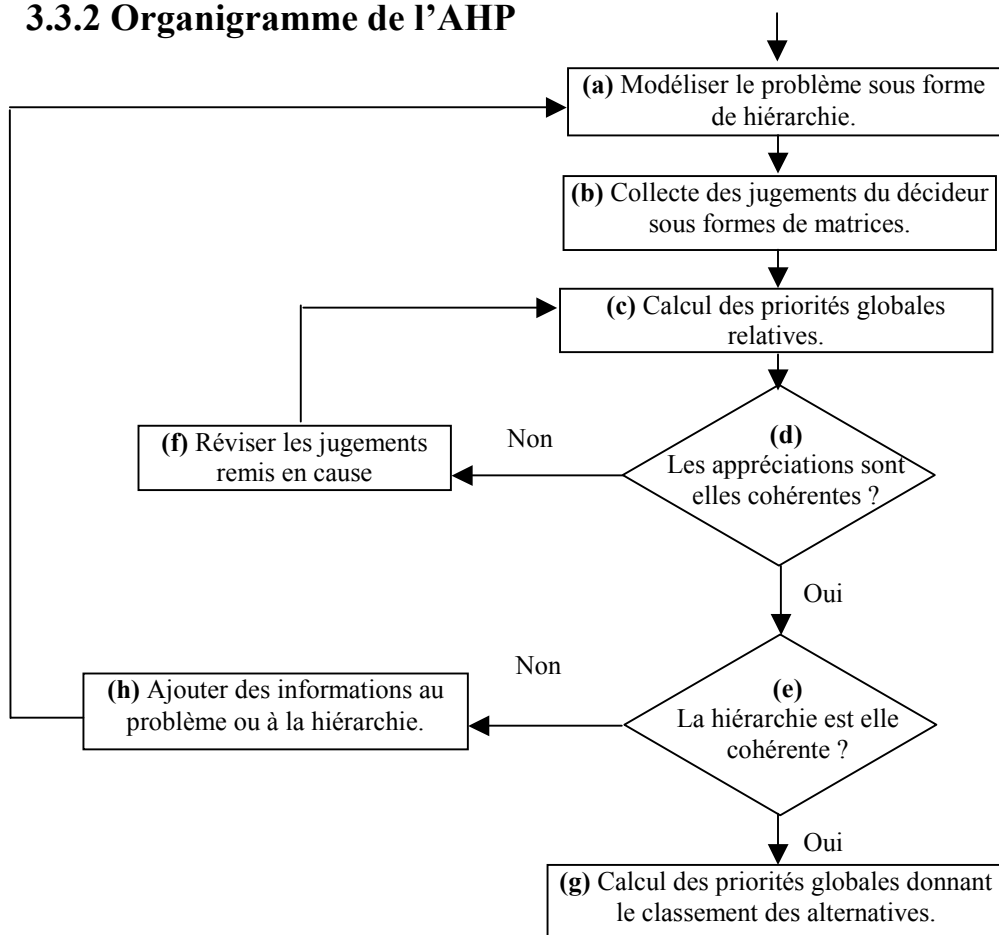


Figure 16 : La méthode de hiérarchie multicritère.

3.4 MESURES DE PROXIMITE

3.4.1 Etat de l'art

Pour évaluer les r_{ij} , les chercheurs ont proposé une table contenant 6 états de rapprochement [50] et [69] (voir tableau 2).

<i>ETAT</i>	<i>r_{ij}</i>	<i>APPRECIATION</i>
<i>A</i>	<i>6</i>	<i>Rapprochement absolument nécessaire.</i>
<i>E</i>	<i>5</i>	<i>Rapprochement très important.</i>
<i>I</i>	<i>4</i>	<i>Rapprochement important.</i>
<i>O</i>	<i>3</i>	<i>Rapprochement ordinaire.</i>
<i>U</i>	<i>2</i>	<i>Rapprochement non important.</i>
<i>X</i>	<i>1</i>	<i>Rapprochement indésirable.</i>

Tableau 2: L'échelle de rapprochement

Avec les mêmes états, d'autres auteurs ont proposé une numérotation de -1 à 5: $A=5$, $E=4$, $I=3$, $O=2$, $U=1$, $X=-1$. Cette suggestion est motivée par le fait que l'état négatif (-1) permet un meilleur éloignement des machines dont le rapprochement est indésirable [69]. Tandis que d'autres auteurs ont utilisé la table sans l'état X [41].

Cette approche n'est pas convaincante car le choix de la table n'a pas été justifié. De plus, l'échelle de valeurs ne prend pas en compte les facteurs qualitatifs du problème d'agencement telle que la flexibilité. Pour remédier à cela, Shang [61] a proposé l'utilisation de l'AHP pour calculer les mesures de proximité. Cette proposition s'avère intéressante vu qu'elle étudie le problème en profondeur et offre au décideur la possibilité d'intervenir dans la résolution, en exprimant ses jugements sur les critères. En plus des critères considérés par Shang, nous intégrons les souhaits de rapprochement inter-ressources technique et de production, qui émanent soit de la technique industrielle, soit du processus de fabrication.

3.4.2 La relation de proximité et l'AHP

L'application de l'AHP sur le problème de mesure de proximité se distingue par l'avantage d'analyser le problème en profondeur d'une manière simple et rigoureuse pour donner en sortie les mesures d'adjacence des ressources.

Etant données m machines partageant entre elles des relations techniques et de production, exprimées par les mesures de proximité r_{ij} , $i=1\dots m$, $j=1\dots m$, il s'agit de calculer ces mesures au moyen de l'AHP.

a. Modélisation du problème en hiérarchie

La construction de la hiérarchie est faite de haut vers le bas. Elle contient trois niveaux :

- Le premier niveau de la hiérarchie est l'objectif global, à savoir le calcul des mesures de proximité entre les machines.
- Le deuxième niveau de la hiérarchie est constitué des critères qualitatifs intervenant dans l'adjacence de chaque paire de ressources. La liste de ces critères n'est pas exhaustive, elle peut en contenir d'autres, selon le cas. Et l'avantage de l'AHP est qu'elle permet une flexibilité dans la construction de la hiérarchie. C'est à dire la possibilité d'ajouter et/ou de supprimer des éléments. Les critères proposés sont: la sécurité, l'impact du bruit, le rapprochement technique, le rapprochement de production, la flexibilité de l'agencement et l'esthétique.
- Le troisième niveau est constitué des alternatives représentées par les paires de ressources $\{\{M_1, M_2\}, \{M_1, M_3\}, \dots, \{M_{m-1}, M_m\}\}$. Le nombre d'alternatives est $\frac{m \times (m-1)}{2}$, m étant le nombre de ressources (figure 17).

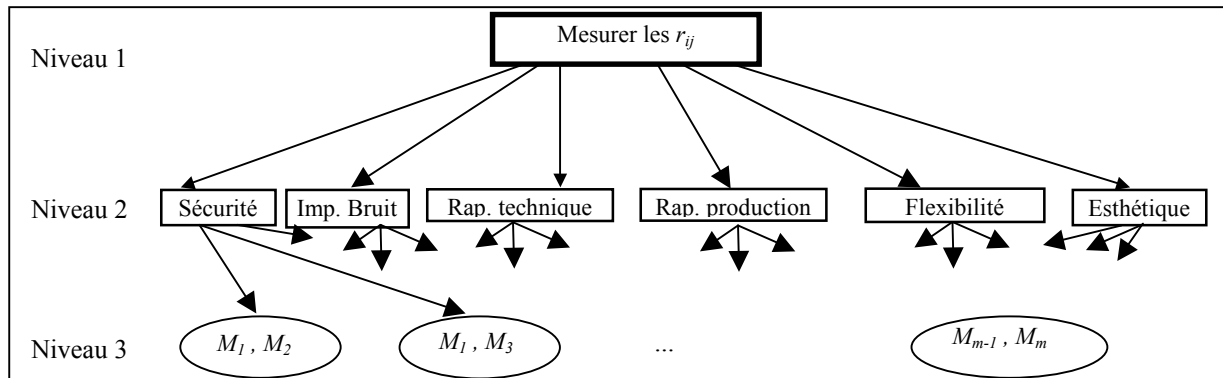


Figure 17 : La hiérarchie du problème de proximité des ressources.

Après avoir décomposé le problème en hiérarchie, les jugements du décideur sont collectés sur chaque niveau k sous forme de matrices M^k positives et réciproques où: pour $(i,j) \in m^2$, $m_{ij} = \frac{1}{m_{ji}}$.

Ces matrices de jugements sont soumises à des tests de cohérence. Si une incohérence importante est constatée, les jugements remis en cause sont corrigés.

b. Synthèse des priorités

La synthèse des priorités se fait en deux étapes:

- Calcul des priorités globales relatives des critères par rapport à l'objectif global et des alternatives par rapport à chaque critère.
- Calcul des priorités globales des alternatives qui sont les mesures de proximité entre les ressources.

Pour cela, nous avons utilisé la méthode du vecteur propre.

b.1 Les priorités globales relatives :

Etant donné :

- un niveau k de la hiérarchie, constitué d'un ensemble d'éléments E_k tel que $E_k = \{e_1, \dots, e_r\}$, pour $k=2, 3$ et $r \in \mathbb{N}$. Les éléments peuvent être des critères ou des alternatives.
- un critère j du niveau $(k-1)$ auquel sont reliés les éléments de E_k $j=1, 2, \dots$
- et la matrice des jugements M^j par rapport au critère j .

Il s'agit de calculer, pour chaque matrice M^j , le vecteur des priorités globales relatives P^j ($P^j_1, P^j_2, P^j_3, \dots, P^j_r$) telle que P^j_i est la priorité globale relative de l'élément e_i sur le critère j .

L'algorithme de calcul de P^j est le suivant:

*Pour chaque niveau k faire
début*

Pour chaque matrice M^j faire :

Début

Si M^j est consistante (i.e: $M^j_{il} \cdot M^j_{lh} = M^j_{ih}$, pour tout i, l et h) alors P^j est donné par n'importe quelle colonne normalisée de M^j (en divisant chaque élément de la colonne choisie par la somme de ces éléments).

Sinon,

- 1. Fixer le paramètre t à une grande valeur ($t \rightarrow \infty$);*
- 2. Calculer $(M^j)^{(t)}$*
- 3. Normaliser la matrice $(M^j)^{(t)}$ en divisant chaque élément par la somme des éléments de sa colonne. Soit N^j la matrice obtenue.*

- 4. La priorité globale relative d'un élément e_i est donnée par: $p^j_i = \frac{N^j_{ih}}{\sum_{i=1}^r N^j_{ih}}$*

*fin ;
fin.*

b.2 Les priorités globales :

Les priorités globales sont les mesures de l'impact de chaque élément sur le problème de décision.

Etant donnés :

- L'ensemble des alternatives $A = \{a_1, a_2, \dots, a_r\}$
- L'ensemble des critères $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$.
- les vecteurs des priorités relatives P^j des alternatives sur chaque critère j .
- le vecteur des priorités relatives R des critères C par rapport à l'objectif global.

Il s'agit de calculer, pour les alternatives de A , le vecteur G ($G_1, G_2, G_3, \dots, G_l$) par la formule suivante:

$$G_i = \sum_{j=1}^p p^j_i \times R_j \quad (23)$$

Les priorités globales fournissent un préordre total des alternatives dans le problème de décision (i.e : un classement des alternatives).

3.5 POIDS DES CRITERES D'AGENCEMENT

Dans le cas où le manager décide d'une pondération des critères d'agencement de la famille F , nous proposons dans cette partie d'utiliser l'AHP pour calculer ces poids en prenant en compte d'autres critères qualitatifs importants lors de l'agencement.

3.5.1 Modélisation du problème en hiérarchie

La hiérarchisation du problème se fait comme suit:

- a) Le niveau 1 est l'objectif global à savoir le choix d'un vecteur de poids pour les critères de F .
- b) Le niveau 2 comporte les critères auxquels sont comparés les alternatives C_1, C_2 et C_3 . Ces critères sont: la sécurité, les délais de livraison, le coût total de production, la flexibilité et l'esthétique.
 - **Le coût total de production:** la fabrication n'est pas l'unique maillon du processus de production. En effet, cette dernière comporte d'autres activités aussi importante que la fabrication tels que : le stockage, le transport (matières premières, produits et personnel), la récupération des matières, l'administration,...etc. Donc, le coût total de la production est la somme des coûts de toutes ces activités (en plus des coûts des matières et temps perdus). Il est par conséquent intéressant d'évaluer l'impact du coût, du temps de fabrication et de la relation de proximité sur le coût total de production et de calculer leurs poids en fonction de ce dernier.
- c) Le niveau 3 est constitué des alternatives à pondérer, à savoir le coût de fabrication C_1 , le temps de fabrication C_2 , et la relation de proximité C_3 (cf. figure 18).

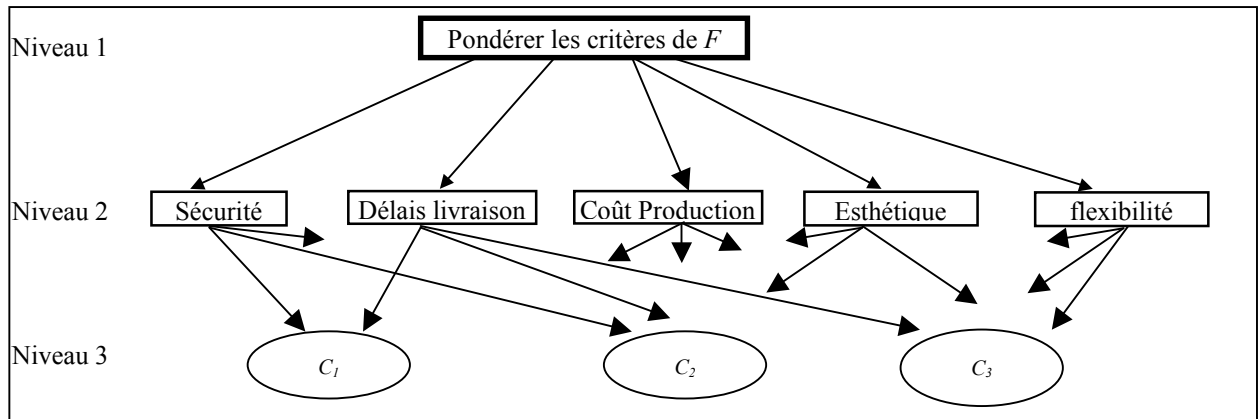


Figure 18: La hiérarchie du problème de pondération des critères d'agencement.

3.5.2 Synthèse des priorités

La synthèse des priorités se fait de la même manière que dans la section 3.4.2.b.

Les poids des critères de la famille F sont les priorités globales des alternatives obtenues en fin de processus.

3.6 RESOLUTION DU PROBLEME D'AGENCEMENT MULTICRITERE

3.6.1 Introduction

Après avoir modélisé le problème d'agencement multicritère et résolu les problèmes des mesures de proximité et de pondération des critères, nous entamons dans cette partie sa résolution.

Comme nous l'avons cité au chapitre 1, le problème d'agencement est un problème complexe par le nombre d'agencements à explorer. A ce jour, il n'existe aucune méthode exacte qui résout n'importe quelle instance, dans le cas monocritère, en temps polynomial. Ce qui a motivé l'utilisation des méthodes approchées.

Pour le cas multicritère, la complexité existe toujours avec la difficulté en plus du choix de la forme d'évaluation des agencements. L'idée d'utiliser les heuristiques pour sa résolution s'impose. Ce que nous allons développer au cours de cette partie.

3.6.2 Mise en œuvre du Recuit Simulé Multicritère (RSM)

a. Motivation

L'analogie existant entre le Recuit physique et le problème d'agencement a permis à la méthode du Recuit simulé d'atteindre de bonnes performances sur le problème d'agencement monocritère. Ce qui nous a motivé à l'adapter pour traiter le cas multicritère.

b. Principe

Le principe du processus est le réchauffement à une température élevée du métal, suivi d'un refroidissement lent par palier. L'objectif étant l'obtention d'une disposition homogène et uniforme des molécules constituant le métal [62].

La méthode mathématique s'inspire du processus thermodynamique, en démarrant d'une température élevée, qui est baissée graduellement jusqu'à l'obtention d'une température finale proche de zéro, en générant à chaque température un ensemble de solutions voisines. Si la solution générée à partir de la solution courante améliore le critère, elle est acceptée et une autre solution est générée d'elle. Sinon, elle est acceptée ou refusée avec une certaine probabilité (règle de Métropolis) calculée en fonction de la température. L'acceptation momentanée de la dégradation de la valeur du critère à optimiser n'est qu'un moyen qui permet de se dégager des optima locaux. Mais dès que, la température s'approche de zéro, aucune solution de coût désavantageux n'est tolérée. Le RSM tient compte de la forme du coût d'agencement qu'elle soit agrégée pondérée, agrégée non pondérée ou de forme vectorielle avec une préférence sur les agencements. L'algorithme de la méthode (RSM) est le suivant:

-
1. Utiliser l'AHP pour calculer les r_{ij} et éventuellement les poids des critères α_i , $i=1,2,3$.
 2. Générer un agencement initial X de coût $C(X)$.
 3. Choisir la fonction de réduction de la température.
 4. Initialiser les paramètres de contrôle du recuit: la température initiale et finale T et T_f , le nombre d'agencements à traiter par palier L_p et un compteur d'agencements N .
 5. Initialiser le meilleur agencement X^* à X de coût $C(X^*)=C(X)$.
 6. **Tant que** ($T > T_f$) faire

début

Tant que ($N \leq L_p$) faire

Début

Générer un agencement X_I voisin de X de coût $C(X_I)$;
 Evaluer selon le cas Δ_1 ou Δ_2
 Si agrégation des critères alors $\Delta_1 = C(X_I) - C(X)$
 Sinon, $\Delta_2 = d(X_I, X)$, d étant le degré de préférence de X_I sur X
 Si $((\Delta_1 < 0) \text{ ou } (\Delta_2 > 0))$ alors début $X := X_I$; $C(X) := C(X_I)$; fin
 Si $C(X_I) < C(X^*)$ ou $(d(X_I, X') > 0)$ alors début $X^* := X_I$; $C(X^*) := C(X_I)$; fin
 Sinon début

Générer un nombre aléatoire $p \in [0, 1]$;
 Si agrégation des critères alors $\Delta = -\Delta_1$
 Sinon, $\Delta = \Delta_2$
 Si $(p < \exp(\Delta/T))$ alors début $X := X_I$; $C(X) := C(X_I)$; fin

 Fin

 Finsi
 $N := N + 1$;
Fin tant que;
 T diminue;
Fin tant que
-

c. Coût agrégé d'un agencement

c.1. Critères pondérés

Le coût agrégé $C(A_k)$ d'un agencement A_k , exprimé par la formule (18), est :

$$C(A_k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left[\left(\alpha_1 \times \frac{c_{ij}}{S_1} + \alpha_2 \times \frac{t_{ij}}{S_2} - \alpha_3 \times r_{ij} \right) \times f_{ij} \times d_{ij} \right] \text{ avec : } S_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} \text{ et } S_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m t_{ij}$$

Ce coût est soumis aux contraintes de non chevauchement et de non débordement sur les limites de la cellule. Leur violation engendre une pénalisation de l'agencement. Pour exprimer cela, nous avons rajouté au critère $C(A_k)$ un terme dont l'objectif est de faire augmenter la valeur du coût à chaque fois que l'agencement obtenu est non réalisable.

Ce terme est le produit des violations et d'un facteur de pénalisation très grand fixé par l'utilisateur.

Le coût de la solution devient :

$$C(A_k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left[\left(\alpha_1 \times \frac{c_{ij}}{S_1} + \alpha_2 \times \frac{t_{ij}}{S_2} - \alpha_3 \times r_{ij} \right) \times f_{ij} \times d_{ij} + (\Delta_{ij} + \mu_i) \times \lambda \right] \quad (24)$$

où :

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} D_s - d_{ij} & \text{si } d_{ij} \leq D_s \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$\mu_i = \begin{cases} L_i + x_i - a & \text{si } L_i + x_i \geq a \\ l_i + y_i - b & \text{si } l_i + y_i \geq b \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

λ : un paramètre de très grande valeur.

c.2. Critères non pondérés

Les violations sont ajoutées au coût $C(A_k)$, donné par la formule (19), comme suit:

$$C(A_k) = \sqrt{C_1(A_k)^2 + C_2(A_k)^2 + C_3(A_k)^2 + \lambda \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (\Delta_{ij} + \mu_i)} \quad (25)$$

d. Coût non agrégé d'un agencement

Dans ce cas, nous ajoutons à chaque critère les violations engendrées par l'agencement. Ces violations sont multipliées par un facteur de pénalisation de très grande valeur, fixé par l'utilisateur.

Les composantes du vecteur coût $C(A_k) = (C_1(A_k), C_2(A_k), C_3(A_k))$ deviennent :

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left[\frac{c_{ij}}{S_1} \times f_{ij} \times d_{ij} + \lambda \times \Delta_{ij} \right] + \lambda \times \sum_{i=1}^m \mu_i \\
 C_2 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left[\frac{t_{ij}}{S_2} \times f_{ij} \times d_{ij} + \lambda \times \Delta_{ij} \right] + \lambda \times \sum_{i=1}^m \mu_i \\
 \text{et } C_3 &= - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left[r_{ij} \times f_{ij} \times d_{ij} + \lambda \times \Delta_{ij} \right] + \lambda \times \sum_{i=1}^m \mu_i
 \end{aligned} \tag{26}$$

e. Agencement initial

Le problème de la construction de l'agencement initial peut être difficile. Sa difficulté augmente lorsque la différence entre la surface libre de la cellule et la somme des surfaces des machines à placer diminue.

Pour la génération de l'agencement initial, nous proposons deux algorithmes qui se basent sur deux constructions:

1. **Construction aléatoire** : en affectant les machines choisies aléatoirement une à une aux sites libres se trouvant sur les lignes en allant de la 1^{ère} ligne, de gauche vers la droite, jusqu'à la dernière ligne (voir l'algorithme aléatoire).

Algorithme aléatoire

1. Générer aléatoirement un numéro de machine M_i ;
 2. Affecter la machine M_i au premier site se trouvant à gauche de la ligne l ;
 3. Tant que (Toutes les machines ne sont pas affectées) faire

Début

 - Générer aléatoirement une machine M_{i+1} ;
 - S'il y a une position libre à droite du site récemment occupé par la machine M_i sur la ligne courante, alors y affecter la machine M_{i+1} en respectant la distance de sécurité D_s ;
 - Sinon, affecter la machine M_{i+1} au site d'abscisse D_s se trouvant sur la ligne suivante ;
 Fin;
 Fait.
-

2. **Construction gloutonne** : En plaçant les machines de celle qui possède la plus grande intensité à celle qui en la plus faible, selon une configuration flottante (voir l'algorithme glouton et figure 19).

Algorithme glouton

Début

1. Calculer, pour chaque machine M_i , l'intensité e_i par:

$$e_i = \sum_{j=1}^m \left[\frac{(f_{ij} + f_{ji}) \times r_{ij}}{t_{ij} + c_{ij}} \right], \quad i = 1 \dots m$$

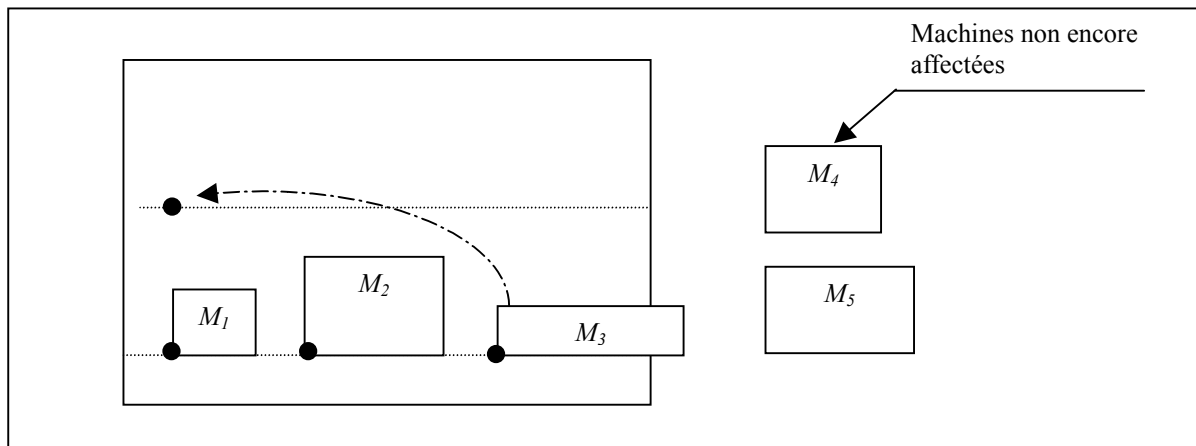
2. Trier les intensités e_i dans l'ordre décroissant. Et ré indiquer les machines selon cet ordre.
3. Placer la ressource M_1 (de plus grande intensité) au premier site se trouvant à gauche de la ligne 1;
4. Tant que (les machines ne sont pas toutes affectées) faire

Début

- S'il y a une position libre à droite du site récemment occupé par la machine M_i sur la ligne courante, alors y affecter la machine M_{i+1} en respectant la distance de sécurité D_s ;
- Sinon, affecter la machine M_{i+1} au premier site se trouvant à gauche sur la ligne suivante ;

Fin ;

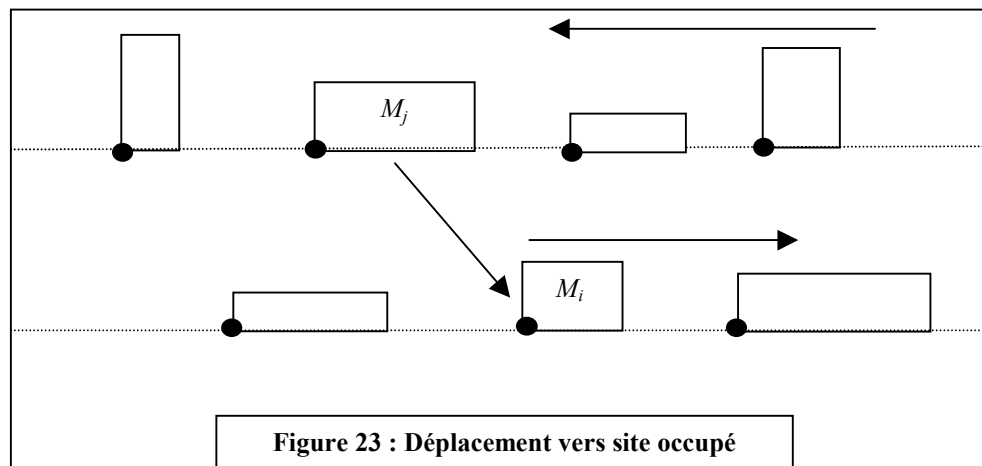
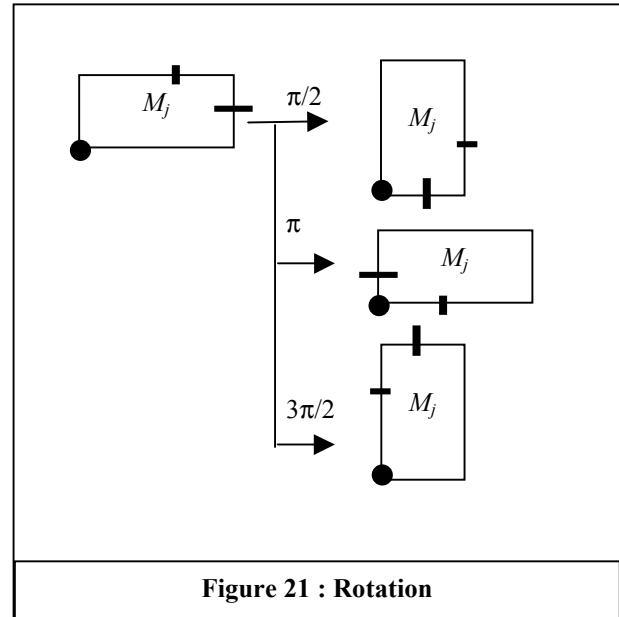
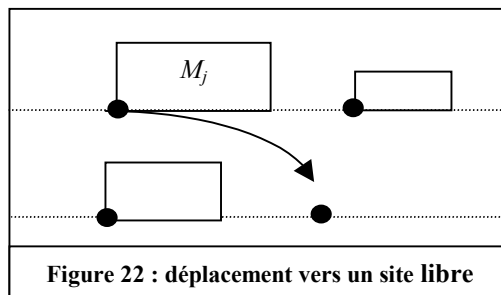
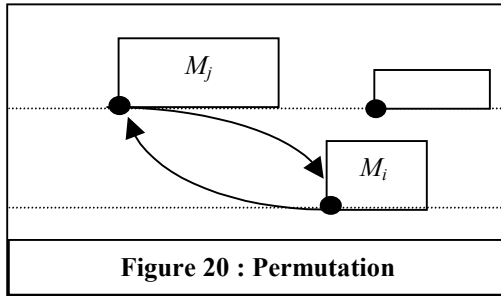
Fin ;

**Figure 19: L'affectation des ressources aux lignes****f. Transformations élémentaires**

Le passage d'un agencement courant à un agencement voisin se fait au moyen de transformations élémentaires. Nous avons utilisé, dans notre programme, les transformations suivantes :

- **Permutation** : Elle consiste à permuter deux ressources dans leurs positions, tout en gardant leurs orientations initiales (cf. figure 20).
- **Rotation** : elle consiste à changer l'orientation d'une ressources (cf. figure 21).

- **Déplacement vers un site libre :** elle consiste à déplacer une ressources vers une position libre se trouvant sur une autre ligne (cf. figure 22). La ressource est automatiquement placée après la dernière ressource affectée à cette ligne. Cette opération engendre le déplacement des ressources dont les abscisses sont supérieures à celles de la ressource perturbée.
- **Déplacement vers un site occupé:** elle consiste à changer de position à une ressource (cf. figure 23). Cette opération engendre le déplacement des ressources se trouvant sur les lignes perturbées.



g. Paramètres de contrôle du RSM

Le Recuit Simulé Multicritère (RSM) repose sur des paramètres de contrôle telles que: la température initiale et finale, la fonction de diminution de la température, la longueur du palier et

la génération des solutions voisines. La qualité des solutions obtenues dépend, en grande partie, de l'ajustage de ces paramètres. Pour cela, des exécutions de la méthode avec différentes combinaisons des paramètres sont lancées pour fixer ces derniers à leurs meilleures valeurs. Nous détaillons ci dessous ces paramètres.

g.1. La température

Plusieurs fonctions régissant la baisse de la température du Recuit Simulé ont été proposées dans la littérature. Nous avons opté pour la fonction la plus utilisée dans la littérature, qui est la fonction géométrique, $T_k = T_{k-1} \times \alpha$, où α est compris entre 0,80 et 0,95. Et la température initiale doit être élevée pour éviter les pièges des optima locaux.

g.2. La longueur de palier

Cette longueur représente le nombre de solutions à générer lorsque la température est fixée. Plusieurs fonctions ont été proposées dans la littérature pour fixer ce nombre. Certaines fonctions le fixe durant toute la résolution, telle que la fonction constante. Et d'autres le varient d'un palier de température à un autre. Nous proposons d'étudier les deux cas.

g.3. Probabilité de Boltzman

L'originalité que présente le Recuit simulé par rapport aux autres méthodes d'amélioration est l'utilisation de la probabilité de Boltzman pour l'acceptation ou le refus des solutions de mauvais coûts. En effet, la méthode concède une perte sur le coût de la solution courante sous réserve de la génération d'un voisinage susceptible de contenir de meilleures solutions. Cette probabilité p

se calcule par: $p = \exp\left(-\frac{\Delta}{T}\right)$, où: $\Delta = \begin{cases} C(X_I) - C(X) & \text{si agrégation des critères.} \\ d(X_I, X) & \text{sinon} \end{cases}$

Avec T : la température du palier courant, et $d(X_I, X)$ est le degré de surclassement de X_I sur X .

g.4. Critère d'arrêt

Le processus est arrêté dans notre application lorsque la température courante atteint un palier final fixé auparavant.

h. Choix des paramètres de contrôle du RSM

Pour choisir les valeurs des paramètres de contrôle conduisant aux meilleures solutions, nous proposons d'utiliser le principe d'Ascension de collines (en anglais "Hill Climbing") qui consiste

à démarrer avec un vecteur initial de valeurs des paramètres, ensuite, varier à chaque fois un seul paramètre sur un éventail de valeurs pour le fixer à son meilleur rendement. Et ainsi de suite, jusqu'à atteindre la meilleure combinaison de valeurs pour les paramètres.

Le nombre de paramètres du RSM à fixer est 5. Ils se résument comme suit: la procédure de génération de l'agencement initial, la température initiale, la longueur de palier, le palier de température et la température finale. Le tableau 3 donne des éventails de valeurs de chaque. Et la procédure de choix est donnée dans la page suivante.

-	Construction de l'agencement initial : $a_1, a_2, a_3, \dots, a_a$
-	Température initiale : $t_1, t_2, t_3, \dots, t_b$
-	Longueur de palier :
-	- fixe : $f_1, f_2, f_3, \dots, f_d$
-	- évolutive : $l_1, l_2, l_3, \dots, l_e$
-	Palier de température : $p_1, p_2, p_3, \dots, P_c$
-	Température finale: $e_1, e_2, e_3, \dots, e_f$

Tableau 3 : Paramètres du RSM

Procédure d'Ascension de collines pour le choix des paramètres de contrôle du RSM

1. Fixer arbitrairement des valeurs pour les paramètres de contrôle.
2. **Choix agencement initial** : Effectuer n exécutions du RSM pour chaque procédure du tableau 3. Choisir la procédure de construction qui atteint la meilleure solution générée comme procédure par défaut pour les prochaines exécutions.
3. **Choix de la température initiale** : Effectuer n exécutions du RSM pour chaque valeur de la température initiale figurant dans le tableau 3, en utilisant pour construire l'agencement de départ, la procédure de construction choisie dans l'étape 2. Choisir, pour la température initiale, la valeur qui atteint la meilleure solution. Prendre cette valeur par défaut dans les prochaines exécutions.
4. **Choix de la longueur de palier** : Faire n exécutions pour chaque valeur de chaque cas (cas fixe et cas évolutif), et choisir la valeur qui atteint la meilleure solution.
5. **Choix du palier de température** : Faire n exécutions du RSM pour chaque valeur de palier figurant dans le tableau 3, en utilisant pour les paramètres cités ci-dessus les valeurs par défaut. Choisir pour le palier de température la valeur qui réalise la meilleure performance.
6. **Choix de la température finale** : Idem que les étapes précédentes.
7. **Résultat final** : La combinaison des valeurs de paramètres de contrôle à utiliser dans les futures exécutions du RSM est constituée des valeurs obtenues dans cette procédure.

3.6.3 Mise en œuvre d'un Algorithme Génétique Multicritère (AGM)

a. Motivation

Les Algorithmes Génétiques (AG) sont des algorithmes d'exploration stochastique, fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils utilisent à la fois les principes de la survie des structures les mieux adaptées, et les échanges d'information pseudo aléatoires, pour former un algorithme d'exploration qui possède certaines des caractéristiques de l'exploration humaine [22].

Ces algorithmes diffèrent des autres algorithmes classiques en quatre axes principaux :

- Les AG utilisent un codage des solutions et non les solutions elles mêmes.
- Les AG travaillent sur une population de solutions au lieu d'une solution unique (cas du Recuit Simulé et de la Recherche Taboue).
- Les AG sont aveugles : ils n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
- Les AG utilisent des règles de transition probabilistes, et non déterministes, pour le choix des opérateurs génétiques.

Ces différences contribuent à la robustesse des AG, démontrée théoriquement et expérimentalement par Holland (1975) et Goldberg [22].

Eu égard à ces avantages, il nous a paru intéressant de proposer un AG pour explorer de grands champs de solutions pour le problème d'agencement multicritère.

b. Principe

Les AG font évoluer une population de solutions, appelées chromosomes, vers de meilleures solutions au moyen d'opérateurs génétiques (sélection, croisement et mutation). L'application de ces différents opérateurs permet de créer de nouvelles populations et d'en faire disparaître d'autres. Chaque chromosome est représenté par une chaîne de bits et est évalué selon une fonction d'évaluation appelée fonction d'adaptation.

Le principe des AG est le suivant :

Une population initiale de solutions réalisables est générée aléatoirement. L'opérateur de sélection est, ensuite, appliqué pour choisir les chromosomes les plus adaptés. Ces chromosomes vont subir des croisements et des mutations pour donner naissance à des enfants. Ces derniers vont remplacer les parents dans la population. Le processus de sélection, de croisement et de mutation est répété jusqu'à ce que le critère d'arrêt est atteint. Ce critère peut être un nombre maximum de générations, l'atteinte d'une solution satisfaisante ou l'expiration d'un temps.

L'Algorithme Génétique Multicritère (AGM) que nous proposons suit le principe général des AG, avec en plus, la considération de la forme du coût d'agencement: coût agrégé (pondéré ou non) et coût sous forme vectorielle avec surclassement des agencements.

Le déroulement de l'AGM est conforme à l'algorithme suivant:

Algorithme Génétique Multicritère AGM

Début

Générer une population initiale P_c .

Calculer la valeur d'adaptation de chaque chromosome.

Fixer le critère d'arrêt ; $Nb_gener := 1$;

Tant que (Critère d'arrêt non atteint) faire

 Début

 Sélectionner à partir de P_c les chromosomes les plus adaptés pour générer une population intermédiaire P_m ;

 Appliquer, avec une probabilité, le croisement ou la mutation sur les chromosomes de P_m pour générer la population des enfants P_e ;

 Calculer la valeur d'adaptation de chaque chromosome de P_e .

$P_c := P_e$;

 Fin ;

Fin.

Une schématisation de cet algorithme est donnée dans la figure 24.

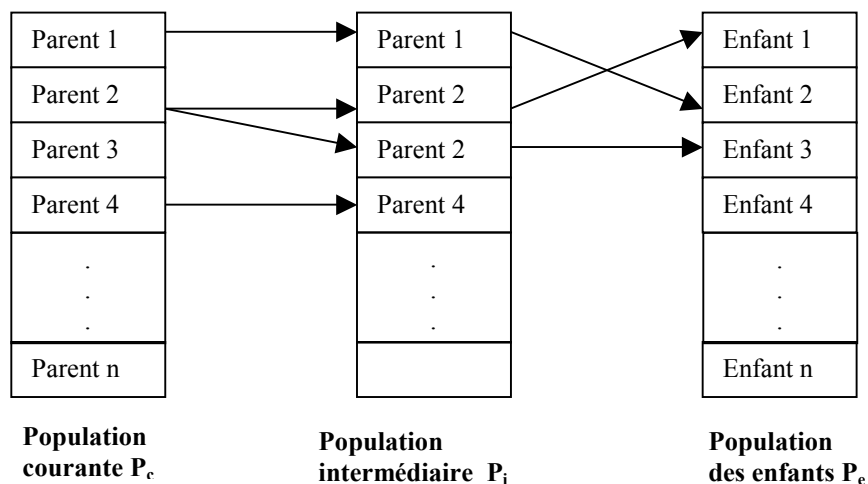


Figure 24 : Schématisation de l'algorithme génétique

c. Paramètres de l'AG

Les paramètres importants d'un algorithme génétique sont la représentation des chromosomes, les opérateurs de sélection, de croisement, de mutation et la fonction d'adaptation. Nous décrivons dans la suite, la mise en œuvre de ces paramètres dans l'AGM pour résoudre le problème d'agencement multicritère.

c.1. Représentation des chromosomes (codage)

Nous utilisons, indifféremment dans la suite, les termes chromosome, solution et agencement.

Un chromosome peut être représenté par la séquence des ressources affectées aux lignes, avec la convention que les ressources et les lignes soient numérotées (suivant l'axe des ordonnées pour les lignes) et que la lecture de la séquence sur chaque ligne se fasse de gauche vers la droite.

Exemple : Dans la figure 25, la séquence des ressources est : 4, 1, 5, 3, 2.

Pour qu'elle soit complète, cette représentation doit être enrichie par les orientations des ressources et par le nombre de ressources dans chaque ligne.

Le codage que nous avons choisi est une chaîne entière à trois segments (cf. figure 26): le premier segment représente la séquence de ressources, le deuxième segment représente leurs orientations et le troisième segment représente le nombre de ressources sur chaque ligne.

La longueur de ce codage est $2.m + nb_lign$, tels que : m est le nombre de ressources et nb_lign est le nombre de lignes de production dans la cellule.

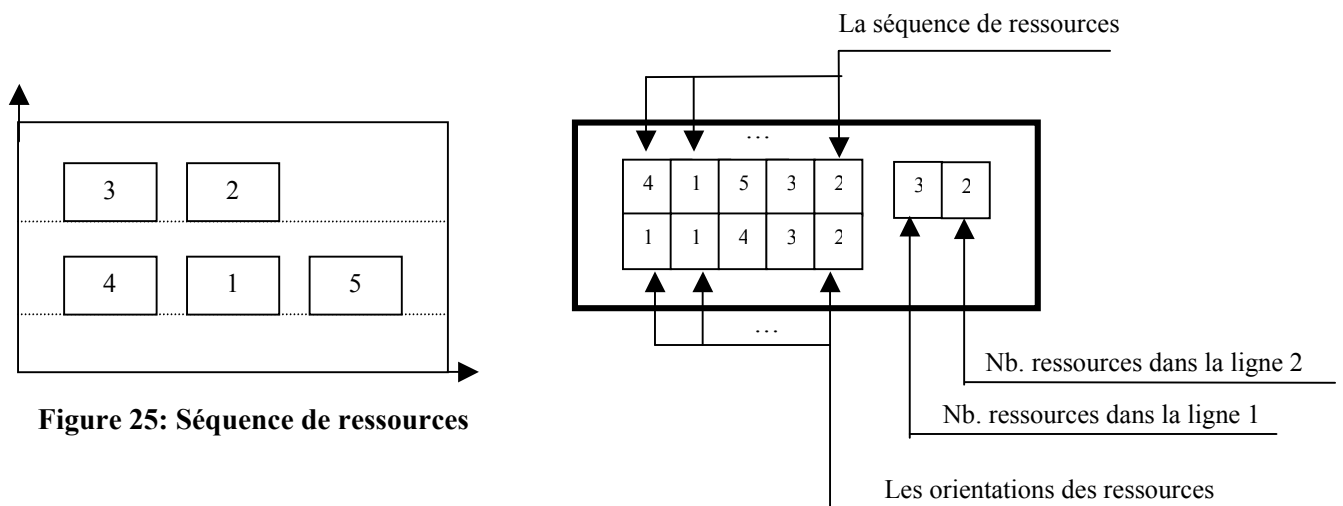


Figure 26 : Représentation des chromosomes

c.2. Fonction d'adaptation

Chaque chromosome A_i est évalué par une fonction d'adaptation f qui donne son adaptation dans la population. Ces adaptations vont permettre de choisir les meilleurs individus de la population, qui ont les plus grandes valeurs d'adaptation.

Comme vu au chapitre 2, le coût d'un agencement peut être exprimé sous forme compensatoire ou sous forme vectorielle. Nous proposons dans l'AGM des fonctions d'adaptation selon la forme.

c.2.1 Forme agrégée

La fonction d'adaptation f est donnée par la différence entre le coût d'un chromosome $C(A_i)$ et le coût d'agencement maximum C_{max} de la population en cours, comme suit:

$$f(A_i) = C_{max} - C(A_i) \quad (27)$$

$C(A_i)$ est donnée par la formule (24) en cas de pondération des critères ou par la formule .

Puisque notre objectif est de minimiser le coût d'agencement agrégé, alors la fonction f est à maximiser. En effet, les chromosomes qui ont des coûts éloignés du coût maximum observé dans la population courante sont jugés intéressants à reproduire, à croiser et à muter pour donner de meilleurs enfants.

c.2.2 Forme vectorielle

La fonction d'adaptation f est donnée par le degré de préférence d'un chromosome par rapport au chromosome de vecteur- coût moyen de la population en cours, comme suit:

$$f(A_i) = \begin{cases} d(A_i, A_m) & \text{si pondération des critères} \\ d'(A_i, A_m) & \text{sinon} \end{cases} \quad (28)$$

$d(A_i, A_m)$ et $d'(A_i, A_m)$ sont données respectivement par les formules (21) et (22).

A_m est le chromosome auquel est associé le vecteur coût moyen de la population courante $\bar{V}$ tel

$$\text{que: } \bar{V} = {}^t(\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3) \quad \text{avec } \bar{V}_k = \frac{\sum_{i=1}^{\text{taille population}} C_k(A_i)}{\text{taille population}}$$

Cette fonction est à maximiser. En effet, les chromosomes qui sont préférés au chromosome de vecteur coût moyen de la population courante sont susceptibles de générer une meilleure population.

c.3. Sélection

La sélection est un procédé dans lequel un chromosome est choisi en fonction de sa valeur d'adaptation appréciable pour subir un croisement ou une mutation. Si cette valeur est grande, elle dénote par analogie à la nature une résistance de ce chromosome aux maladies, aux prédateurs, et aux autres obstacles à franchir pour atteindre l'âge adulte et la période de reproduction.

Pour la sélection des chromosomes à perturber, plusieurs méthodes de sélection ont été proposées dans la littérature.

c.3.1 Sélection par la roue biaisée

Dans une roue de loterie biaisée, chaque chromosome de la population occupe un secteur de la

roue proportionnel à son adaptation normalisée
$$\frac{f(A_i)}{\sum_{j=1}^{taille\ population} f(A_j)} \quad (29)$$

Cette roue est tournée n fois pour sélectionner les chromosomes à reproduire dans la population intermédiaire P_i . Bien évidemment, les chromosomes les plus adaptés (de grandes valeurs d'adaptation) sont reproduits plusieurs fois dans P_i [22].

c.3.2 Sélection par la moyenne

Cette méthode considère le rapport de la fonction d'adaptation du chromosome sur l'adaptation

moyenne de la population $\frac{f(A_i)}{\bar{f}}$, où
$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^{taille\ population} f(A_i)}{taille\ population} \quad (30)$$

La partie entière de ce rapport constitue le nombre de copies qui vont être faites de cet individu.

c.3.3 Sélection aléatoire

La sélection des individus se fait aléatoirement. L'avantage de cette sélection est qu'elle donne de la chance aux mauvais individus, susceptibles de générer de bons individus, pour participer à l'élaboration de la nouvelle génération.

c.4. Croisement

Le croisement est une production d'un ou de deux chromosomes enfants à partir de deux chromosomes parents. Pour cela, deux parents et un point de coupure doivent être choisis. Les enfants nés de cette opération portent respectivement un segment d'information du parent 1 et un segment d'information du parent 2. Il existe aussi des croisements à plusieurs points de coupure, comme c'est le cas dans notre étude.

Il est associé à l'opérateur de croisement une probabilité de croisement P_c qui permet de calculer le nombre de chromosomes qui vont subir cet opérateur dans la population. P_c est un paramètre important pour orienter les recherches de l'AGM.

Pour générer des agencements par l'opérateur de croisement, nous utilisons deux points de coupure que nous appliquons sur les séquences de ressources, comme le montre la figure 27.

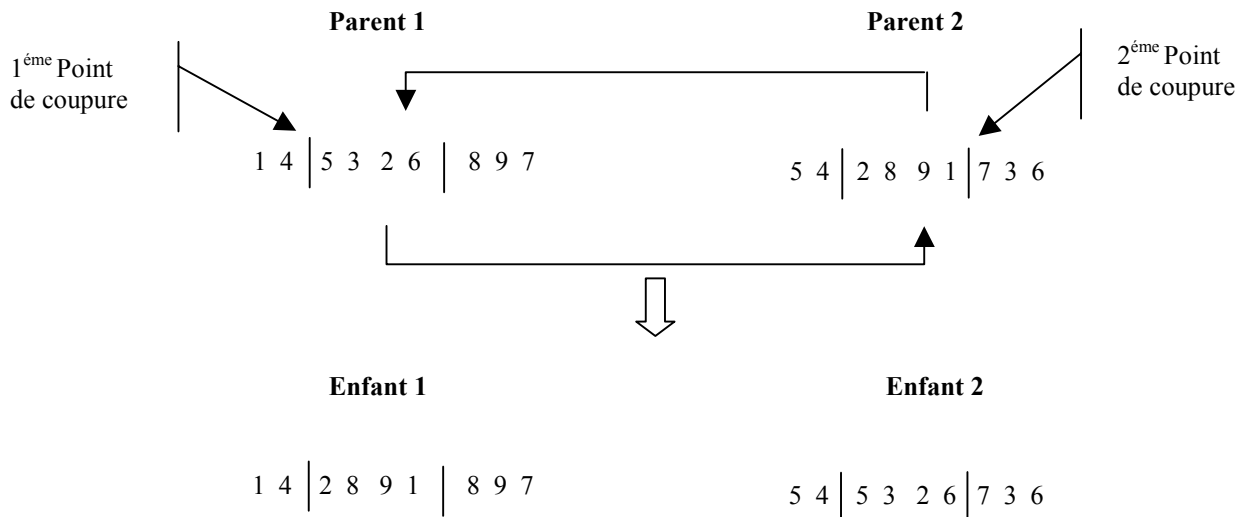


Figure 27 : Croisement à deux points de coupure de deux agencements

Il apparaît clairement dans la figure 28 que les deux enfants obtenus ne sont pas réalisables. En effet, dans l'enfant 1, les ressources 3, 5 et 6 n'apparaissent pas. Tandis que les ressources 8 et 9 se répètent. Et dans l'enfant 2, les ressources 1, 8 et 9 n'apparaissent pas et les ressources 3, 5 et 6 se répètent.

Pour remédier à cet inconvénient, nous proposons d'utiliser un croisement de réarrangement, appliqué avec succès sur le problème de voyageur de commerce [48].

Le principe de ce croisement consiste à remplacer, dans chaque parent, les ressources qui proviennent de l'autre parent lors du croisement par un symbole H . Ensuite, des décalages sur les bits de la séquence sont effectués jusqu'à l'encadrement des symboles H entre les deux points de coupure. Enfin, la séquence de symbole H est remplacée par le segment provenant de l'autre parent pour obtenir l'enfant.

Le détail de cette procédure est donné dans l'algorithme de croisement suivant:

Algorithme de croisement

Début

Sélectionner deux parents A et B et choisir aléatoirement deux points de coupure.

Faire pour chaque parent :

début

- Remplacer par des symboles H les ressources du segment provenant de l'autre parent.
- Répéter
 - Permuter chaque ressource située à droite d'un H avec ce dernier (en allant du 2^{ème} point de coupure vers la gauche du parent).
 - Permuter chaque ressource située au début de séquence avec un H situé en fin de séquence.
- Jusqu'à ce que tous les H soient contenus dans le segment délimité par les deux points de coupure.
- Remplacer la séquence de H par le segment provenant de l'autre parent.

Fin ;

Fin ;

Remarque : Les orientations des ressources accompagnent celles-ci dans leurs mouvements.

La figure 28 montre l'application de ce concept sur le parent 1 de la figure 27.

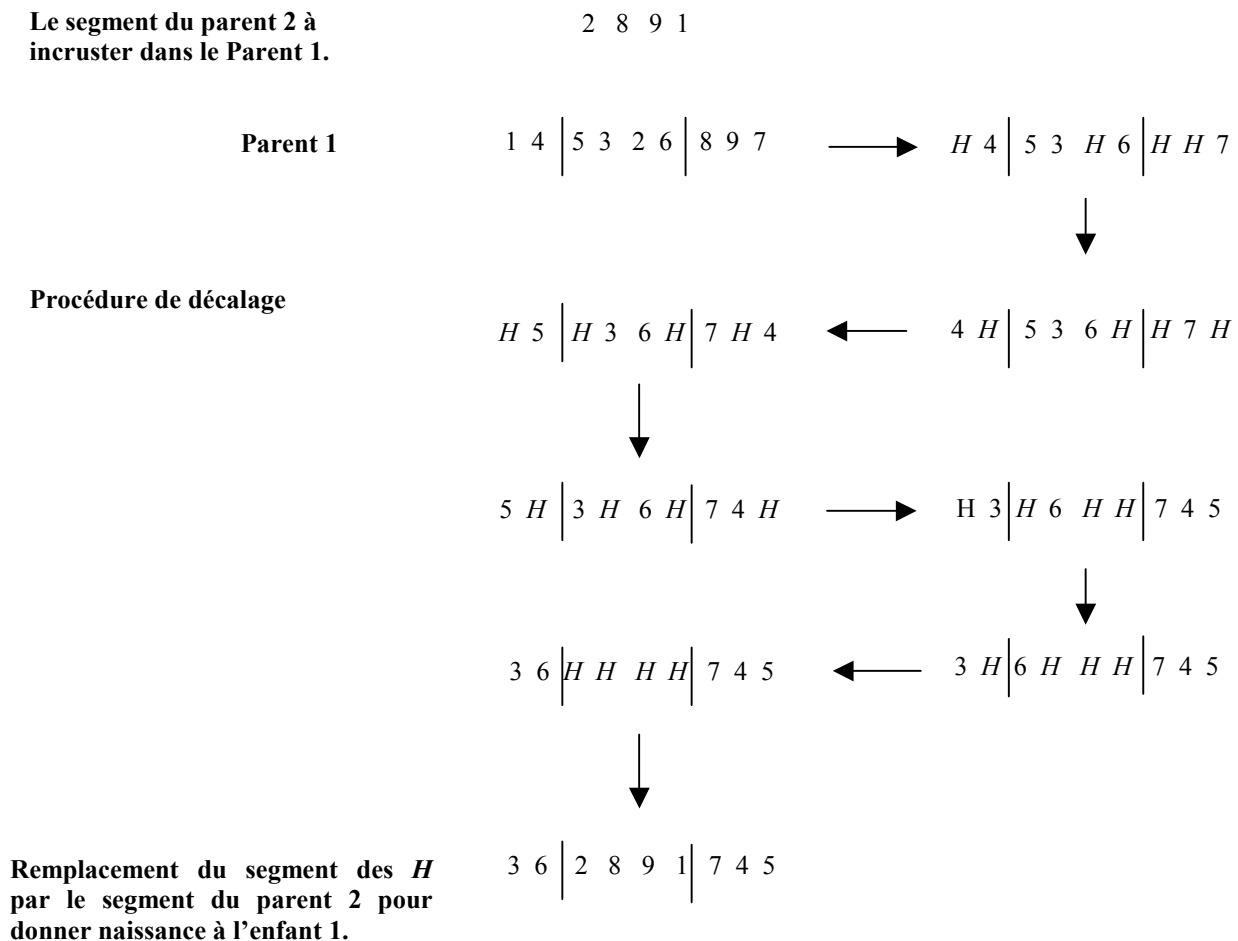


Figure 28 : Schéma de croisement de deux parents

c.5. Mutation

La mutation est la modification aléatoire occasionnelle de la valeur d'un bit du chromosome. On associe à cet opérateur une probabilité de mutation P_m , en général faible, qui permet d'appliquer cet opérateur et de calculer le nombre de chromosomes qui seront mutés.

L'application de cet opérateur diversifie la population en évitant des pertes d'informations intéressantes.

Afin de muter un agencement vers un autre, nous proposons deux mutations :

c.5.1 Mutation 1

Nous procédons par le choix aléatoire de deux points de coupure qui délimiteront un segment de la séquence des ressources (avec leurs orientations) d'un chromosome, que nous inversons pour obtenir un nouveau chromosome (cf. figure 29).

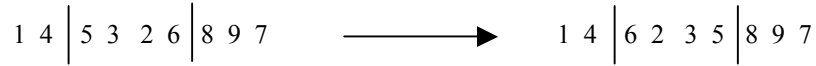


Figure 29 : Mutation de deux agencements

L'algorithme de cette mutation est donné ci dessous :

Algorithme Mutation 1

Début

- Choisir aléatoirement deux entiers k_1 et k_2 entre 1 et $m-1$, avec $k_1 < k_2$.
- Répéter
 - Permuter les ressources qui se trouvent respectivement aux positions k_1 et k_2 ;
 - $k_1 := k_1 + 1$; $k_2 := k_2 - 1$;
- jusqu'à ce que $k_1 \geq k_2$;

Fin ;

c.5.2 Mutation 2

Cette mutation agit sur le troisième segment du codage, à savoir le nombre de ressources sur chaque ligne de la cellule. Un nombre de ressource w_i est généré aléatoirement pour chaque ligne i , comme le montre la procédure *Mutation 2*.

Algorithme Mutation 2

Début
 Pour la ligne 1 générer un nombre de ressources w_1 entre 1 et m ;
 Pour chaque ligne i faire
 Générer un nombre de ressources w_i entre 1 et $m-w_{i-1}$;
Fin ;

c.5.3 Mutation 3

Cette mutation agit sur les orientations des ressources. Elle génère une ressource aléatoirement et lui change de rotation aléatoirement, comme le montre la procédure *Mutation 3*.

Algorithme Mutation 3

Début
 Répéter
 Générer aléatoirement une ressource i de rotation o ;
 Générer une rotation k différente de o .
 Remplacer o par k .
 Jusqu'à $i=m$
Fin ;

c.6. Stratégie de remplacement

Pour la génération de la nouvelle population, nous proposons de remplacer les mauvais parents (qui ont les plus petites valeurs d'adaptation) de la population courante par les meilleurs enfants (qui ont les plus grandes valeurs d'adaptation) générés par croisement et mutation. Si la population des enfants est meilleure que celle des parents, alors elle remplace celle-ci. Sinon, les p meilleurs enfants vont remplacer les p mauvais parents dans la nouvelle population.

Cette procédure permet un chevauchement de générations qui préserve les bons chromosomes de chaque génération.

c.7. Autres paramètres de l'AGM

Une variété d'autres paramètres agissent sur l'AGM, tels que : la probabilité de croisement P_c , la probabilité de mutation P_m , la taille de la population et le nombre de générations.

La variation de ces paramètres, en plus de la procédure de sélection des chromosomes à reproduire, influence positivement ou négativement le résultat de l'AGM. Pour fixer la meilleure combinaison de valeurs, nous procédons de la même manière que sur les paramètres du RSM,

c'est à dire, nous utilisons le principe d'ascension de collines pour trouver empiriquement, les valeurs qui donneraient les meilleurs agencements.

La procédure de choix de ces paramètres est la suivante:

Procédure d'Ascension de collines pour le choix des paramètres de l'AGM :

1. Fixer arbitrairement des valeurs pour les paramètres.
 2. **Choix Procédure de sélection :** Effectuer n exécutions de l'AGM en utilisant chaque procédure de sélection, et choisir la procédure de sélection qui atteint la meilleure solution générée.
 3. **Choix de la taille de la population :** Effectuer n exécutions de l'AGM pour chaque valeur de la taille de la population figurant dans le tableau 4 (voir ci dessous), en utilisant la procédure de sélection choisie dans l'étape 2. Choisir la valeur qui atteint la meilleure solution.
 4. **Choix de la probabilité de croisement:** Procéder de la même manière que dans les étapes 2 et 3.
 5. **Choix de la probabilité de mutation:** Procéder de la même manière que dans les étapes 2 et 3.
 6. **Choix du nombre maximum de générations à faire: Idem que les étapes 2 et 3.**
 7. **Résultat final :** La combinaison des valeurs de paramètres génétiques à utiliser dans les futures exécutions de l'AGM est constituée des valeurs obtenues dans cette procédure.
-

Le tableau 4 donne des éventails de valeurs de chaque paramètre.

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Procédure de sélection : $s_1, s_2, s_3, \dots, s_a$ - taille de la population: $t_1, t_2, t_3, \dots, t_b$ - la probabilité de croisement P_c: $c_1, c_2, c_3, \dots, c_c$ - la probabilité de mutation P_m: $m_1, m_2, m_3, \dots, m_d$ - le nombre de générations maximum: $g_1, g_2, g_3, \dots, g_e$ |
|--|

Tableau 4 : Les paramètres de l'AGM

3.7 PERFORMANCES D'UN ALGORITHME

D'après [36], il existe trois types de mesures de performance d'un algorithme: performance on-line, performance off-line et performance de la meilleure solution.

3.7.1 Performance On-line

Elle représente la moyenne des résultats obtenus lors des différentes exécutions d'un algorithme sur une instance donnée à un instant t . Elle est exprimée comme suit:

$$(on - line)_T = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_t(A_i)}{T \times N} \quad (31)$$

Où: T est le nombre de générations,

N est la taille de la population.

$C_t(A_i)$ est le coût de l'agencement i à l'instant t

3.7.2 Performance Off-line

Elle représente la moyenne des meilleurs résultats obtenus lors des différentes exécutions d'un algorithme sur une instance donnée à un instant t . Elle est exprimée comme suit:

$$(off - line)_T = \frac{\sum_{t=1}^T C_t(A^*)}{T} \quad (32)$$

où $C_t(A^*)$ est le meilleur résultat obtenu à l'instant t .

3.7.3 Performance de la meilleure solution

La performance de l'algorithme est donné par son meilleur résultat.

La performance On-line donne un aperçu global sur la qualité des solutions de la population.

Tandis que les performances Off-line et 'meilleure solution' s'intéressent à la qualité des meilleures solution. Et entre ces deux performances, la première tient compte de la vitesse de convergence d'un algorithme vers ses meilleurs éléments, à l'inverse de la performance 'meilleure solution'. Mais dans beaucoup de cas pratiques, la performance 'meilleure solution' est la plus utilisée, comme c'est le cas dans la résolution du problème d'agencement.

Ces performances sont utilisées pour analyser les comportements du RSM et de l'AGM dans la résolution du problème d'agencement multicritère.

3.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'organigramme global de résolution du problème d'agencement statique multicritère. Pour cela, nous avons procédé à la description consécutive des méthodes de :

- Hiérarchie multicritère (AHP), mise en œuvre pour évaluer respectivement les mesures de proximité inter-ressources et les poids des critères d'agencement.
- Du Recuit Simulé Multicritère (RSM), appliqué pour trouver un agencement compromis satisfaisant. Cette méthode a fait l'objet d'applications réussies sur le cas monocritère, d'où la motivation de son utilisation au cas multicritère.
- D'un Algorithme Génétique Multicritère (AGM), appliqué aussi pour trouver un agencement satisfaisant, en manipulant des populations diverses de solutions. Cet algorithme est indiqué eu égard à l'immensité du domaine des solutions à explorer dans le problème d'agencement.

Les deux dernières méthodes sont appliqués dans toutes les formes du coût d'agencement : forme agrégée avec pondération des critères et sans pondération des critères, forme vectorielle pondérée et non pondérée.

Nous avons présenté en fin de chapitre, quelques outils de comparaison de performance, qui permettent d'analyser le comportement des deux algorithmes.

Nous avons programmé et appliqué toutes les procédures citées dans ce chapitre sur des instances cellulaires construites par nous mêmes et sur des benchmarks, reconnus dans la littérature pour leur difficulté. Tous les résultats et analyses de ces applications seront étudiés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 4 :

APPLICATIONS ET RESULTATS

4.1 INTRODUCTION

Pour tester et comparer les performances des méthodes proposées au précédent chapitre (AHP, RSM et AGM), nous les avons confronté à des instances cellulaires de fabrication dont certaines ont été construites par nous même~~s~~^s, et d'autres ont été prises de la littérature. Ces dernières portent le nom d'instances de Nugent [454~~3~~]. Elles sont réputées pour leur difficulté et pour être, jusqu'à ce jour, un terrain de concurrence rude pour beaucoup de travaux de recherche. Ce chapitre dresse quelques applications suivies d'analyses des comportements de chaque méthode.

4.2 MESURES DE PROXIMITE

Pour évaluer les mesures de proximité r_{ij} entre chaque paire de ressources i et j , nous appliquons la méthode de l'AHP.

Etant donnée une instance cellulaire composée de trois ressources de fabrication: M_1 , M_2 et M_3 , l'AHP décompose le problème en hiérarchie (cf. figure 30).

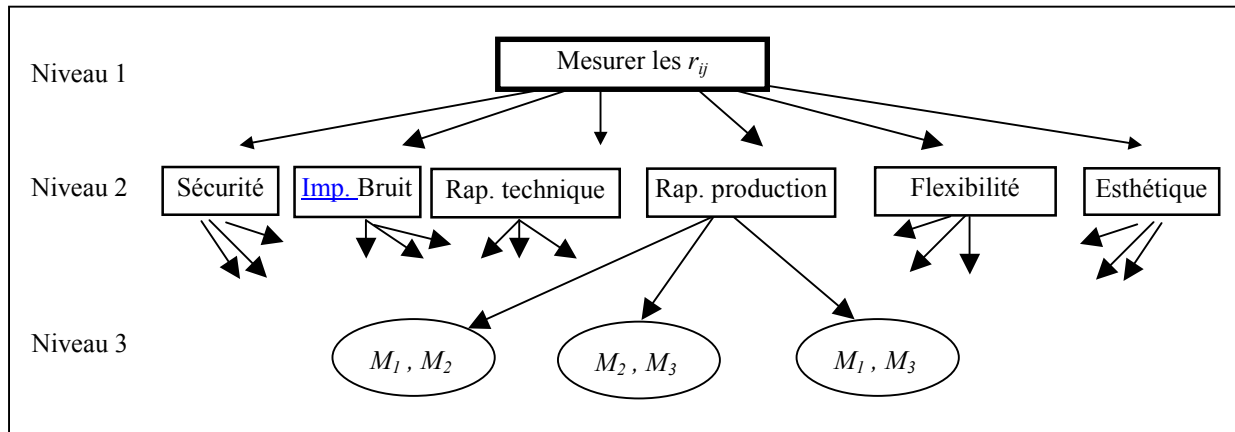


Figure 30 : La hiérarchie du problème de proximité des ressources.

Puisque l'objectif consiste à évaluer r_{ij} pour chaque paire de ressources $\{M_i, M_j\}$, alors les alternatives sont les paires de ressources: $\{M_1, M_2\}$, $\{M_2, M_3\}$ et $\{M_1, M_3\}$. Le niveau 3 de la hiérarchie est constituée de ces trois alternatives. Le niveau 2 regroupe les critères auxquelles sont comparées les alternatives, et le niveau 1 représente l'objectif global à savoir l'évaluation des r_{ij} .

Après avoir hiérarchisé le problème, les matrices de jugements sont établies comme suit:

- Les critères sont comparés deux à deux à l'objectif global .
- Les alternatives sont comparées deux à deux à chaque critère du niveau 2.

Ensuite, nous calculons, au moyen de la méthode du vecteur propre, les priorités globales relatives. Les matrices de jugements ainsi que les priorités relatives sont données dans les figures 31 et 32.

	Sécurité	Rap. Prod	Rap. tech.	Esthétique	bruit	flexibilité	Priorités globales relatives
Sécurité	1	5	6	9	7	6	0,52
Rap. Prod.	1/5	1	3	7	1/2	1/3	0,12
Rap. Tech	1/6	1/3	1	2	1/2	1	0,07
Esthétique	1/9	1/7	1/2	1	1/3	1/2	0,04
Bruit	1/7	2	2	3	1	1	0,12
Flexibilité	1/6	3	1	2	1	1	0,13

Ratio de cohérence (RC) = 0,106

Ratio de cohérence (RC) = 0,106

Figure 31: les priorités globales relatives des critères de la hiérarchie par rapport à

l'objectif
global.

Sécurité	{M ₁ , M ₂ }	{M ₁ , M ₃ }	{M ₂ , M ₃ }	Priorité
{M ₁ , M ₂ }	1	2	7	0,59
{M ₁ , M ₃ }	1 / 2	1	5	0,33
{M ₂ , M ₃ }	1/7	1/5	1	0,08

Ratio de cohérence (RC) =0,013

Esthétique	{M ₁ , M ₂ }	{M ₁ , M ₃ }	{M ₂ , M ₃ }	Priorité
{M ₁ , M ₂ }	1	2	1	0,41
{M ₁ , M ₃ }	1 / 2	1	1	0,26
{M ₂ , M ₃ }	1	1	1	0,33

Ratio de cohérence (RC) =0,046.

Rap.Prod.	{M ₁ , M ₂ }	{M ₁ , M ₃ }	{M ₂ , M ₃ }	Priorité
{M ₁ , M ₂ }	1	2	7	0,57
{M ₁ , M ₃ }	1/2	1	8	0,37
{M ₂ , M ₃ }	1/7	1/8	1	0,06

Ratio de cohérence (RC) =0,066

Imp. Bruit	{M ₁ , M ₂ }	{M ₁ , M ₃ }	{M ₂ , M ₃ }	Priorité
{M ₁ , M ₂ }	1	1 / 2	1 / 4	0,13
{M ₁ , M ₃ }	2	1	1/4	0,21
{M ₂ , M ₃ }	4	4	1	0,66

Ratio de cohérence (RC) =0,046

Rap. tech	{M ₁ , M ₂ }	{M ₁ , M ₃ }	{M ₂ , M ₃ }	Priorité
{M ₁ , M ₂ }	1	1 / 4	1/7	0,07
{M ₁ , M ₃ }	4	1	1/5	0,21
{M ₂ , M ₃ }	7	5	1	0,72

Ratio de cohérence (RC) =0,107

Flexibilité	{M ₁ , M ₂ }	{M ₁ , M ₃ }	{M ₂ , M ₃ }	Priorité
{M ₁ , M ₂ }	1	4	6	0,68
{M ₁ , M ₃ }	1 / 4	1	4	0,24
{M ₂ , M ₃ }	1/6	1/4	1	0,08

Ratio de cohérence (RC) =0,091

Figure 32 : Matrices de comparaison des ressources par rapport aux critères du niveau 2

En dernière étape, les priorités globales des alternatives, qui représentent les r_{ij} , sont calculées, comme le montre la figure 33.

	Sécurité (0,52)	Rap.Prod (0,12)	Rap.tech (0,07)	Esthétique (0,04)	Bruit (0,12)	Flexibilité (0,13)	Priorités globales
{M ₁ , M ₂ }	0,59 (0,52) +	0,57 (0,12) +	0,07 (0,07) +	0,41 (0,04) +	0,13 (0,12) +	0,41 (0,13) =	0,501
{M ₁ , M ₃ }	0,33 (0,52) +	0,37 (0,12) +	0,21 (0,07) +	0,26 (0,04) +	0,21 (0,12) +	0,26 (0,13) =	0,299
{M ₂ , M ₃ }	0,08 (0,52) +	0,06 (0,12) +	0,72 (0,07) +	0,33 (0,04) +	0,66 (0,12) +	0,33 (0,13) =	0,200

Figure 33 : Détermination des mesures de proximité r_{ij} (les priorités globales)

Donc, la matrice des mesures de proximité est :

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0,3 \\ 0,5 & 0,1 & 0,2 \\ 0,3 & 0,2 & 1 \end{pmatrix}$$

Commentaires :

De la matrice R , nous déduisons qu'il est fortement souhaité de placer les ressources M_1 et M_2 cote à cote. Tandis qu'il est presque indifférent de placer M_1 à côté de M_3 et M_3 à côté de M_2 . En effet, le premier placement favorise fortement le respect des critères qualitatifs par rapport aux deux autres placements.

4.3 POIDS DES CRITERES D'AGENCEMENTE LA FAMILLE F

De même que dans les mesures de proximité, nous appliquons l'AHP pour évaluer les poids des critères C_1 , C_2 et C_3 de la famille F . La hiérarchie issue de la décomposition de ce problème est donnée par la figure 16 du chapitre 3. Les priorités globales relatives et les priorités globales sont calculées à partir des matrices de jugements établies sur les critères, par rapport à l'objectif global, et sur les alternatives, par rapport aux critères du niveau 2. La synthèse des priorités est faite au moyen de la méthode du vecteur propre. Les figures 34, 35 et 36 résument ces priorités.

	Sécurité	Esthétique	flexibilité	Coût prod.	Délais liv.	Priorités globales relatives
Sécurité	1	7	6	4	2	0,45
Esthétique	1/7	1	1/2	1/3	1/5	0,05
Flexibilité	1/6	2	1	1/3	1/4	0,07
Coût prod	1/4	3	3	1	1/3	0,14
<u>Délais liv.</u>	<u>1/2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>0,28</u>

Délais liv.

Ratio de cohérence (RC) = 0,041

5

4

3

1

0,28

Ratio de cohérence (RC) = 0,041

— **Figure 34: les priorités **globales** relatives des critères de la hiérarchie par rapport à l'objectif global.**

Sécurité	C_1	C_2	C_3	Priorité
C_1	1	1/4	1/2	0,14
C_2	4	1	3	0,63
C_3	2	1/3	1	0,24

Ratio de cohérence (RC) = 0,016.

Coût prod	C_1	C_2	C_3	Priorité
C_1	1	1/2	1/4	0,13
C_2	2	1	1/4	0,21
C_3	4	4	1	0,66

Ratio de cohérence (RC) = 0,046.

Délais liv	C_1	C_2	C_3	Priorité
C_1	1	1/4	1/5	0,10
C_2	4	1	1/2	0,33
C_3	5	2	1	0,57

Ratio de cohérence (RC) = 0,021.

Esthétique	C_1	C_2	C_3	Priorité
C_1	1	1/3	5	0,28
C_2	3	1	7	0,65
C_3	1/5	1/7	1	0,07

Ratio de cohérence (RC) = 0,056.

Flexibilité	C_1	C_2	C_3	Priorité
C_1	1	1	7	0,47
C_2	1	1	7	0,47
C_3	1/7	1/7	1	0,07

Ratio de cohérence (RC) = 0,01.

Figure 35: Matrices des comparaisons binaires des alternatives et leurs priorités relatives

	Sécurité (0,45)	Esthétique (0,05)	Flexibilité (0,07)	Coût prod (0,14)	Délai liv. (0,28)	Priorités globales
C_1	0,14 (0,45) +	0,28 (0,05) +	0,47 (0,07) +	0,13 (0,14) +	0,10 (0,28) =	0,15
C_2	0,63 (0,45) +	0,65 (0,05) +	0,47 (0,07) +	0,21 (0,14) +	0,33 (0,28) =	0,48
C_3	0,24 (0,45) +	0,07 (0,05) +	0,07 (0,07) +	0,66 (0,14) +	0,57 (0,28) =	0,37

Figure 36: Les poids des critères C_1 , C_2 et C_3 .

Les poids respectifs des critères de F sont:

- 0,15 pour le coût de fabrication.
- 0,48 pour le temps de fabrication.
- 0,37 pour la relation de proximité.

Il apparaît de ces priorités que le critère coût de fabrication est le moins important des critères. Alors que le temps est légèrement important par rapport à la disposition qualitative des ressources.

4.4 APPLICATION DU RSM ET ANALYSE

Comme vu au chapitre 3, le RSM dépend d'un vecteur de paramètres de contrôle dont les valeurs influent grandement sur l'efficacité de l'heuristique. Nous appliquons l'algorithme d'ascension de collines pour les fixer à leurs meilleures valeurs.

4.4.1 Ascension de collines pour choisir les **valeurs des paramètres**

Le tableau 5 reprend les valeurs les plus répandues de chaque paramètre [6210], [543] et [4432].

-	Construction de l'agencement initial : procédure aléatoire, procédure déterministe .
-	Température initiale : 50, 100, 1000.
-	Longueur de palier : - fixe : $m/2$, m, $2xm$ (m étant le nombre de ressources). - évolutive : 1, 01, 1, 02.
-	Palier de refroidissement : 0,85, 0,90, 0,95.
-	Température finale: 1, 0,1 et 0,01.

Tableau 5 : Les valeurs choisies pour les paramètres du RSM

Pour appliquer l'algorithme d'ascension de collines, nous avons utilisé le coût d'agencement pondéré et agrégé, vu que le rendement du RSM ne dépend pas de la forme du coût d'agencement qu'il soit agrégé ou pas. Les valeurs initiales des paramètres sont données dans le tableau 6:

-	Procédure d'agencement initial: aléatoire.
-	Température de départ:100
-	Palier de température :0,90
-	Longueur de palier: m (nombre de ressources).
-	Température finale :0,01

Tableau 6 : Valeurs initiales des paramètres du RSM

La variation des paramètres, selon l'algorithme d'ascension de collines et la table 5, engendre 12 vecteurs de paramètres. Pour chacun de ces vecteurs et sur huit instances cellulaires, des exécutions sont réalisées et enregistrées. Au total, nous avons généré 96 échantillons de taille égale à 10. Les résultats obtenus sont recensés dans le tableau 7, où les meilleurs coûts sont en gras, et dans le tableau 8, où sont portés les jugements sur les vecteurs de paramètres atteignant les meilleurs coûts d'agencement.

m	4	5	7	8	10	15	20	30
P								
Fixer la procédure de génération de l'agencement initial								
PA	592,31	71,24	7,36	1561,31	714,51	18,29	20,72	337,59

PD	592.31	71.24	7.29	1560.11	695.02	18.53	21.12	344.68
Fixer la température initiale en utilisant <i>PA</i>								
50°	592.31	71.24	7.64	1533.92	737.57	18.25	20.48	341.76
100°	592.31	71.24	7.36	1561.31	714.51	18.29	20.72	337.59
1000°	592.31	72.04	7.09	1529.11	701.11	18.53	21.08	343.07
Fixer la longueur de palier en utilisant <i>PA</i> et $ti=1000^\circ$								
<i>m/2</i>	592.31	71.24	7.52	1561.67	741.16	18.61	21.21	353.34
<i>m</i>	592.31	72.04	7.09	1529.11	701.11	18.53	21.08	343.07
2.<i>m</i>	592.31	71.24	7.34	1545.33	681.82	18.16	20.45	337.36
1.01x<i>Lp</i>	592.31	70.79	7.24	1529.11	702.84	18.06	20.53	338.66
1.02x<i>Lp</i>	592.31	70.15	7.29	1533.92	679.16	17.60	20.14	336.25
Fixer le palier de température en utilisant <i>PA</i> , $ti=1000^\circ$ et $Lp=1.02xLp$								
0.85	592.31	71.24	7.24	1529.11	698	17.67	20.33	337.79
0.90	592.31	70.15	7.29	1533.92	679.16	17.60	20.14	336.25
0.95	592.31	70.79	7.09	1529.11	679.16	17.33	19.70	332.15
Fixer la température finale <i>PA</i> , $ti=1000^\circ$, $Lp=1.02xLp$ et $\alpha=0.95$								
1°	592.31	71.24	7.76	1529.11	681.64	20.31	23.13	345.72
0.1°	592.31	70.15	7.09	1529.11	679.16	18.43	20.84	336.28
0.01°	592.31	70.79	7.09	1529.11	679.16	17.33	19.70	332.15

Tableau 7: Coûts d'agencements obtenus par l'algorithme Ascension de collines.

<i>m</i>	4	5	7	8	10	15	20	30
<i>P</i>								
Fixer la procédure de génération de l'agencement initial								
<i>PA</i>	Meilleur*					Meilleur	Meilleur	Meilleur
<i>PG</i>		Meilleur*	Meilleur	Meilleur	Meilleur			
Fixer la température initiale en utilisant <i>PA</i>								
50°						Meilleur	Meilleur	
100°	Meilleur*	Meilleur						
1000°			Meilleur	Meilleur	Meilleur			Meilleur
Fixer la longueur de palier en utilisant <i>PA</i> et $ti=1000^\circ$								
<i>m/2</i>								
<i>m</i>								
2.<i>m</i>								
1.01x<i>Lp</i>								
1.02x<i>Lp</i>	Meilleur*	Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur
Fixer le palier de température en utilisant <i>PA</i> , $ti=1000^\circ$ et $Lp=1.02xLp$								
0.85								
0.90		Meilleur						
0.95	Meilleur*		Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur
Fixer la température finale <i>PA</i> , $ti=1000^\circ$, $Lp=1.02xLp$ et $\alpha=0.95$								
1°	-							
0.1°	-	Meilleur						

0.01°	-		Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur	Meilleur
-------	---	--	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Tableau 8: Performances de meilleur coût obtenues par l'algorithme Ascension de collines.

(*): Jugement établi grâce à la performance On line.

(-): toutes les performances sont égales.

Les paramètres qui atteignent les meilleurs coûts sont:

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Procédure d'agencement initial: aléatoire. - Température de départ: 1000 - Palier de température : 0.95 - Longueur de palier: $1.02 \times Lp$ - Température finale : 0.01 |
|---|

Tableau 9 : Les valeurs des paramètres obtenues par HC

Sur les 96 échantillons répartis en 8 populations, nous avons relevé les constatations suivantes:

- la procédure aléatoire permet d'atteindre des qualités de solutions aussi bonnes que la procédure gloutonne. Ceci confirme l'idée que la solution initiale peut être quelconque, et par conséquent, le RSM est indépendant de la solution de départ.
- La température initiale 1000° est meilleure que 100° et 50°. Ceci peut s'expliquer par le nombre considérable de mauvaises solutions acceptées dans les premiers paliers du RSM. Ces solutions sont d'éventuelles bonnes pistes pour trouver de meilleures.
- Une progression de la longueur de palier par $Lp \times 1.02$, en démarrant de $2m$, fournit de meilleures solutions.
- Une variation du palier de température $\alpha = 0.95$ atteint de meilleures solutions. En effet, avec cette valeur, le RSM explore plus de paliers de température qu'avec 0.85 ou 0.90. Donc, il explore plus de champs de solutions diversifiés.
- La température finale 0.01 donne les meilleurs coûts d'agencements. Ceci est dû au grand nombre de solutions générées par le RSM, matérialisé par un grand nombre de paliers d'une part et par le refus de mauvaises solutions lorsque la température s'approche de zéro d'autre part.

Les meilleurs coûts d'agencement et les valeurs des paramètres de contrôle du RSM qui ont engendrés ces coûts sont recensés dans le tableau 10. Il ressort que le vecteur (agencement initial aléatoire, température initiale 1000°, palier de température au moins égal à 0.90, longueur

de palier $1_{-02} \times Lp$, température finale 0_{-01}) donne généralement les meilleurs agencements à travers les 960 exécutions réparties sur les 8 instances.

m	Meilleur Coût	Ag.initial	Temp. initiale	Palier α	Lp	Temp. finale
4	592 ₋₃₁	Aléatoire	50	0_{-90}	m	0_{-01}
5	70 ₋₁₅	Aléatoire	1000	0_{-90}	$1_{-02} \times Lp$	0_{-01}
7	7 ₋₀₉	Aléatoire	1000	0_{-90}	m	0_{-01}
8	1529 ₋₁₁	Aléatoire	1000	0_{-90}	m	0_{-01}
10	679 ₋₁₆	Aléatoire	1000	0_{-90}	$1_{-02} \times Lp$	0_{-01}
15	17 ₋₃₃	Aléatoire	1000	0_{-95}	$1_{-02} \times Lp$	0_{-01}
20	19 ₋₇₀	Aléatoire	1000	0_{-95}	$1_{-02} \times Lp$ 1_{-02}	0_{-01}
30	332 ₋₁₅	Aléatoire	1000	0_{-95}	$1_{-02} \times Lp$ 1_{-02}	0_{-01}

Tableau 10 : Meilleurs coûts obtenus par le RSM

4.4.2 Test de Fisher

Pour étudier l'effet des 12 vecteurs de paramètres sur les huit instances cellulaires, nous avons procédé au test de Fisher sur les 96 échantillons générés. Ce test est considéré comme robuste car les échantillons sont de tailles égales [1109].

Le modèle de l'analyse de la variance correspondant à ce cas est le modèle croisé fixe à deux critères de classification, qui sont: les types d'instances et les vecteurs de paramètres. Ce modèle décompose les écarts des observations par rapport à la moyenne générale, SCE_t , en 04 composantes: les écarts existant entre les différents échantillons par rapport au premier critère SCE_a , les écarts existant entre les différents échantillons par rapport au deuxième critère SCE_b , les écarts existant à l'intérieur des échantillons SCE_r et les écarts liés à l'interaction des deux critères SCE_{ab} .

Ce modèle fait l'objet de trois hypothèses nulles H_0 , H'_0 et H''_0 .

- La première est relative à l'absence d'action du critère types instances.
- La deuxième est relative à l'absence d'action du critère vecteurs de paramètres.
- Et la troisième concerne l'absence d'interaction entre ces deux critères.

La réalisation de cette analyse est donnée par l'algorithme suivant:

Test de Fisher sur modèle croisé à 02 critères de classification

Etant donné p , q et n respectivement le nombre d'instances, le nombre de vecteurs de paramètres et la taille des échantillons:

1. Calculer le terme C par : $C = \frac{\left(\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n x_{ijk} \right)^2}{pqn}$;
2. Calculer SCE_t par : $SCE_t = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n x_{ijk} - C$;
3. Calculer SCE_r par : $SCE_r = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left(\sum_{k=1}^n x_{ijk}^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^n x_{ijk} \right)^2}{n} \right)$;
4. Calculer SCE_a et SCE_b par : $SCE_a = \frac{\sum_{i=1}^p \left(\sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n x_{ijk} \right)^2}{qn} - C$ et $SCE_b = \frac{\sum_{j=1}^q \left(\sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^n x_{ijk} \right)^2}{pn} - C$;
5. Calculer SCE_{ab} par : $SCE_{ab} = SCE_t - SCE_r - SCE_a - SCE_b$;
6. Calculer F_a, F_b, F_{ab} par: $F_a = \frac{SCE_a / (p-1)}{SCE_r / pq(n-1)}$; $F_b = \frac{SCE_b / (q-1)}{SCE_r / pq(n-1)}$ et $F_{ab} = \frac{SCE_{ab} / ((p-1)(q-1))}{SCE_r / pq(n-1)}$;
7. Calculer au niveau de signification α , les valeurs observées des variables de Fisher $F_{a_obs}(p-1, pq(n-1))$, $F_{b_obs}(q-1, pq(n-1))$ et $F_{ab_obs}((p-1)(q-1), pq(n-1))$;
8. Si $F_a \geq F_{1-\alpha}(p-1, pq(n-1))$ alors l'hypothèse H_0 est rejetée au niveau de signification α .
Si $F_b \geq F_{1-\alpha}(q-1, pq(n-1))$ alors l'hypothèse H'_0 est rejetée au niveau de signification α .
Si $F_{ab} \geq F_{1-\alpha}((p-1)(q-1), pq(n-1))$ alors l'hypothèse H''_0 est rejetée au niveau de signification α .

L'application du test a donné les résultats du tableau 11:

Source de variation	Degrés de liberté	F calculé	F-0,90	F-0,95	F-0,99	F-0,999
Type d'instances	7	124 144,93	1,72	2,02	2,66	3,47
Types paramètres RSM	11	32,83	1,55	1,8	2,27	2,51
Interaction	77	8,39	1,24	1,29	1,43	1,49
Variation résiduelle	864					
Totaux	959					

Tableau 11 : Résultat du test de Fisher

La comparaison des vecteurs des paramètres de contrôle du RSM dans huit instances cellulaires par le test de Fisher a révélé le rejet des trois hypothèses nulles.

Pour le critère 'types instances', on constate que les différences entre les instances sont ~~très~~ hautement significatives car $124,144,93 > F_{1-\alpha}$ pour $\alpha \in \{0,10; 0,05; 0,01; 0,001\}$

En effet, les instances sont de tailles et de données différentes.

Pour le critère 'vecteurs des paramètres' auquel on s'intéresse principalement, on a:

$$32,83 > F_{1-\alpha} \text{ pour } \alpha \in \{0,10; 0,05; 0,01; 0,001\}$$

Ceci montre que les vecteurs des paramètres du RSM influent significativement sur la qualité des agencements.

Et enfin, l'interaction entre les deux critères est significative car $8,39 > 1$. Ceci veut dire que l'influence des paramètres de contrôle dépend des instances ou que l'influence des instances dépend des paramètres. Le test ne peut pas apporter de réponse à cette question.

Cependant, dans certaines instances, lorsque la somme des superficies des ressources à agencer est proche de la superficie totale de la cellule, la difficulté de trouver un bon agencement s'accroît.

En effet, le simple fait de trouver une solution réalisable constitue une solution au problème. Le RSM ne peut échapper à cette difficulté, qu'elles que soient les valeurs des paramètres. Et donc, son rendement dépend de l'instance.

4.4.3 Analyse de sensibilité

Après avoir constaté l'influence des paramètres de contrôle dans les instances cellulaires, nous avons voulu savoir quels sont ces paramètres qui influent le plus. Une réponse à cette question est apportée par l'analyse de sensibilité.

L'analyse de sensibilité consiste à étudier l'impact de la variation indépendante de paramètres sur un critère donné. En fixant un cas de base, considéré comme un bon cas, et en perturbant un seul paramètre à la fois (les autres paramètres sont fixés au cas de base), l'impact de cette variation est évalué par rapport au critère et est représenté sur un graphe, dit toile d'araignée. L'interprétation sur le graphe se fait plus aisément que sur un tableau.

Dans le but d'étudier la sensibilité des performances du RSM à ses paramètres de contrôle, nous avons fait varier chaque paramètre dans son intervalle, indépendamment des autres paramètres. Ces paramètres sont: la procédure d'agencement initial, la température de départ, le palier de

température, la longueur de palier et la température finale. Ils varient respectivement sur trois valeurs affichées dans le tableau 12. Le cas de base est le vecteur de paramètres obtenu au moyen de l'algorithme d'Ascension de collines.

- Construction de l'agencement initial : procédure aléatoire, procédure déterministe .
- Température initiale : 50, 100, 1000.
- Longueur de palier : $2m$, $1,01 \times Lp$, $1,02 \times Lp$ (avec $Lp_0=2m$).
- Palier de refroidissement : $0,85$, $0,90$, $0,95$.
- Température finale: 1 , $0,1$, $0,01$.

Tableau 12 : Fourchettes de variation des paramètres du RSM

La variation des paramètres, autour du cas de base, a généré 10 vecteurs de paramètres, notés: $V_1, V_2, V_3, \dots, V_{10}$ (cf. tableau 13).

	Ag. Init.	Temp init	Long palier	Palier temp.	Temp. Fin.
V_1^*	Aléat.	1000	$1,02 \times Lp$ $\times 1,02$	$0,95$	$0,01$
V_2	Déter.	1000	$1,02 \times Lp$ $\times 1,02$	$0,95$	$0,01$
V_3	Aléat.	50	$1,02 \times Lp$ $\times 1,02$	$0,95$	$0,01$
V_4	Aléat.	100	$1,02 \times Lp$ $\times 1,02$	$0,95$	$0,01$
V_5	Aléat.	1000	2m	$0,95$	$0,01$
V_6	Aléat.	1000	$1,01 \times Lp$	$0,95$	$0,01$
V_7	Aléat.	1000	$1,02 \times Lp$	$0,85$	$0,01$
V_8	Aléat.	1000	$1,02 \times Lp$	$0,90$	$0,01$
V_9	Aléat.	1000	$1,02 \times Lp$	$0,95$	1
V_{10}	Aléat.	1000	$1,02 \times Lp$	$0,95$	$0,1$

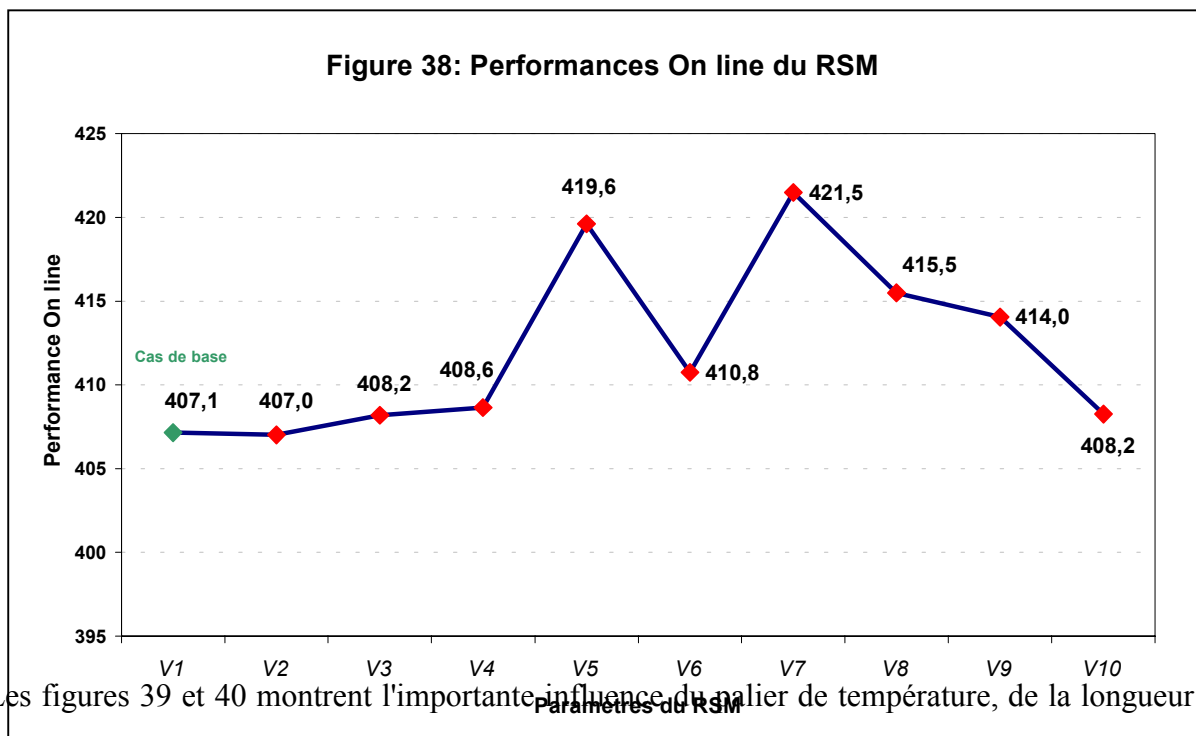
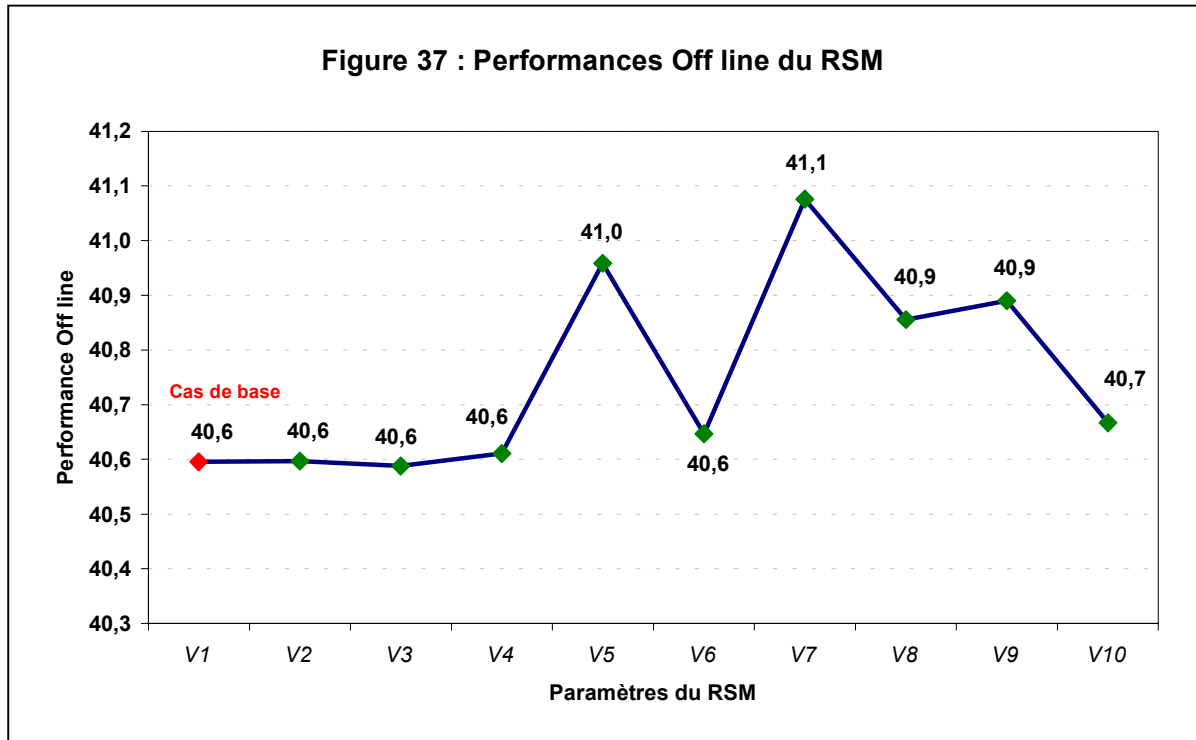
Tableau 13: Les vecteurs de paramètres générés

(*): Le cas de base.

a. Résultats et interprétation

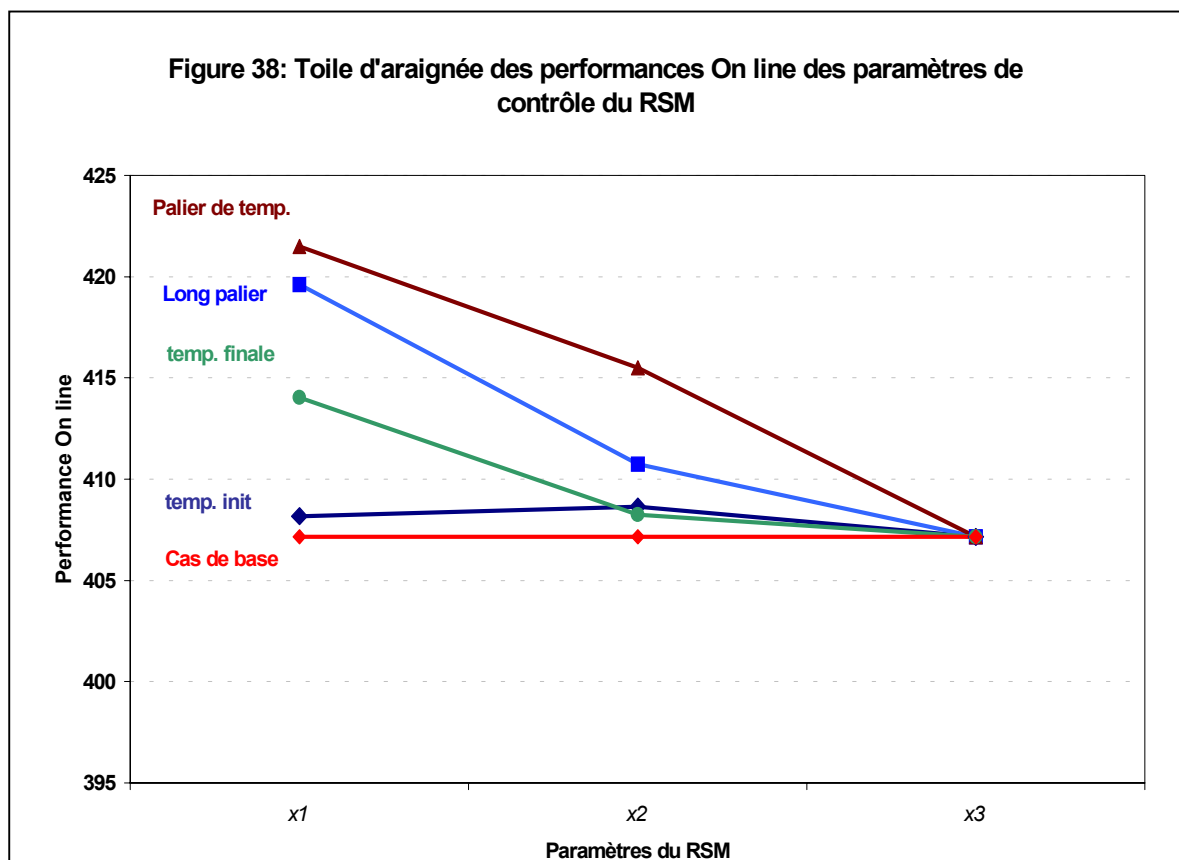
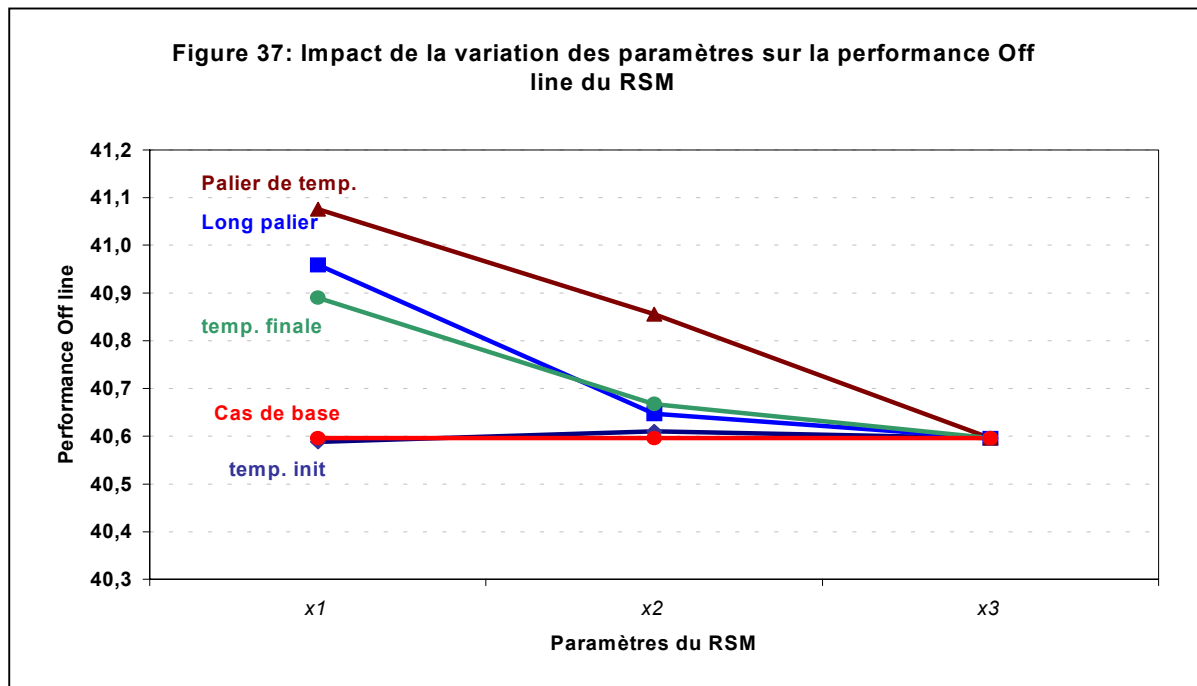
Les performances on line et off line du RSM sur les huit instances ont été évaluées et dressées dans les figures 37 et 38. Le détail de ces performances est repris dans les figures 39 et 40.

Nous constatons que les graphes 37 et 38 ont la même allure. Les performances des vecteurs V_2 , V_3 , V_4 , V_6 et V_{10} sont proches de celle du cas de base. Ces vecteurs ont en commun un palier de température égale à 0,95, une longueur de palier supérieure à $LP \times 1,01 \times Lp$ et une température finale inférieure à 0,1. Autrement dit, ces intervalles permettent d'atteindre de bonnes solutions.



Les figures 39 et 40 montrent l'importante influence du palier de température, de la longueur de palier et de la température finale sur les rendements Off line et On line du RSM. Alors que la

température initiale n'influe pas beaucoup. En effet, le palier de température agit sur le nombre de paliers, et donc de solutions à générer. Plus il est grand, plus un grand nombre de solutions est généré.



que l'augmentation des paramètres suivants: température de départ, palier de température, longueur

de palier et la température finale, accompagnée d'une génération aléatoire de l'agencement initial, permet au RSM de fournir de bons agencements. Cependant, plus la valeur d'un de ces paramètres est grande, plus le temps d'exécution augmente. A ce niveau, il serait nécessaire de faire un compromis entre qualité de solution et temps d'exécution, au risque de voir le RSM perdre l'avantage d'une heuristique à savoir trouver une bonne solution en un temps raisonnable.

4.4.4 InLes instances de Nugent

a. Bref historique

A la fin des années soixante, Nugent, Vollmann et Ruml [45] ont construit un ensemble d'instances de taille 5, 6, 7, 8, 12, 15, 20 et 30, réputées pour leur difficulté. Dans ces instances, les distances entre les sites fixes sont exprimées par des matrices symétriques. Les orientations des ressources et les contraintes physiques inter-ressources ne sont pas prises en compte lors de l'affectation.

Dans leur article [443], Les auteurs ont donné les solutions exactes des quatre premières instances. Pour cela, ils n'ont pas proposé d'algorithmes mais ils ont énuméré toutes les permutations possibles pour trouver l'optimum. Et depuis 1970, les chercheurs se sont attelés à résoudre ces instances en proposant une variété de techniques citées dans l'état de l'art du 1^{er} chapitre de cette thèse. Résumons cette course vers la résolution de ces "benchmarks" en temps raisonnable, dans le tableau 14.

Taille	Auteurs	année	Technique utilisée	Temps
5,6,7,8	Nugent,Vollmann & Ruml	1968	Enumération totale des permutations	3374 sec (pour 8)
8	Burkard	1975	SEP avec la borne inférieure de Gilmore Lawler	0,426 sec
12	Burkard & Stratmann	1978	SEP perturbée avec la borne inférieure de Gilmore Lawler	29,325 sec
15	Burkard & Derigs	1980	SEP.	2947,32 sec
20	Clausen & Perregaard	1997	SEP parallèle	57,963 sec
24	Brünger, Marzetta, Clausen & Perregaard	1997	SEP parallèle	34 jours
25	Brünger & Marzetta	1997	SEP parallèle	91 jours
25	Hahn, Hightower & Johnson	1998	SEP avec une série de bornes inférieures.	66 jours

Tableau 14: Résolution des instances de Nugent

25	Anstreicher & Brixius	2000	SEP parallèle basé sur la programmation quadratique convexe.	6,7 heures
27	Anstreicher & Brixius	2000	SEP parallèle basé sur la programmation quadratique convexe.	24 heures
28	Anstreicher & Brixius	2000	SEP parallèle basé sur la programmation quadratique convexe.	4 jours & 8 h

Tableau 14 (suite): Résolution des instances de Nugent

Il ressort du tableau 14 qu'une augmentation de la taille du problème est accompagnée d'une augmentation effarante du temps, bien qu'il y a eu beaucoup d'efforts en techniques mathématiques et en matériels informatiques pour résoudre ces instances, citons l'exemple de l'instance 25 où le temps d'exécution est passé de 91 jours à 6,7 heures.

Relevons aussi la construction de benchmarks intermédiaires de ceux proposés par Nugent. Ces instances ont été déduites des premières en supprimant des lignes et des colonnes. En 1994, Mautor et Roucairol ont élaboré l'instance de 16 ressources, suivi quelques années plus tard, par la construction des instances de taille 14, 15, 17, 18, 21, 22, 24 et 25 par Clausen et Perregaard.

A ce jour, les solutions optimales des instances de tailles allant de 5 à 28 ont été résolues de façon optimale. L'instance de 30 ressources fait actuellement l'objet de tentative de résolution.

Actuellement, une librairie de toutes les instances de Nugent, compilées par Burkard, Karisch et Rendl en 1991, est disponible sur Internet. Cette librairie, appelée QAPLIB, est sur le site : <http://fmtbhopl.tu-graz.ac.at/~karisch/qaplib>

b. Application du RSM sur les instances de Nugent

Dans le but d'évaluer l'efficacité du Recuit à Sites Flottants utilisé pour résoudre le problème d'agencement multicritère, nous l'avons testé sur les instances de Nugent de dimensions 5, 6, 7, 8, 12, 14, 15, 16.a, 16.b, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25 et 30.

Ensuite, nous avons comparé les résultats obtenus avec les meilleures solutions connues à ce jour produites par les logiciels : *FATE* (développé par Block en 1978), *FLAC* (développé par Scriabin & Vergin en 1985), *TAA* (développé par Heragu & Kusiak en 1988), *AGTATE* (développé par Tate & Smith en 1992), *STEP* (développé par Wu-Ji Li en 1995) et *RA* (Recuit simulé Adapté pour agencement à sites fixes développé par Moussa & Si Ahmed en 1997).

Pour chaque dimension, l'agencement initial est généré aléatoirement, ensuite amélioré au fur et à mesure que l'algorithme s'exécute. Nous utilisons la permutation pour générer les nouvelles solutions. Les résultats obtenus sont repris dans le tableau 15.

<i>Taille</i>	<i>FLAC</i>	<i>FATE</i>	<i>TAA</i>	<i>AGTATE</i>	<i>STEP</i>	<i>RA</i>	<i>RSM</i>
5	25	26	25	25	26	25	25*
6	43	50 _{-1.6}	43	43	46	43	43*
7	74	78	74	74	74	74	74*
8	107	126 _{-1.7}	116	107	111	107	107*
12	289	326 _{-1.2}	314	289	289	289	289*
14	-	-	-	-	-	-	507*
15	585	660 _{-1.8}	596	575	592	575	575*
16.a	-	-	-	-	-	-	805*
16.b	-	-	-	-	-	-	620*
17	-	-	-	-	-	-	866*
18	-	-	-	-	-	-	965*
20	1303	1436 _{-1.3}	1414	1304	1317	1285	1285*
21	-	-	-	-	-	-	1219*
22	-	-	-	-	-	-	1798*
24	-	-	-	-	-	-	1744*
25	-	-	-	-	-	-	1872*
30	3079	3390 _{-1.6}	3326	3092	3115	3085	3071

Tableau 15: Performances du RSM sur les instances de Nugent

(*) : solution optimale prouvée [287].

Tableau 15: Performance du RSM appliqué pour résoudre les instances de Nugent

Nous constatons que les meilleurs solutions obtenus par le RSM sont les solutions optimales pour la plupart des instances. Ce qui confirme l'efficacité de cette heuristique dans la résolution du problème d'agencement.

4.5 APPLICATION DE L'AGM ET ANALYSE

Le rendement de l'AGM dépend des paramètres génétiques suivants: la sélection, la taille de la population et le nombre de générations. Nous appliquons l'algorithme d'ascension de collines pour les fixer à leurs meilleures valeurs.

4.5.1 Ascension de collines pour choisir les valeurs des paramètres

Le tableau 165 reprend les valeurs utilisées pour chaque paramètre.

- Probabilité de croisement: 0.25 ; 0.50 ; 0.75.
- Probabilité de mutation: 0.25 ; 0.50 ; 0.75.
- ~~Procédure de sélection : sélection aléatoire, sélection par la roue biaisée et la sélection par la moyenne.~~
- Procédure de sélection: sélection par la roue biaisée et la sélection par la moyenne, sélection aléatoire.
- taille de la population: 25, 50 et 100.
- le nombre de générations maximum: 100, 200 et 400

Tableau 165 : Eventails de valeurs pour les paramètres de L'AGM

De même que pour le RSM, nous avons utilisé le coût d'agencement pondéré et agrégé, vu que le rendement de l'AGM ne dépend pas de la forme du coût d'agencement qu'il soit agrégé ou pas.

Les valeurs initiales des paramètres sont données dans le tableau 17:

- Probabilité de croisement: 0.50
- Probabilité de mutation: 0.50
- Sélection par la roue biaisée aléatoire
- Taille de la population: 25
- Nombre maximum de générations: 100

Tableau 176 : Paramètres de L'AGM

Vu que la sélection aléatoire utilise la loi uniforme pour générer les probabilités de croisement et de mutation, alors nous avons effectué des exécutions de l'AGM en utilisant les sélections par la roue biaisée et par la moyenne, en faisant varier les probabilités de croisement et de mutation sur les fourchettes du tableau 16.

La variation des paramètres, selon l'algorithme d'ascension de collines et le [tableau 165](#), engendre [139](#) vecteurs de paramètres. Pour chacun de ces vecteurs et sur huit instances cellulaires, des exécutions sont réalisées et enregistrées. Au total, nous avons généré [80112](#) échantillons de taille égale à 10. Les résultats obtenus sont recensés dans le [tableau 18](#), où les meilleurs coûts sont en gras, et dans le [tableau 192](#), où sont portés les jugements sur les vecteurs de paramètres atteignant les meilleurs coûts d'agencement.

p	4	5	7	8	10	15	20	30
Fixer les probabilités de croisement et de mutation pour la sélection par roue biaisée								
Pc=0,25/Pm=0,75	<u>722</u>	80,62	<u>8,77</u>	<u>2210,22</u>	1000889,39	<u>21,40</u>	<u>26,15</u>	439,81
Pc=0,50/Pm=0,50	696,52	<u>85,95</u>	8,55	<u>2316,17</u>	<u>1000909,06</u>	20,89	<u>26,56</u>	<u>440,67</u>
Pc=0,75/Pm=0,25	<u>742,55</u>	<u>85,45</u>	<u>9,19</u>	2153,24	<u>1000944,66</u>	<u>21,09</u>	25,85	<u>445,30</u>
Fixer les probabilités de croisement et de mutation pour la sélection par moyenne								
Pc=0,25/Pm=0,75	730,33	<u>89,70</u>	8,03	2130,75	<u>1000923,66</u>	21,31	<u>26,15</u>	<u>440,14</u>
Pc=0,50/Pm=0,50	<u>752,82</u>	<u>86,66</u>	<u>9,10</u>	<u>2166,09</u>	1000879,86	<u>21,80</u>	<u>26,38</u>	<u>444,48</u>
Pc=0,75/Pm=0,25	<u>746,25</u>	84,83	<u>9,53</u>	<u>2246,76</u>	<u>1000935,67</u>	<u>21,81</u>	25,85	439,80
Fixer la procédure de sélection								
Aléatoire	610,80	78,48	8,09	1723,22	940,90	19,46	22,93	362,92
Roue b.	<u>722,456</u> <u>96,52</u>	<u>85,958</u> <u>0,62</u>	<u>8,558,77</u>	<u>2210,22</u> <u>2316,17</u>	<u>1000889909,3</u> <u>-3906</u>	<u>21,0408</u> <u>9</u>	<u>26,156</u>	<u>43940,8</u> <u>167</u>
Moyenne	<u>730,52,3</u> <u>382</u>	<u>89,70</u> <u>86,66</u>	<u>8,039,10</u>	<u>2130,66</u> <u>7509</u>	<u>1000923,879</u> <u>-686</u>	<u>21,3180</u>	<u>26,1538</u>	<u>4404,14</u> <u>8</u>
Fixer la taille de la population en utilisant la sélection aléatoire								
25	610,80	78,48	8,09	1723,22	940,90	19,46	22,93	362,92
50	<u>669,04</u>	<u>75,66</u>	<u>8,14</u>	1641,92	<u>1020,59</u>	<u>19,67</u>	<u>21,88</u>	<u>361,85</u>
100	<u>644,23</u>	75,66	8,08	<u>1725,20</u>	899,02	19,25	21,67	361,11
Fixer le nombre maximum de générations								
100	<u>644,23</u>	75,66	<u>8,08</u>	<u>1725,20</u>	<u>899,02</u>	<u>19,25</u>	<u>21,67</u>	<u>361,11</u>
200	592,31	75,66	<u>7,73</u>	<u>1650,56</u>	<u>904,59</u>	<u>18,73</u>	<u>21,54</u>	<u>348,87</u>
400	<u>601,39</u>	75,66	<u>7,71</u>	1550,03	789,60	18,14	21,40	347,15

Tableau 18: Meilleurs coûts d'agencements obtenus par l'algorithme Ascension de collines.

m	4	5	7	8	10	15	20	30
P								
Fixer les probabilités de croisement et de mutation pour la sélection par roue biaisée								
<u>Pc=0,25/Pm=0,75</u>	Meilleure*	Meilleure*		Meilleure*	Meilleure*	Meilleure	Meilleure*	
<u>Pc=0,50/Pm=0,50</u>			Meilleure*					Meilleure*
<u>Pc=0,75/Pm=0,25</u>								
Fixer les probabilités de croisement et de mutation pour la sélection par la moyenne								
<u>Pc=0,25/Pm=0,75</u>	Meilleure		Meilleure	Meilleure		Meilleure		
<u>Pc=0,50/Pm=0,50</u>					Meilleure			
<u>Pc=0,75/Pm=0,25</u>		Meilleure					Meilleure	Meilleure
Fixer la procédure de sélection								
Aléatoire	Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure
Roue b.								
Moyenne			Meilleure					
Fixer la taille de la population								
25	Meilleure							
50				Meilleure				
100		Meilleure*	Meilleure		Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure
Fixer le nombre maximum de générations								
100								
200	Meilleure							
400		Meilleure*	Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure	Meilleure

(*): Jugement établi grâce à la performance On line.

Tableau 192: Performances de meilleur coût obtenues par l'algorithme Ascension de collines.

(*): Jugement établi grâce à la performance On line.

Les probabilités de croisement et de mutation qui ont réalisé les meilleurs coûts sont: $P_c=0,25$ et $P_m=0,75$. Cependant la sélection aléatoire

génère de meilleurs coûts par rapport aux autres sélections.

Les valeurs des paramètres qui atteignent les meilleurs coûts sont donnés dans le tableau 19:

- | |
|--------------------------------------|
| - Procédure de sélection: aléatoire. |
| - Taille de la population: 100 |
| - Nombre maximum de générations: 400 |

**Tableau 207 : Les meilleures valeurs
des paramètres génétiques**

Sur les 11272 échantillons répartis en 139 populations, nous avons relevé les constatations suivantes:

- la procédure de sélection aléatoire atteint des solutions de qualité meilleure que les sélections par la roue biaisée et la moyenne. Ceci est expliqué par la diversité des individus (bons ou mauvais) participant à la construction des populations.
- Plus la taille de la population est grande, meilleure est la performance de l'AGM. Idem pour le nombre maximum de générations.

Les valeurs des paramètres génétiques qui ont engendrés les meilleurs agencements sont recensées dans le tableau 213. Il ressort que deux combinaisons donnent les meilleurs agencements pour les huit instances à travers les 11720 exécutions. Elles sont formées de:

- la sélection aléatoire, la taille de la population égale à 100 et le nombre de générations égal à 400,
- la sélection aléatoire, la taille de la population égale à 50 et le nombre de générations égal à 400,

m	Meilleur Coût	Sélection	Taille pop.	Nb génér.
4	592,31	aléatoire	100	200
5	75,66	Aléatoire	50 et 100	100, 200 et 400
7	7,61	Aléatoire	50	400
8	1550,03	Aléatoire	100	400
10	770,03	Aléatoire	50	400
15	18,14	Aléatoire	100	400
20	21,32	Aléatoire	50	400
30	347,15	Aléatoire	100	400

Tableau 213 : Meilleurs coûts obtenus par l'AGM

4.5.2 Analyse de sensibilité

Dans le but d'étudier la sensibilité des performances de l'AGM à ses paramètres génétiques, nous avons fait varier chaque paramètre dans son intervalle, indépendamment des autres paramètres. Ces paramètres sont: la procédure de sélection, la taille de la population et le nombre maximum de générations. Ils varient respectivement sur trois valeurs affichées dans la table [au 228](#). Le cas de base est le vecteur de paramètres obtenu au moyen de l'algorithme d'Ascension de collines.

- Procédure de Sélection : la roue biaisée, la moyenne , aléatoire.
- Taille de la population: 25, 50, 100.
- Nombre de générations: 100, 200, 400.

Table [au 228](#) : Fourchettes de variation des paramètres de l'AGM

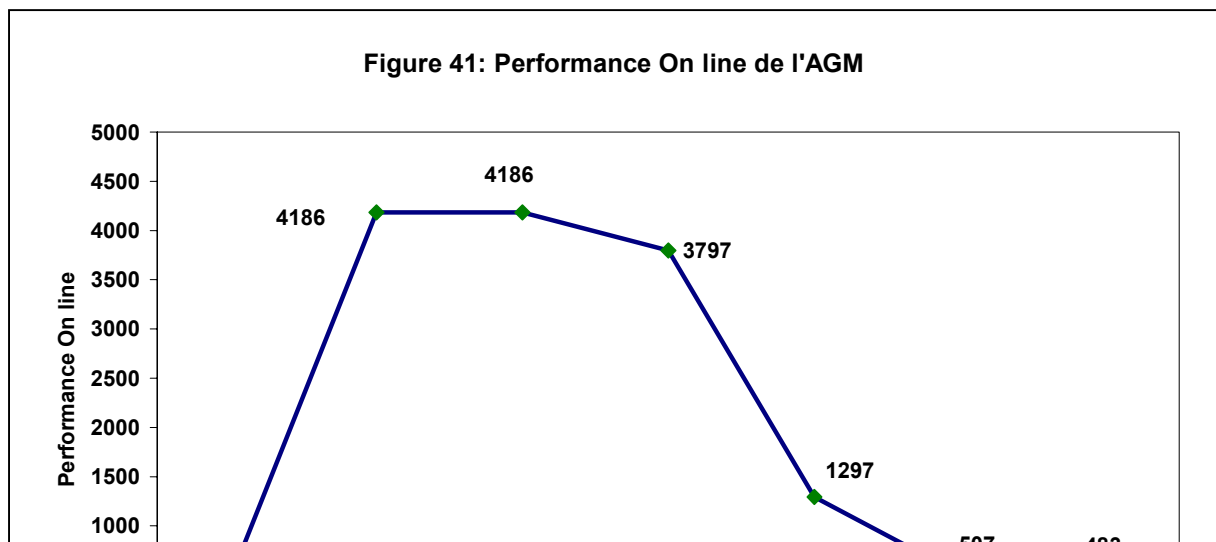
La variation des paramètres, autour du cas de base V_1 , a généré 6 vecteurs de paramètres, notés: $V_2, V_3, \dots, V_7$ (table [au 239](#)).

	Sélection	Taille population	Nombre générations
V_1	Aléatoire	100	400
V_2	Roue biaisée	100	400
V_3	Moyenne	100	400
V_4	Aléatoire	25	400
V_5	Aléatoire	50	400
V_6	Aléatoire	100	100
V_7	Aléatoire	100	200

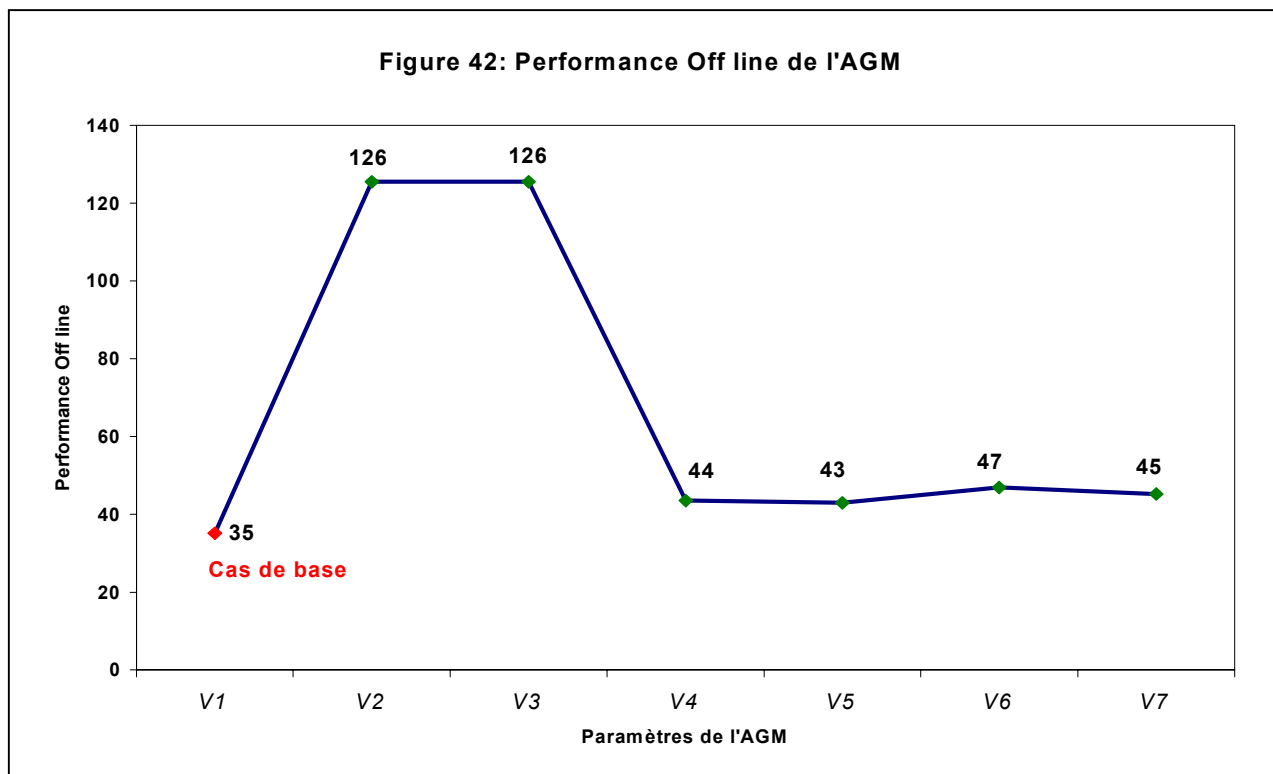
Table [au 239](#): Les vecteurs de paramètres générés

a. Résultats et interprétation

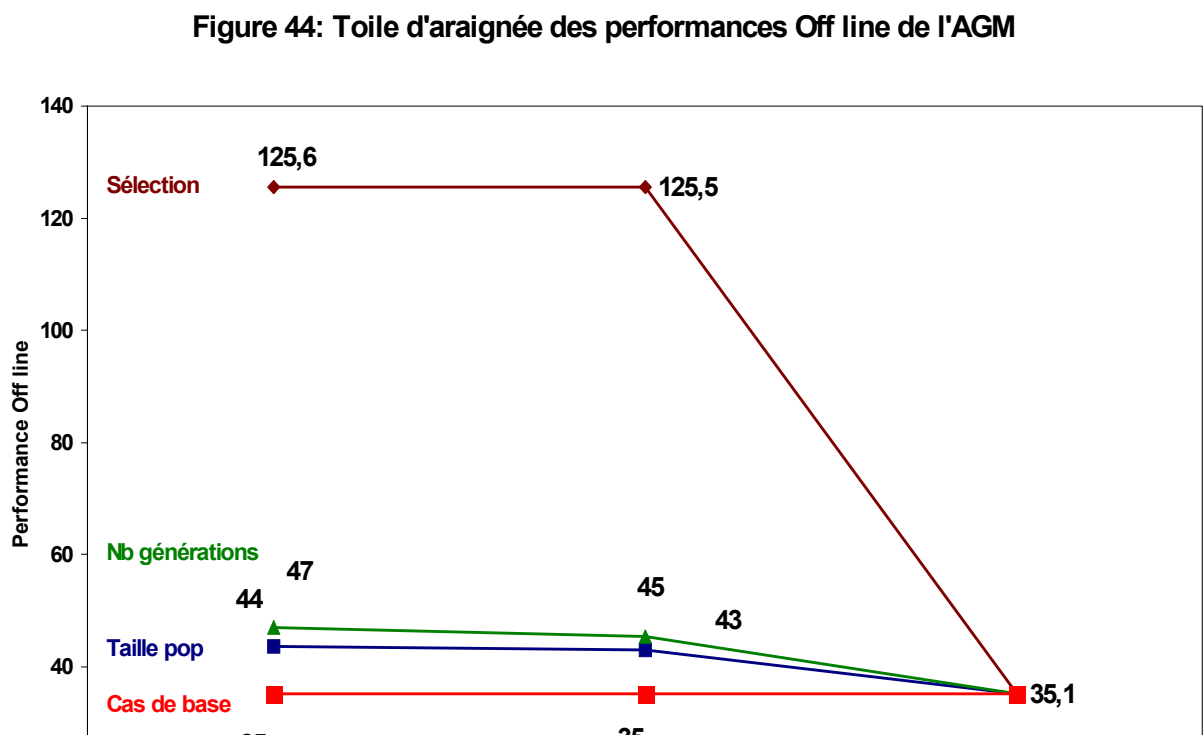
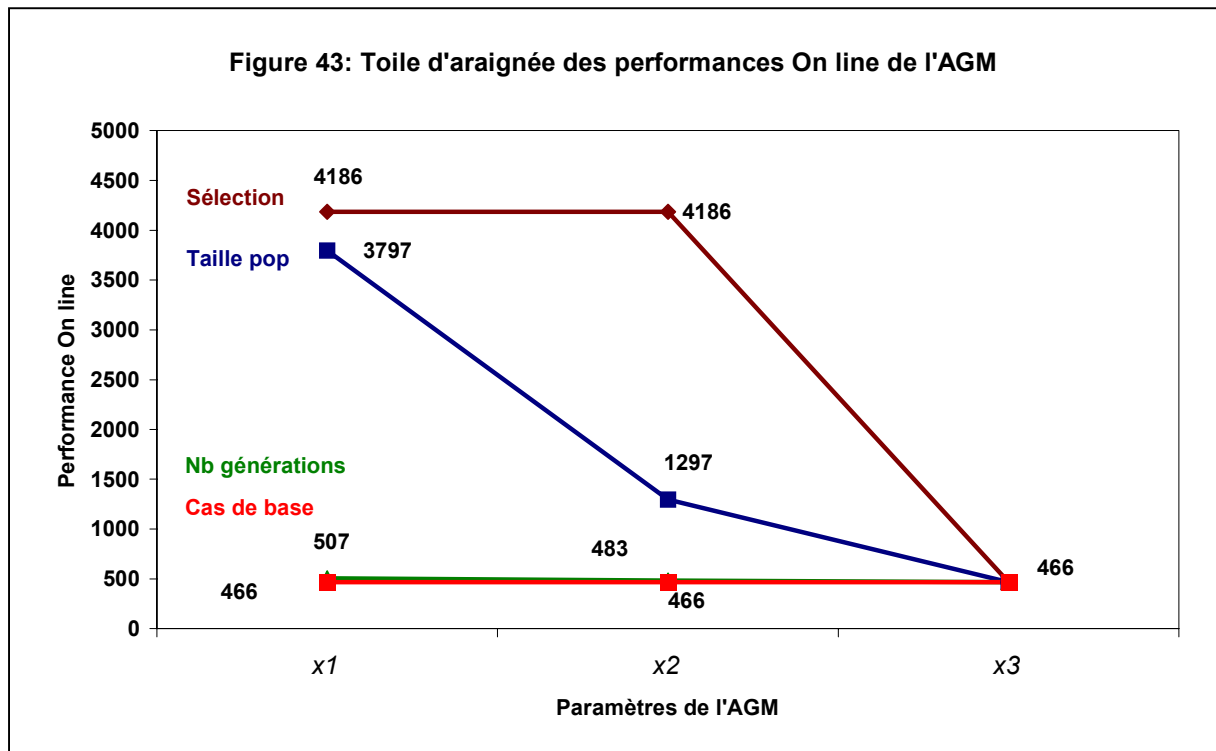
Les graphes 41 et 42 dressent les performances On line et Off line de l'AGM, obtenues de la variation des paramètres génétiques autour du cas de base V_1 .



Les performances on line et off line de ~~l'AGM+RSM~~ l'AGM sur les huit instances ont été évaluées et dressées dans les figures 37 et 38. Le détail de ces performances est repris dans les figures 39 et 40.



Les performances On line et Off line de l'AGM (cf. graphes 41 et 42) ont presque la même allure. Les vecteurs V_1 , V_6 , et V_7 réalisent des performances on line et off line meilleures que celles des autres vecteurs. Les points en commun entre ces trois vecteurs sont la sélection aléatoire et la taille de la population fixée à 100. Ces deux éléments sont probablement les plus influents sur l'AGM. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons dressé les toiles d'araignée des deux performances.



Sur les graphes 43 et 44, nous constatons:

- l'influence importante de la sélection sur les qualités des solutions, exprimées par les performances On line et Off line. Les sélections par roue biaisée et par la moyenne donnent approximativement les mêmes qualités de solutions. De plus, ces qualités sont mauvaises par rapport à celle engendrée par la sélection aléatoire. Ceci peut s'expliquer par la diversité qu'offre la sélection aléatoire en choisissant des individus sans aucun critère, donnant ainsi la chance aux mauvais parents susceptibles de procréer de meilleurs enfants.
- L'augmentation de la taille de la population influe sur la performance On line, contrairement au nombre de générations dont l'influence de l'augmentation est presque inexistante sur cette performance.
- Qu'inversement à la constatation précédente, le nombre de générations influe, légèrement mieux que la taille de la population, sur la performance Off line. Ceci peut s'expliquer par l'élargissement du champs des solutions à explorer, et donc, une plus grande probabilité de trouver de meilleures solutions.

4.6 COMPARAISON DES PERFORMANCES DU RSM ET DE L'AGM

Dans le but d'évaluer les performances des deux heuristiques sur le problème d'agencement statique, nous les avons comparées. Le tableau retrace les meilleures solutions obtenues par les deux algorithmes, appliqués sur les mêmes instances.

m	Meilleur Coût		Temps d'exécution (sec)	
	RSM	AGM	RSM	AGM
4	592.31	592.31	0.32	7.5
5	68.56 70.15	75.66	12.08	3.14
7	7.09	7.61	0.58	20.33
8	1529.11	1550.03	2.21	52.56
10	679.16	770.03	22.2	52.22
15	17.33	18.14	441.17	295.35
20	19.70	21.32	889.25	166.52
30	330.2.1531	347.15	1294.26	752.56

Tableau 24: Comparaison des performances du RSM et de l'AGM

Remarque: le pourcentage d'amélioration du RSM par rapport à l'AGM est calculé par la formule suivante:

$$\underline{\underline{\% \text{ amélioration}}} = \frac{(\text{Coût(AGM)} - \text{Coût(RSM)}) \times 100}{\text{Coût(RSM)}}$$

4.6.1 Constatations

Du point de vue de la performance "meilleure solution", le RSM est meilleur que l'AGM ~~avec un~~ ~~taux moyen d'amélioration totale du RSM sur l'AGM de 4%~~ ~~croissement~~. Les mauvais résultats obtenus par l'AGM par rapport au RSM sont probablement dus à la complexité du codage utilisé pour représenter un chromosome. En fait, c'est la complexité du problème d'agencement qui rend difficile et compliqué la tâche de codage.- Ajoutons à cela, la similitude existant entre le recuit physique et le problème d'agencement [62+0].

Les temps d'exécution des deux heuristiques sont négligeables et se rapprochent.

4.7 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à quelques applications des méthodes proposées au chapitre précédent sur des instances cellulaires. Nous avons décrit deux applications de l'AHP pour quantifier les mesures de proximité et les poids des critères d'agencement. Ensuite, nous avons analysé le comportement du RSM et de l'AGM face à des instances cellulaires de taille allant de 4 à 30 ressources. Une comparaison des performances de ces deux heuristiques montrent ~~nt~~ que le RSM est meilleur que l'AGM. Nous pouvons expliquer cette supériorité par l'analogie existant entre le problème d'agencement et le recuit physique. ~~Cette méthode prouve encore une fois sa capacité à résoudre n'importe quelle variante du problème d'agencement statique.~~

CHAPITRE 5:

INTRODUCTION A

L'AGENCEMENT DYNAMIQUE MULTICRITERE

5.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous introduisons le problème d'agencement dynamique multicritère des systèmes de fabrication, qui est une généralisation du problème d'agencement statique sur plusieurs périodes de production. Nous ne connaissons aucune publication traitant ce problème, contrairement au cas dynamique monocritère, qui a fait l'objet de plusieurs travaux [62] et [5]. Pour son étude, nous proposons d'appliquer le Recuit Simulé, qui a présenté de bonnes performances sur le problème d'agencement statique multicritère. Cette méthode considère les formes agrégées et non agrégées des critères de la famille F , détaillées dans le chapitre 2 pour le cas statique.

5.2 MODES D'AGENCEMENT DES SYSTEMES DYNAMIQUES

Dans un système de production dynamique à environnement déterministe, il existe deux modes d'agencement multipériodique:

5.2.1. Agencement robuste

C'est un agencement fixe durant l'horizon de planification qui résiste aux fluctuations de la demande variant sous forme de scénarios à réaliser. A Chaque scénario correspond une ou plusieurs configurations optimales. La configuration robuste à trouver, doit être proche des configurations optimales des différents scénarios sans être nécessairement égale à l'une d'elles. Ce mode d'agencement est adopté lorsque les coûts de réagencement sont trop élevés.

Les lignes automatisées de peinture, les machines de mesures et de contrôle de qualité ainsi que les machines de nettoyage des produits sont des exemples de ressources à fort coût d'installation.

5.2.2. Agencement dynamique

Lorsque les coûts de réagencement ne sont ni négligeables ni élevés, le concepteur doit viser un agencement flexible du système de fabrication. C'est à dire: un système apte à changer de configuration afin de produire un plus grand nombre de types de produits et accroître la rentabilité du système. Le concepteur doit trouver une configuration du système pour chaque scénario de demande, à maintenir durant une période donnée.

Le choix du mode d'agencement à adopter durant un horizon de planification connu se pose au concepteur. Nous tenterons de résoudre ce problème dans ce qui suit.

5.3 POSITION DU PROBLEME

Le problème d'agencement dynamique multicritère se pose comme suit :

Soit un système dynamique de fabrication qui vérifie les hypothèses suivantes :

- L'horizon de planification est partagé en H périodes de temps égales dont la durée se mesure en mois, en trimestre ou en année selon le type de produits à fabriquer.
- Les scénarios de demande Sc_i , $i=1$ à H , sont parfaitement connus et s'appliquent au système d'une manière séquentielle sans chevauchement dans le temps.
- Le réagencement des ressources est réalisé entre la fin d'un scénario et le début du suivant. Durant ce temps, le système est partiellement ou totalement improductif.

Il s'agit donc de sélectionner un agencement convenable pour chaque période dont l'enchaînement constitue une séquence d'agencements $\{A_1^*, A_2^*, \dots, A_H^*\}$ qui:

- Minimise le temps et le coût total de fabrication durant l'horizon de planification. Ces deux critères englobent respectivement le temps et le coût de fabrication dans chaque période, les temps et les coûts de réagencements, les temps improductifs et leurs coûts.
- Maximise la relation de proximité inter ressources durant l'horizon de planification.

Lorsque ces agencements sont identiques, la séquence est appelée agencement robuste.

5.4 FORMULATION MATHÉMATIQUE

5.4.1 Contraintes d'agencement

Le problème d'agencement dynamique multicritère est soumis aux mêmes contraintes que le problème statique (voir section 2.3.1. du chapitre 2). La violation de ces contraintes est ajoutée au coût total de la séquence d'agencements, pour pénaliser les solutions qui ne les respectent pas.

5.4.2. Coût agrégé de la séquence d'agencements

Etant donnée une séquence d'agencements S telle que $S = \{A_1, A_2, \dots, A_H\}$.

Le coût de cette séquence $C(S)$, est exprimé par: l'agrégation des critères C_1^h , C_2^h et C_3^h de la famille F de chaque période h , la violation des contraintes d'agencement et éventuellement les coûts de réagencement Cr . Il est donné par la formule suivante:

$$C(S) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left[(\alpha_1^h \times c_{ij}^h + \alpha_2^h \times t_{ij}^h - \alpha_3^h \times r_{ij}^h) \times f_{ij}^h \times d_{ij}^h + (\Delta_{ij}^h + \mu_i^h) \times \lambda^h \right] + Cr \quad (33)$$

$$\text{avec: } Cr = \begin{cases} \sum_{h=1}^{H-1} \left(\sum_{i=1}^m (\beta_i + \gamma_i) \times \partial_i^{h,h+1} + \Pi^{h,h+1} + \Pi^{h,h+1} \right) & \text{si } A_h \neq A_{h+1} \text{ } h \in \{1..H-1\} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les violations des contraintes sont exprimées par:

$$\Delta_{ij}^h = \begin{cases} D_s - d_{ij}^h & \text{si } d_{ij}^h \leq D_s \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$\mu_i^h = \begin{cases} Li + xi - a & \text{si } Li + xi \geq a \\ li + yi - b & \text{si } li + yi \geq b \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

H : le nombre de périodes dans l'horizon de planification.

λ^h : un paramètre de très grande valeur de la période h .

α_i^h : le poids du critère i durant la période h .

β_i (resp. γ_i): le coût (resp. le temps) de déplacement unitaire normalisé de la ressource i vers un autre emplacement.

$\partial_i^{h,h+1}$: la distance séparant le site de la ressource i dans la période h de celui de la période $h+1$.

$\Pi^{h,h+1}$ (resp. $\Pi^{h,h+1}$): le coût du temps improductif (resp. le temps improductif) normalisé séparant les périodes h et $h+1$.

Δ_{ij}^h : la violation de la contrainte de chevauchement par les ressources i et j .

μ_i^h : la violation des contraintes de débordement sur les limites de la cellule.

5.4.3. Coût non agrégé de la séquence d'agencements

Le coût d'une séquence d'agencement S est un vecteur à 3 composantes $(C_1(S), C_2(S), C_3(S))$,

$$C_1(S) = \sum_{h=1}^H \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (c_{ij}^h \times f_{ij}^h \times d_{ij}^h + \lambda^h \times \Delta_{ij}^h) + \lambda^h \times \sum_{i=1}^m \mu_i^h \right] + Cr_1$$

comme suit:

$$C_2(S) = \sum_{h=1}^H \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (t_{ij}^h \times f_{ij}^h \times d_{ij}^h + \lambda^h \times \Delta_{ij}^h) + \lambda^h \times \sum_{i=1}^m \mu_i^h \right] + Cr_2 \quad (34)$$

$$\text{et } C_3(S) = - \sum_{h=1}^H \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (r_{ij}^h \times f_{ij}^h \times d_{ij}^h + \lambda^h \times \Delta_{ij}^h) + \lambda^h \times \sum_{i=1}^m \mu_i^h \right] + Cr_1$$

Avec:

$$Cr_1 = \begin{cases} \sum_{h=1}^{H-1} \left(\sum_{i=1}^m \beta_i \times \partial_i^{h,h+1} + \Pi^{h,h+1} \right) & \text{si } A_h \neq A_{h+1} \quad h \in \{1 \dots H-1\} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Cr_2 = \begin{cases} \sum_{h=1}^{H-1} \left(\sum_{i=1}^m \gamma_i \times \partial_i^{h,h+1} + \Pi^{h,h+1} \right) & \text{si } A_h \neq A_{h+1} \quad h \in \{1 \dots H-1\} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Cr_1 représente les coûts de réagencement y compris les coûts des temps improductifs.

Cr_2 représente les temps de réagencement y compris les temps improductifs.

En vertu de la proposition 1 du chapitre 2, étant données deux séquences d'agencements S et S' , la séquence S est préférée à S' si et seulement si S réalise un accroissement lent par rapport à S' sur tous les critères de l'horizon de planification, comme suit:

$$\left\{ i / C_i(S') - C_i(S) > 0 \right\} \cap \left\{ j / C_j(S) - C_j(S') > 0 \right\} \neq \emptyset \quad (35)$$

α_i étant le poids moyen (la moyenne des α_i^h) du $i^{\text{ème}}$ critère sur tout l'horizon de planification.

5.5 METHODE DE RESOLUTION

La complexité du problème d'agencement dynamique multicritère nous a incité à proposer le recuit simulé pour trouver des séquences d'agencements de coûts acceptables durant l'horizon de planification. Cette méthode permet de choisir le mode d'agencement adéquat (robuste ou dynamique) qui optimise les critères de la famille F [5].

L'algorithme du Recuit Simulé Dynamique Multicritère (RSDM) est le suivant:

Algorithme RSDM

1. Pour chaque période h , calculer au moyen de l'AHP les poids des critères α_i^h (si nécessaire) et des r_{ij}^h ;
2. Appliquer le RSM sur chaque période h , pour générer son meilleur agencement A^h de coût $C(A^{h,1})$;
3. Poser la séquence initiale d'agencements $S^0 = \{A^1, A^2, \dots, A^H\}$ de coût $C(S^0)$;
4. $Coût_seq_optimale := C(S^0)$; $seq_optimale := S^0$; $S := S^0$; S est la séquence courante;
5. $Coût_seq_robuste := C(A^{h,1})$; $seq_robuste := A^{h,1}$;
6. Initialiser les paramètres de contrôle du recuit: la température initiale et finale T et T_f , le nombre d'agencements à traiter par palier L_p le palier de température et un compteur d'agencements N .
7. **Tant que** ($T > T_f$) faire
 début
 Tant que ($N \leq L_p$) faire
 Début
 Générer un agencement A de manière aléatoire;
 Calculer le coût de la séquence robuste $C(S^A)$;
 Si ($C(S^A) < Coût_seq_robuste$) ou (S^A surclasse $seq_robuste$) alors
 Début $Coût_seq_robuste := C(S^A)$; $seq_robuste := S^A$; fin;
 Trouver la meilleure affectation de A dans la séquence d'agencements courante S ;
 Soit S' la séquence courante contenant l'agencement A ;
 Evaluer selon le cas Δ_1 ou Δ_2
 Si agrégation des critères alors $\Delta_1 = C(S') - C(S)$
 Sinon, $\Delta_2 = d(S', S)$, d étant le degré de surclassement de S' sur S
 Si ($\Delta_1 < 0$) ou (($\Delta_2 > 0$)) alors début $S := S'$; $C(S) := C(S')$; fin
 Si $C(S') < Coût_seq_optimale$ ou ($d(seq_optimale, S') > 0$) alors
 début $seq_optimale := S'$; $Coût_seq_optimale := C(S')$; fin
 Sinon début
 Générer un nombre aléatoire $p \in [0, 1]$;
 Si agrégation des critères alors $\Delta = -\Delta_1$
 Sinon, $\Delta = \Delta_2$
 Si ($p < \exp(\Delta/T)$) alors début $S := S'$; $C(S) := C(S')$; fin
 Fin;
 $N := N + 1$;
 Fin tant que;
 T diminue;

Vu que le RSDM manipule des séquences d'agencements, la transformation élémentaire utilisée est la génération aléatoire d'un agencement, qui est ensuite inséré dans la séquence en cours.

Cet algorithme présente l'avantage de traiter toutes les formes d'évaluation multicritère des agencements: forme agrégée (pondérée ou pas) et forme vectorielle (pondérée ou pas). Il propose en fin d'exécution le mode d'agencement adéquat, c'est-à-dire un agencement robuste ou un agencement dynamique.

5.5.1 Choix des valeurs des paramètres de contrôle du RSDM

Pour fixer les paramètres de contrôle à leurs meilleures valeurs, nous proposons d'utiliser l'algorithme d'ascension de collines, détaillé dans la section 3.6.2 du chapitre 3.

5.6 CONCLUSION

Nous avons introduit dans ce chapitre, le problème d'agencement dynamique multicritère. Nous avons donné une formulation mathématique en mettant l'accent sur les différentes formes d'évaluation des critères. Pour sa résolution, nous avons proposé d'utiliser le recuit simulé, appliqué avec succès sur le cas statique.

Pour les travaux futurs, il serait intéressant d'étudier ce problème dans un environnement aléatoire, en considérant:

- Les incertitudes dans les scénarios de demandes.
- Les probabilités d'apparition de plusieurs scénarios pour chaque période.
- Les incertitudes dans les durées des scénarios causées par les aléas de la fabrication.
- Les incertitudes dans les dates d'arrivée des scénarios pouvant engendrer des chevauchements dans le temps entre les scénarios [62].

CONCLUSION GENERALE

Dans une cellule flexible de fabrication, plusieurs critères peuvent être considérés pour évaluer un agencement donné. Ces critères se répartissent en deux aspects: qualitatif et quantitatif. La modélisation de l'aspect qualitatif doit maximiser les souhaits du manager tout en se rapprochant de la réalité des ateliers de production. Cependant, elle est confrontée à la difficulté de réunir et d'évaluer tous les facteurs intrants.

Dans cette thèse, nous avons recensé les critères d'agencement les plus importants et nous avons proposé deux applications de la méthode de hiérarchie multicritère (AHP) pour quantifier les critères qualitatifs et évaluer les poids des critères d'agencements. Cette méthode est réputée à travers ses applications dans différents domaines, pour être un moyen puissant de modélisation des situations complexes et conflictuelles.

Nous avons traité, en seconde étape, l'agencement statique multicritère dans une cellule flexible de fabrication, dotée d'une configuration multiligne à sites flottants. Nous avons proposé une nouvelle application du Recuit Simulé et un algorithme génétique dans le cas statique multicritère du problème d'agencement dans une cellule de fabrication. Ces applications prennent en considération la forme des coûts d'agencement: pondérés, non pondérés, agrégés et non agrégés.

Une étude comparative entre les deux applications a montré que le Recuit est meilleur que le génétique pour ce problème. De plus, les résultats obtenus par le Recuit sur les instances de Nugent sont très satisfaisants. Ainsi, le Recuit Simulé confirme sa réputation d'être une bonne heuristique pour tous les types de problèmes d'agencement. Et cela, grâce à la similitude existant entre le Recuit physique et le problème d'agencement.

Les bonnes performances du Recuit, nous ont incité à proposer une variante de cette heuristique permettant l'obtention de bonnes séquences d'agencements pour le problème d'agencement dynamique multicritère.

Comme perspective à ce travail, nous suggérons d'étudier une éventuelle application de l'AHP sur le cas dynamique lorsque les pondérations varient d'une période à une autre. Il serait également intéressant d'étudier le problème d'agencement dynamique multicritère aléatoire, où les scénarios de demandes varient aléatoirement durant l'horizon de planification. Et vu la complexité du problème, il serait intéressant d'investir dans la parallélisation des méthodes de résolution.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Abbas, M., et Si Ahmed, D., "Aspects quantitatifs et qualitatifs du problème d'agencement statique dans une cellule flexible de fabrication", 1ères journées d'Informatique pour l'Entreprise, JIE1'02, Blida, 2002.
- [2] Abbas, M., et Si Ahmed, D., "A new algorithm to solve multicriteria dynamic and static facility layout problem", en préparation.
- [3] Anstreicher, K. M., et Bixius, N. W., "Solving quadratic assignment problems using convex quadratic programming relaxations", 2001, Rapport de l'université de l'Iowa, site internet: [Http://www.biz.uiowa.edu/faculty/anstreicher/qapqp2.ps](http://www.biz.uiowa.edu/faculty/anstreicher/qapqp2.ps)
- [4] Armour, G. C., et Buffa, E. S., "A heuristic algorithm and simulation approach to relative location of facilities", *Management Science*, vol. 9, n°1, pp. 294-309, 1963.
- [5] Aït Zaï, A., "Agencement statique et dynamique des systèmes flexibles de production", thèse de Magister en Informatique, l'U.S.T.H.B., 1998.
- [6] Andijani, A. A., "A multi-criterion approach for Kanban allocations", *OMEGA: International Journal of management science*, vol. 26, n°4, pp.483-493, 1998.
- [7] Ahuja, R. K., Orlin, J. B., et Tiwari, A., "A greedy genetic algorithm for the quadratic assignment problem", Rapport Indian institute of technology (India) and Massachusetts Institute of Technology (USA), 1995.
- [8] Bennisroune, A., et Mecheri, Y., "Contribution à la conception d'une cellule flexible de fabrication", mémoire d'ingénieur d'état en informatique, Institut National d'Informatique, 1995.
- [9] Boulif, M., "La composition des cellules flexibles dans les systèmes cellulaires de production statiques et dynamiques", Thèse de magister en informatique, laboratoire d'instrumentation et génie des systèmes, USTHB, 2000.
- [10] Bachelet, V., Preux, P., et Talbi, E., "Parallel hybrid Meta-heuristics: Application to the quadratic assignment problem", Rapport du laboratoire d'informatique fondamentale de Lille, France, Mai 1996.
- [11] Dagnelie, P., "Théorie et méthodes statistiques", vol. 2, les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 1975.
- [12] Drezner, Z., "A heuristic procedure for the layout of a large number of facilities", *Management Science*, vol. 33, n° 7, pp.907-915, 1987.
- [13] Dutta, K. N., et Sahu, S., "A multigoal heuristic for facilities design problems: MUGHAL", *International Journal of Production Research*, vol. 20, n°2, pp.147-154, 1982.
- [14] De Toni, A., et Tonchia, S., "Manufacturing flexibility : a literature review", *International Journal of Production Research*, vol. 36, n° 6, pp.1587-1617, 1998.

- [15] Evans, G. W., Wilhelm, M. R., et Karwowski, W., "A layout design heuristic employing the theory of fuzzy sets", *International Journal of Production Research*, vol. 25, n° 10, pp.1431-1450, 1987.
- [16] Fourastie, J., et Laslier, J. F., "*Probabilités et statistiques*", Edition Dunod, 3ème édition, 1987.
- [17] Foulds, L.R., "Techniques for facilities layout : deciding which pairs of activities should be adjacent", *Management Science*, vol. 29, n° 12, pp.1414-1426, 1983.
- [18] Gupta, Y. P., Gupta, M.C., Kumar, A. K., et Sundram, C., "Minimizing total intercell and intracell moves in cellular manufacturing: a genetic algorithm approach", *International Journal Computer Integrated Manufacturing*, vol. 8, n° 2, pp 92-101, 1995.
- [19] Goldhar, J. D., et Jelinek, M., "Computer integrated flexible manufacturing: organizational, economic, and strategic implications", *Interfaces* vol. 15, n° 3 pp. 94-105, 1985.
- [20] Gravel, M., Kiss, L., Martel, J.M. et Price, W.L., "A DSS for production planning", *International Transactions in Operational Research*, vol. 1, n° 3, pp.363-373, 1994.
- [21] Gravel, M., Martel, J. M., Nadeau, R., Price, W., et Tremblay, R., "A multicriterion view of optimal resource allocation in Job Shop production", *European journal of Operational research*, vol. 61, pp 230-244, 1992.
- [22] Goldberg, D. E., "*Algorithmes génétiques: Exploration, optimisation et apprentissage automatique*", Editions Addison Wesley, France, juin 1994.
- [23] Goldberg, D. E., "Genetic and evolutionary algorithms in the real world", D.G.E., Illegal report n°99013, mars 1999.
- [24] Gavett, J. W. et Plyter, N.V., "The optimal assignment of facilities to locations by branch and bound", *Operations research*, vol. 14, pp 210-232, 1966.
- [25] Gravel, M., et Price, W. L., "Règles de décision pour l'ordonnancement multi objectifs dans un atelier d'assemblage", *INFOR*, vol. 31, n° 2, 1993.
- [26] Gambardella, L. M., Taillard, E.D. et Dorigo, M., "ANT colonies for the quadratic assignment problem", Rapport technique IDSIA-4-97, Lugano, Suisse.
- [27] Graves, G. W., et Whinston, A. B., "An algorithm for the quadratic assignment problem", *Management Science* vol. 17, n° 7, pp.280-284, mars 1970.
- [28] Hahn, P., "Progress in solving the Nugent instances of the quadratic assignment problem", 2001, Site internet: www.imm.dtu.dk/~sk/qaplib/ins.html
- [29] Hassan, M. M. D., "Machine layout problem in modern manufacturing facilities", *International Journal of Production Research*, vol. 32, n° 11, pp.2559-2584, 1994.
- [30] Hahn, P., Grant, T., et Hall, N., "A branch and bound algorithm for the quadratic assignment problem based on the hungarian method", *European Journal of Operational Research*, vol. 108, pp 629-640, 1998.
- [31] Hahn, P., Hightower, W. L., Johnson, T. A., Spielberg, M. G., et Roucairol, C., "Tree

- elaboration strategies in branch and bound algorithms for solving the quadratic assignment problem", submitted for publication to Discrete mathematics. Site internet: [Http://www.seas.upenn.edu/~hahn](http://www.seas.upenn.edu/~hahn)
- [32] Heragu, S. et Kusiak, A., "Machine layout : an optimization and knowledge-based approach", *International Journal of Production Research*, vol. 28, n° 4, pp.615-635, 1990.
 - [33] Harker, P. T., et Vargas, L. G., "The theory of ratio scale estimation : Saaty's analytic hierarchy process", *Management Science* vol. 33, n° 11, pp.1383-1403, novembre 1987.
 - [34] Islier, A. A., « A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design », *International Journal of Production Research*, vol. 36, n° 6, pp.1549-1569, 1998.
 - [35] Jacobs, F.R., "A layout planning system with multiple criteria and a variable domain representation", *Management Science*, vol. 33, n° 8, pp.1020-1035, Août 1987.
 - [36] Kazuhiro, Kado, "An investigation of genetic algorithms for facility layout problems", thèse de magister en philosophie, université d'Edimbourg, 1995.
 - [37] Kettef, F. Z., "Présentation des algorithmes génétiques", Rapport interne n°146, Université François Rabelais, Tours, France.
 - [38] Kusiak, A., et Heragu, S., "the facility layout problem", *International Journal of Production Research*, vol. 29, pp.229-251, 1987.
 - [39] Legras, J., "Méthodes et techniques d'analyse numérique", Edition Dunod, Paris, 1971.
 - [40] Maniezzo, V., "Exact and approximate non deterministic tree-search procedures for the quadratic assignment problem" Rapport technique CSR 98-1, C.L à Scienze dell'Informazione, Università di Bologna, Sede di Cesena, Italie, 1998
 - [41] Malakooti, B., et D'souza, G. I., "Multiple objective programming for the quadratic assignment problem", *International Journal of Production Research*, vol. 25, n° 2, pp.285- 300, 1987.
 - [42] Meller, R. D., et Gau, K. Y., "Facility layout objective functions and robust layouts", *International Journal of Production Research*, vol. 34, n° 10, pp 2727-2742, 1996.
 - [43] Meller, R.D., et Gau, K.Y., "The facility layout problem : recent and emerging trends and perspectives", *Journal of Manufacturing systems*, vol. 15, n° 5, pp351-366, 1996.
 - [44] Moussa, S. et Si Ahmed, D., "Agencement optimal des ressources dans une cellule flexible de fabrication", mémoire d'ingénieur en Recherche Opérationnelle, l'U.S.T.H.B, 1997.
 - [45] Nugent, C. E., Vollman, T. E. et Ruml, J., "An experimental comparison of techniques for the assignment of facilities to locations", *Operations research*, vol. 16, pp 150-173, 1968.
 - [46] Osyczka, A., "Min-Max approach to multicriterion optimization problem", *Numerical methods for engineering, G.A.M.N.I.Z.*, publié sous la direction de E. ABSI, R. Glowinski, P. Lascaux, H. Veyseyre, vol 5, n°9, tome 2, pp. 935-945.
 - [47] Ouznadji, A., et Atmani, T. K., "Optimisation de la programmation du personnel navigant SNTM/CNAN", mémoire d'ingénieur en Recherche Opérationnelle, juin 1991.

- [48] Pirlot, M., "General local search heuristics in combinatorial optimization: a tutorial", *Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science*, vol. 32, n°1-2, pp7-53.
- [49] Parkan, C., et Wu, M. L., "Process selection with multiple objective and subjective attributes", *Production Planning and Control*, vol. 9, n° 2, pp.189-200, 1998.
- [50] Rosenblatt, M. J., "The facilities layout problem : a multi-goal approach", *International Journal of Production Research*, vol. 17, n° 4, pp.323-332, 1979.
- [51] Rajasekharan, M., Peters, B. A. , et Yang, T., "A genetic algorithm for facility layout design in flexible manufacturing system", *International Journal of Production Research*, vol. 36, n° 1, pp.95-110, 1998.
- [52] Richardson, P. R., Taylor, A. J., et Gordon, J. R. M., "A strategic approach to evaluating manufacturing performance", *Interfaces* vol. 15, n° 6, pp.15-27, 1985.
- [53] Saaty, T. L., "A scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures", *Journal of Mathematical psychology* , vol. 15, 234-281, 1977.
- [54] Saaty, T. L., "*Décider face à la complexité*", Entreprise moderne d'édition Paris 1984.
- [55] Saaty, T. L., "Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process", *Management Science* Vol.32, n°7, Juillet 1986.
- [56] Saaty, T. L., "*Decision Making with Dependence and Feedback : The analytic network process*" RWS Publications, Pittsburgh, USA, 1996.
- [57] Saadoun, M., " Améliorer la performance de l'entreprise: Technologies de l'information et de la communication", rapport de séminaire à l'Institut Supérieur de Gestion et de Planification Algérie, Mai 2000.
- [58] Stützle, T., et Dorigo, M., "ACO algorithms for the quadratic assignment problem", rapport IRIDIA, université Libre de Bruxelles, 1999. A apparaître dans D. Corne, M. Dorigo et F. Glover editors: *New ideas in Optimization*, Mc Graw-Hill.
- [59] Seung, R. K., "Multiobjective decision making model for a flexible manufacturing system", *Flexible manufacturing systems : Methods and Studies*, pp.165-172, 1986.
- [60] Sahni, S., et Gonzalez, T., "P-complete Approximation Problems", *Journal of the association for Computing Machinery*, vol. 23, n° 3, pp.555-565, juillet, 1976.
- [61] Shang, J. S., "multicriteria facility layout problem : an integrated approach", *European Journal of Operational Research* vol. 66, pp.291-304, 1993.
- [62] Souilah, A., « *Les systèmes cellulaires de production ; Agencement inter-cellules* », thèse de Doctorat en science de l'ingénieur de l'université de Metz, France, 1994.
- [63] Schnecke, V., et Vornberger, O., "Hybrid Genetic Algorithmes for constrained placement problems", *IEEE transactions on Evolutionary computation*, vol. 1, n°4, pp 266-277, Novembre 1997.
- [64] Talbi, E., "Meta heuristiques pour l'optimisation combinatoire multi-objectifs: Etat de l'art",

- DRAFT*, Université des Sciences et Technologie de Lille, France, pp 2-56, 1999.
- [65] Tam, K.Y., "Genetic algorithms, function optimization, and facility layout design", *European Journal of Operational Research*, vol. 63, pp322-346, 1992.
- [66] Tarondeau, J.C., "Les trois âges de la stratégie industrielle", *Revue française de Gestion*, pp 29-38, juin- juillet-août 1982.
- [67] Taillard, E. D., et Gambardella, L. M., "Adaptive memories for the quadratic assignment problem", rapport technique IDSIA-87-97, Lugano, Suisse, 1997.
- [68] Tate, D. M., et Smith, A. E., "A genetic approach to the quadratic assignment problem", *Computers & Operations Research*, vol. 22, n° 1, pp 73-83, 1995.
- [69] Urban, T. L., "A multiple criteria model for the facilities layout problem ", *International Journal of Production Research*, vol. 25, n° 12, pp.1805-1812, 1987.
- [70] Vincke, Ph., "*L'aide multicritère à la décision*", Editions Ellipses, 1998.
- [71] Zahedi, F., "The analytic hierarchy process- A survey of the method and its applications", *Interfaces* vol. 16, n° 4, pp.96-108, 1985.

ANNEXES

I. COMPLEMENTS SUR L'AHP

I.1 Table des comparaisons binaires de Saaty

25 contient

DEGRE	DEFNITION	EXPLICATION
1		
3	ar rapport	
5		favorisent for un autre.
7		
9		Les preuves que possible.
2, 4, 6, 8		

.

RC

globales relatives P^j M^j de dimension r
 C_j
 re suivante:

Pour chaque niveau k faire

Pour chaque matrice M^j faire :

1. Calculer V^j par : $V^j = M^j \times P^j$.

2. Calculer D^j par : $D^j = \frac{V^j}{p^j}$

3. Calculer I_{max} par : $\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^r D^j_i}{r}$

4. : $IC = \frac{\lambda_{max} - r}{r}$

5. : $RC = \frac{IC}{V_a(r)}$, V_a

6. Si $RC \leq$

7. Sinon, reclasser les alternatives selon P^j R dans la

Remarques:

□ $V_a(r)$ r .

Cette valeur est lue sur le tableau 26.

Taille matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_a(r)$	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

- l_{max} est la valeur propre maximum de la matrice M^j et le vecteur G^j est le vecteur propre
- c_j la matrice M^j est consistante (i.e. $M^j_{il}=M^j_{ik} \times M^j_{kl}$ pour tout i,k et l) alors l_{max} M^j .

inco

II. MEILLEURS AGENCEMENTS OBTENUS PAR LE RSM

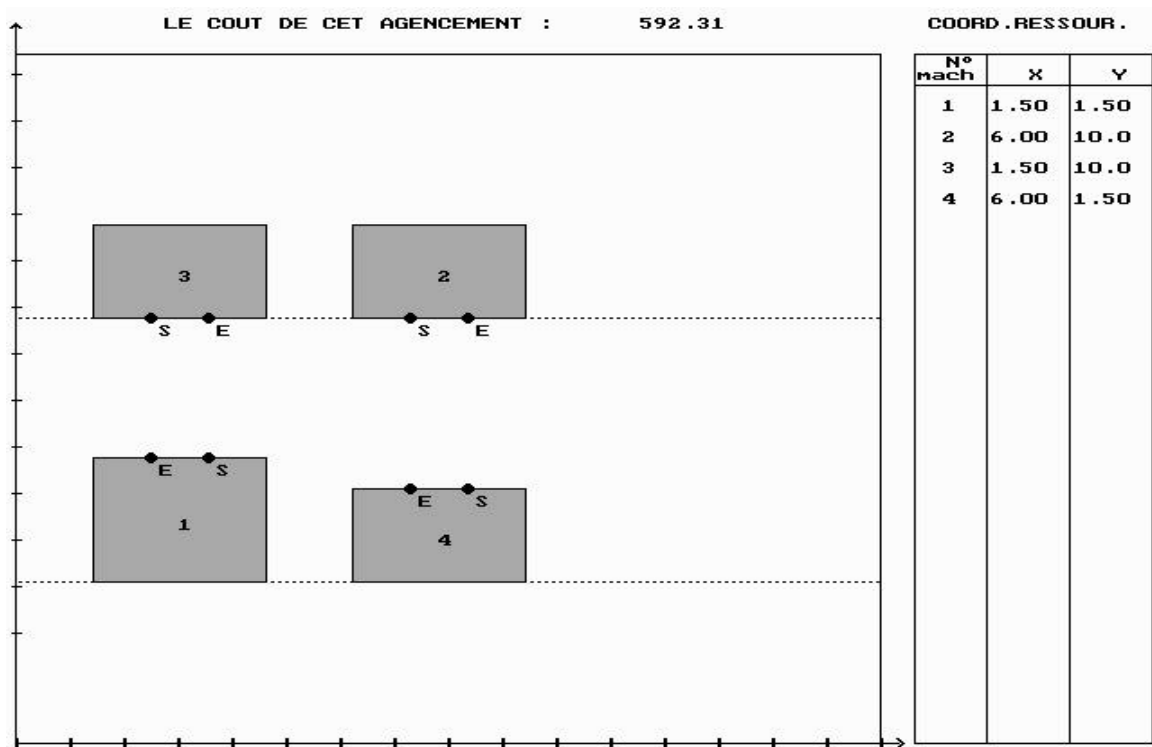
Les meilleurs agencements obtenus par le RSM sur les instances cellulaires et sur les instances de Nugent sont

II.1 Instances Cellulaires

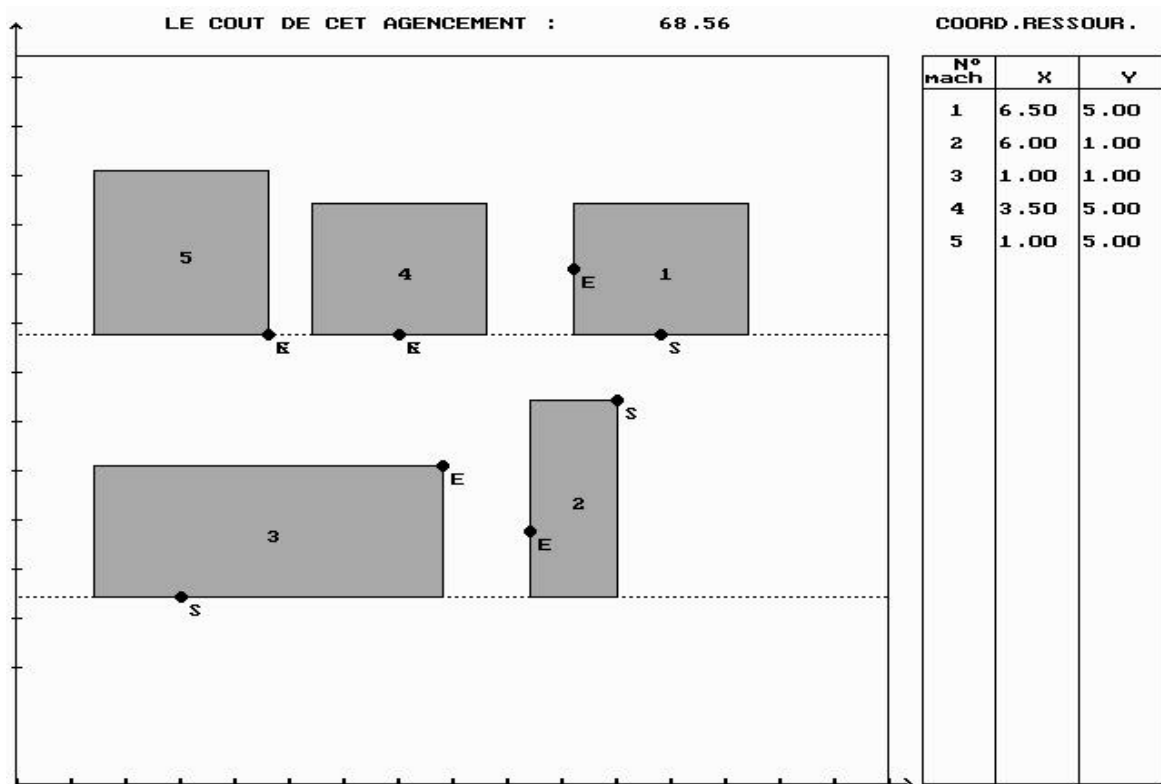
L'application du RSM sur des instances cellulaires construites avec une taille allant de

:

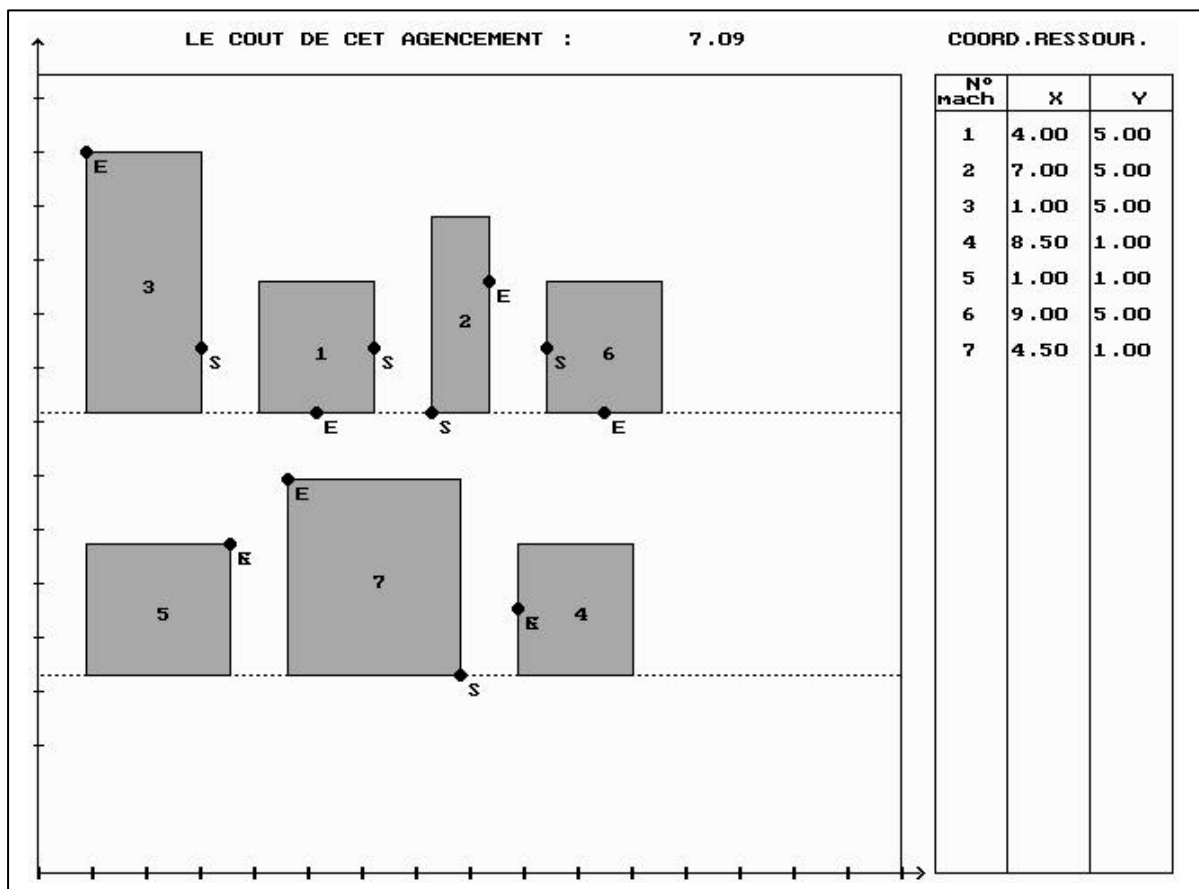
1. Agencement de 4 ressources



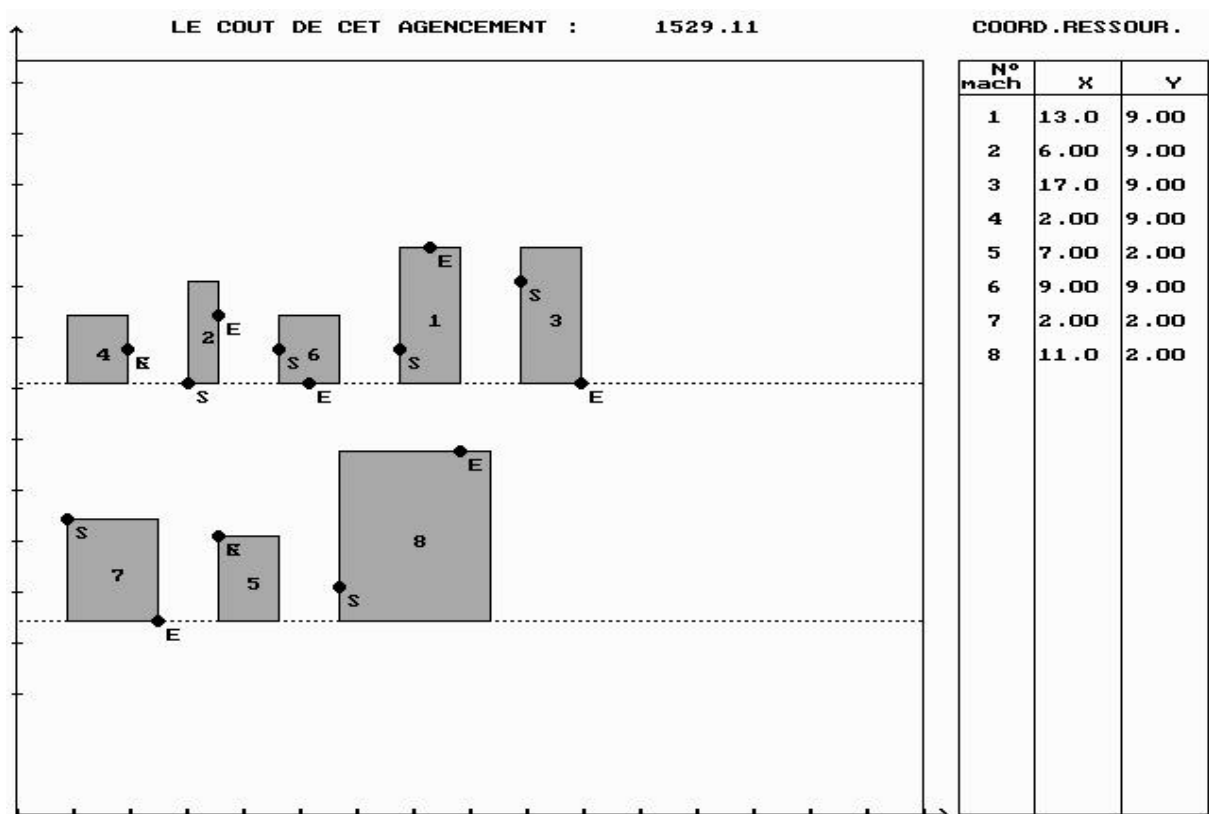
2. Agencement de 5 ressources



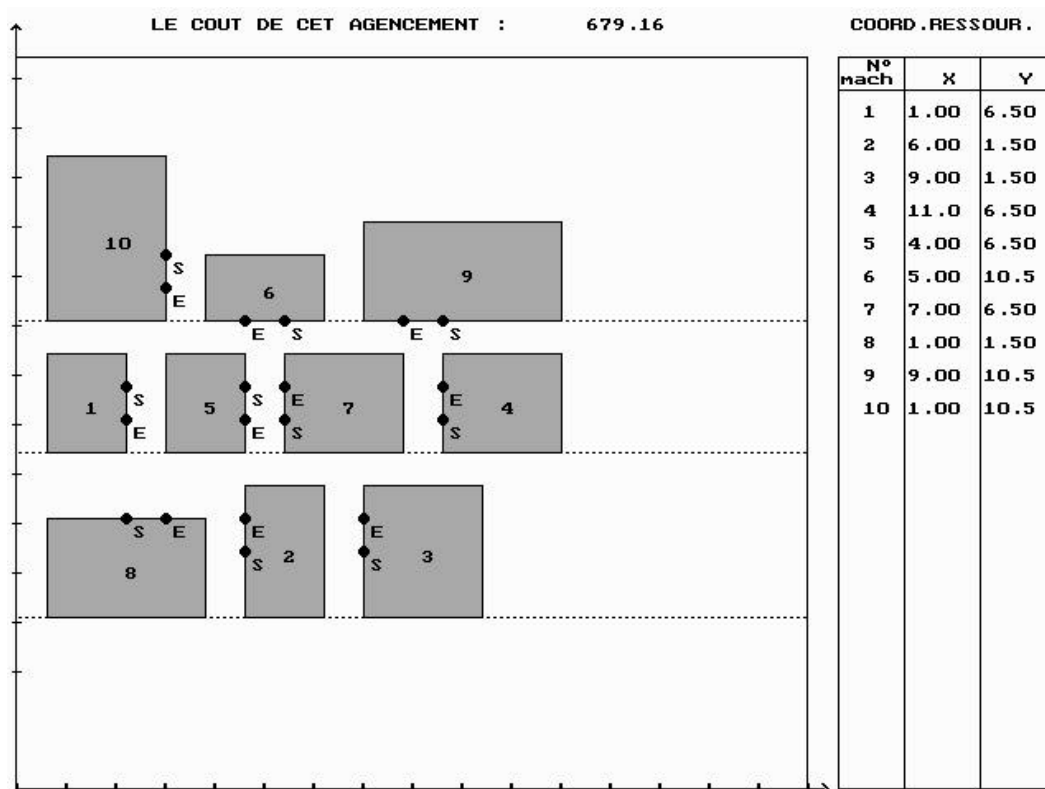
3. Agencement de 7 ressources



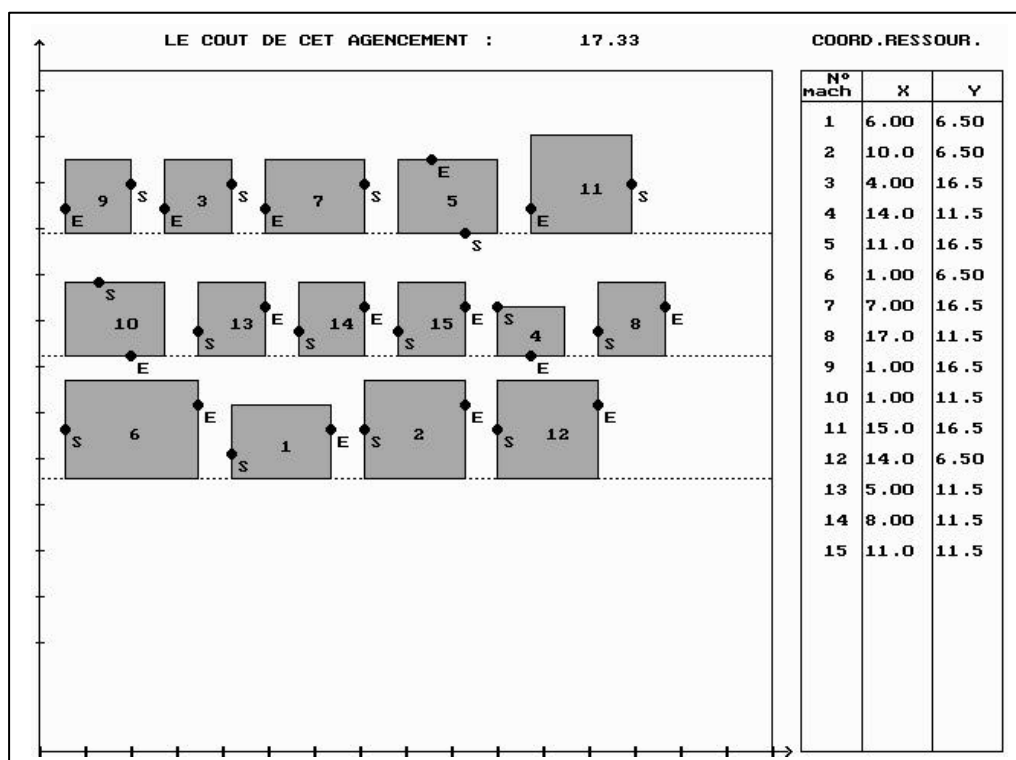
4. Agencement de 8 ressources



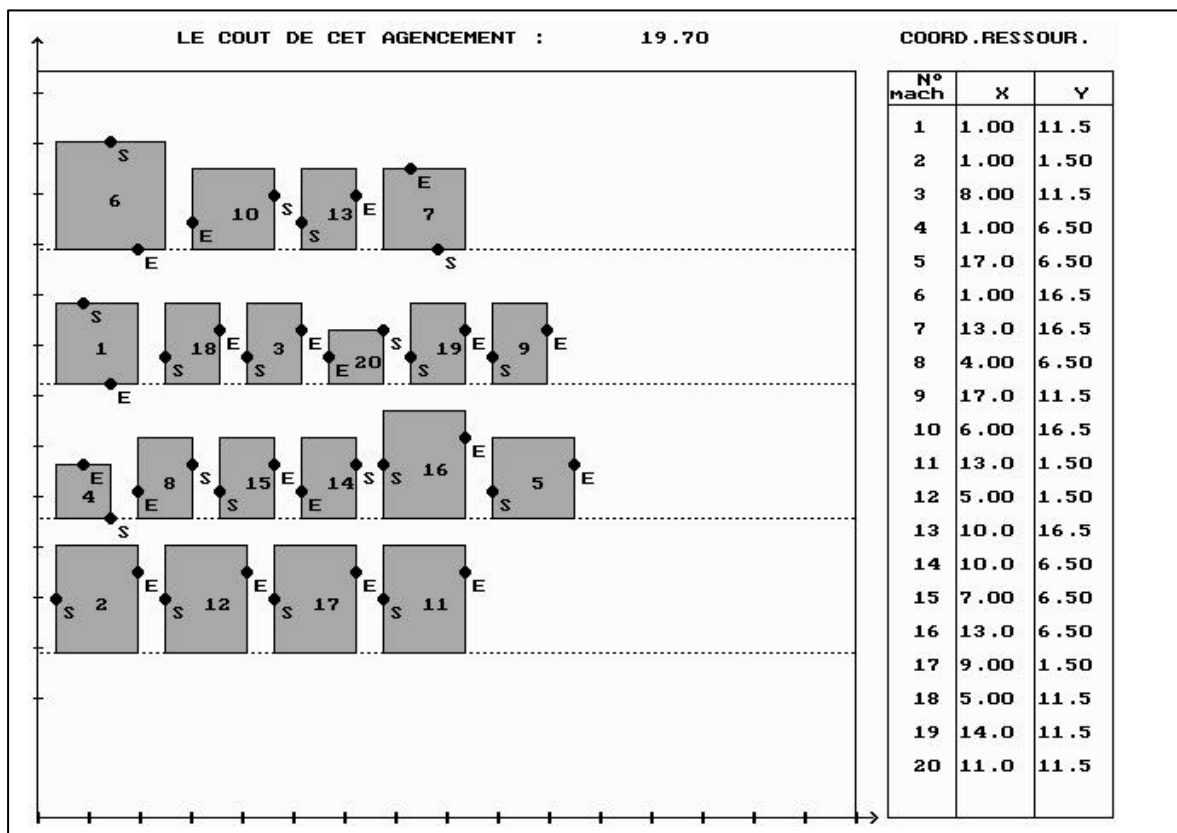
5. Agencement de 10 ressources



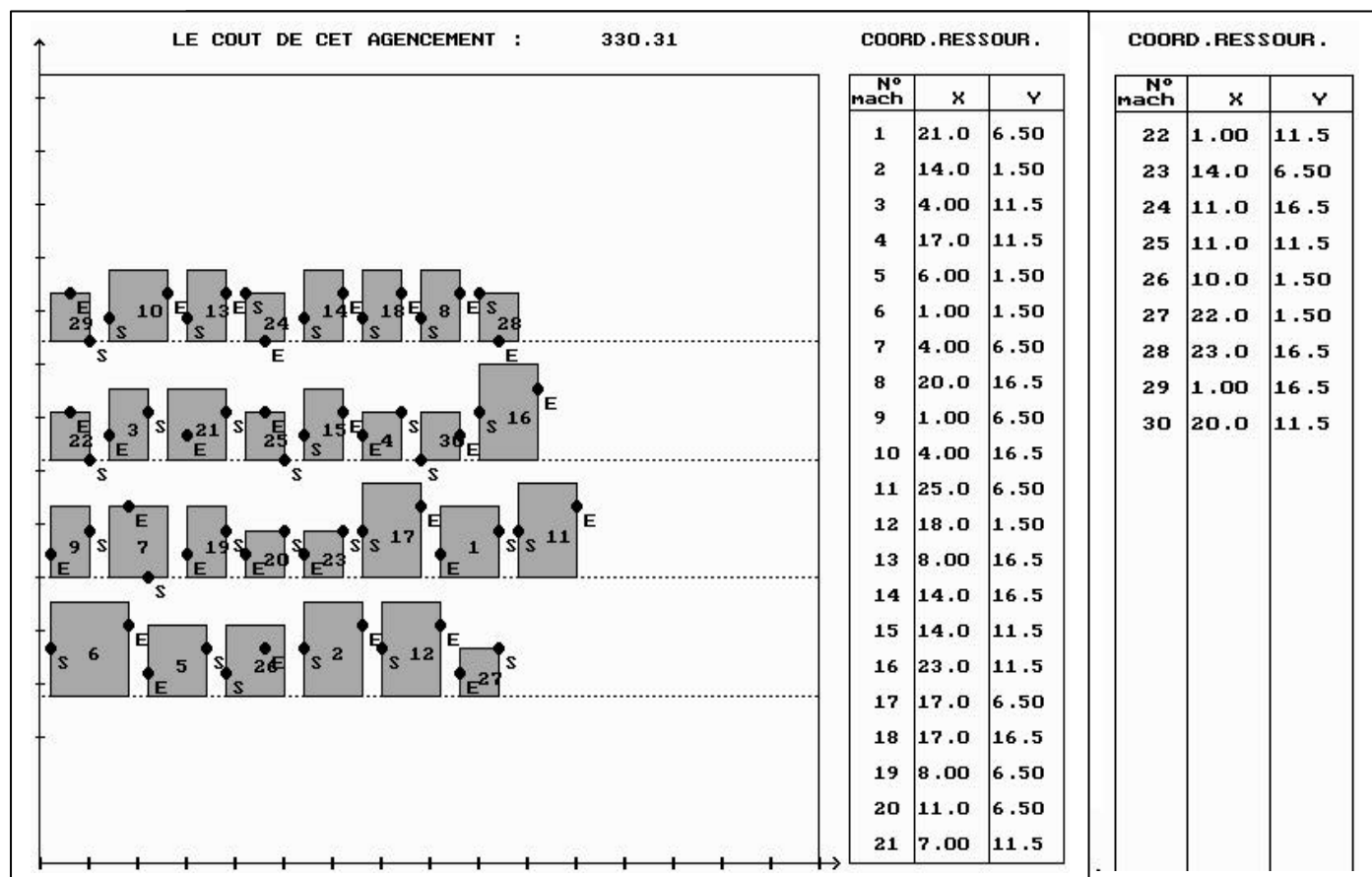
6. Agencement de 15 ressources



7. Agencement de 20 ressources



8. Agencement de 30 ressources

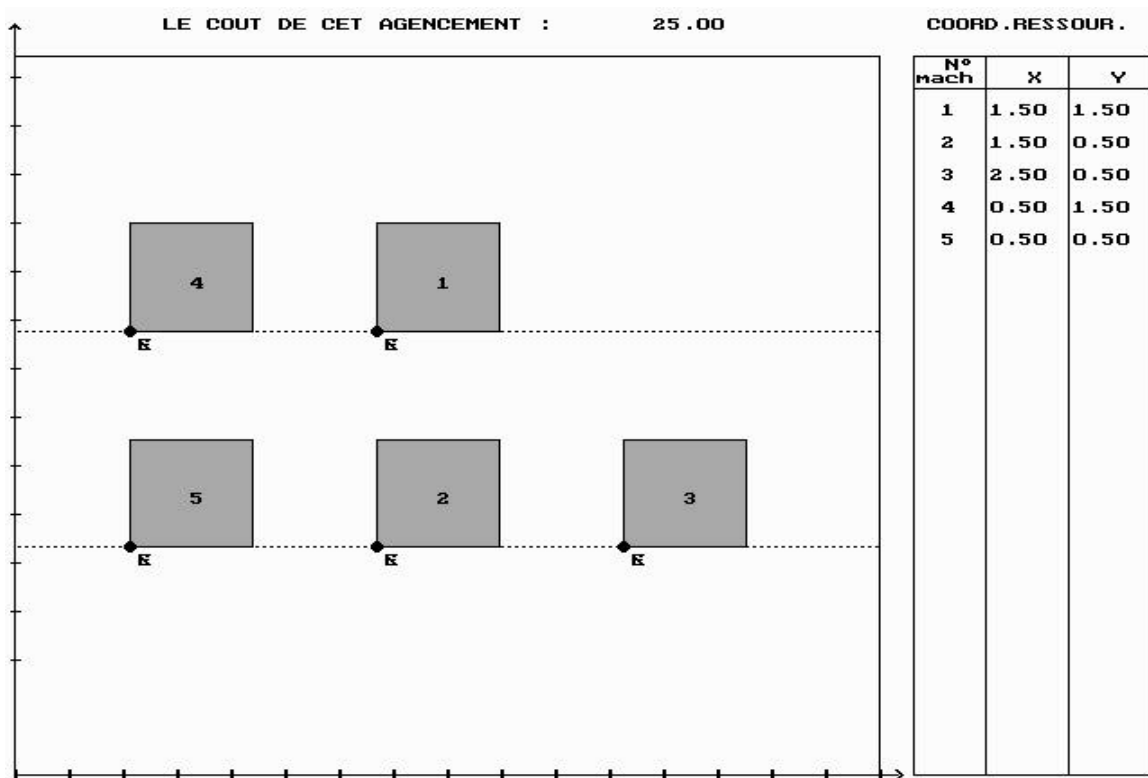


II.2 Les instances de Nugent

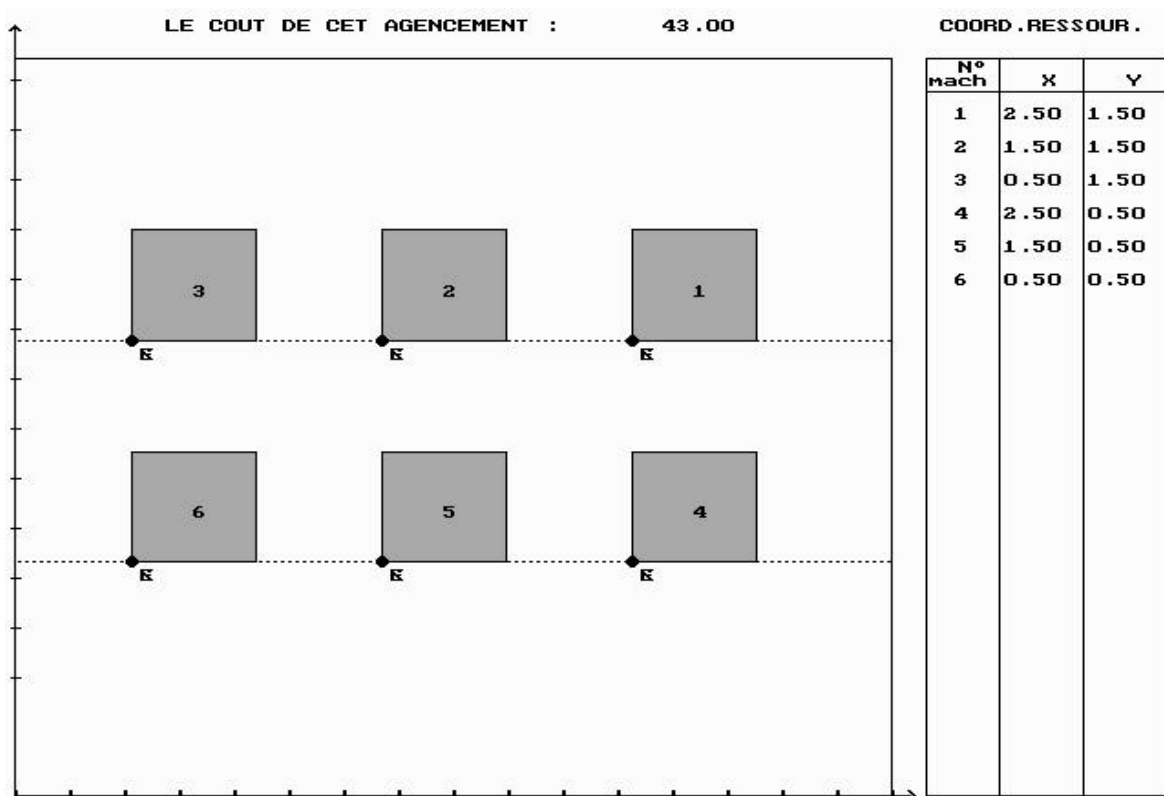
Les meilleures solutions obtenues sont :

Taille n	Meilleurs agencements
5	5,2,3,4,1
6	6,5,4,3,2,1
7	3,7,6,2,4,5,1
8	2,1,4,5,3,8,7,6
12	5,6,10,2,4,8,11,1,12,7,9,3
14	9,8,13,2,1,11,7,14,3,4,12,5,6,10
15	12,5,6,15,10,11,7,14,3,4,9,8,13,2,1
16.a	9,14,2,15,16,3,10,12,8,11,6,5,7,1,4,13
16.b	5,1,6,14,3,7,10,15,11,9,2,4,8,13,12,16
17	16,15,2,14,9,11,8,12,10,3,4,1,7,6,13,17,5
18	9,3,10,6,13,14,2,12,7,5,18,15,8,1,17,16,4,11
20	18,14,10,3,9,4,2,12,11,16,19,15,20,8,13,17,5,7,1,6
21	20,19,8,7,1,12,17,14,18,11,16,10,6,15,4,21,3,9,13,2,5
22	15,14,4,18,22,11,16,12,6,13,5,17,20,8,19,1,3,7,10,9,21,2
24	2,5,13,6,12,24,21,16,9,7,10,1,14,3,18,22,19,15,20,4,23,11,8,17
25	13,23,4,12,17,10,7,14,21,24,19,6,3,16,18,1,9,8,25,2,22,15,20,11,5
30	12,6,28,13,2,5,24,26,25,10,9,21,1,22,7,19,29,3,17,18,8,16,27,20,15,23,11,30,4,14

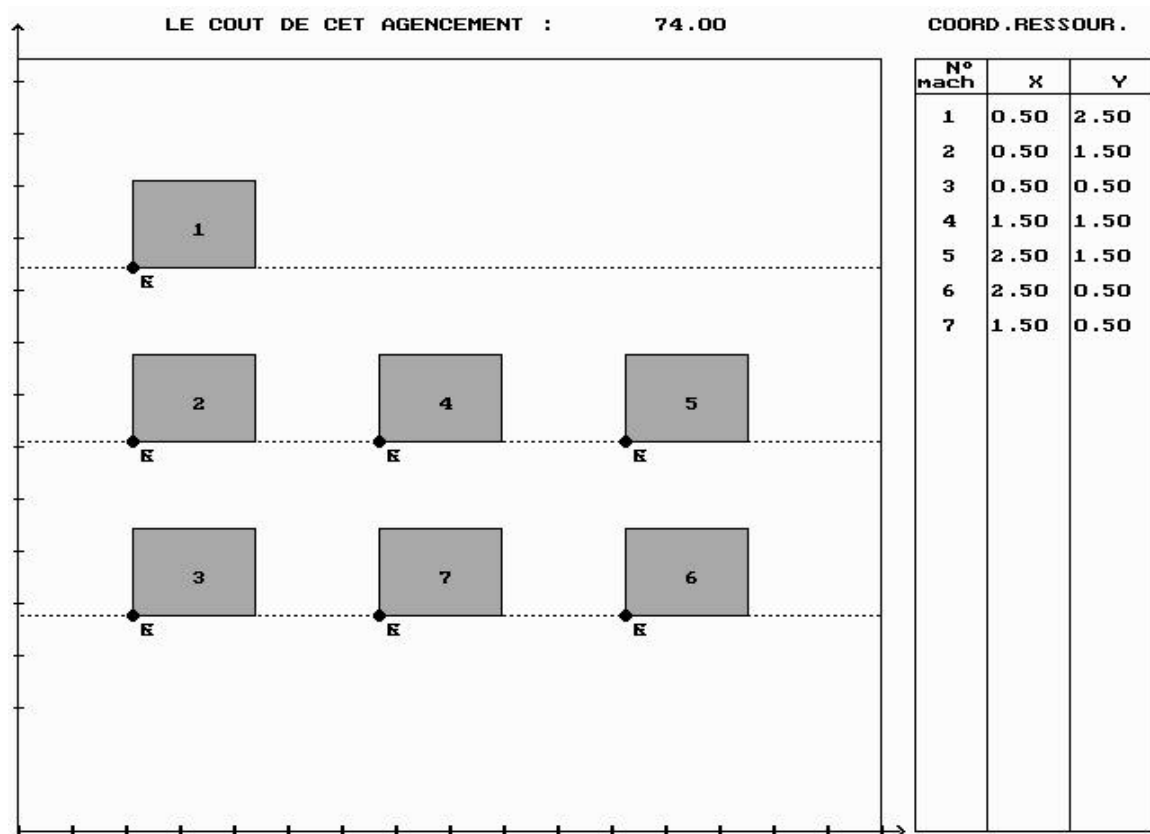
1. Agencement de 5 ressources



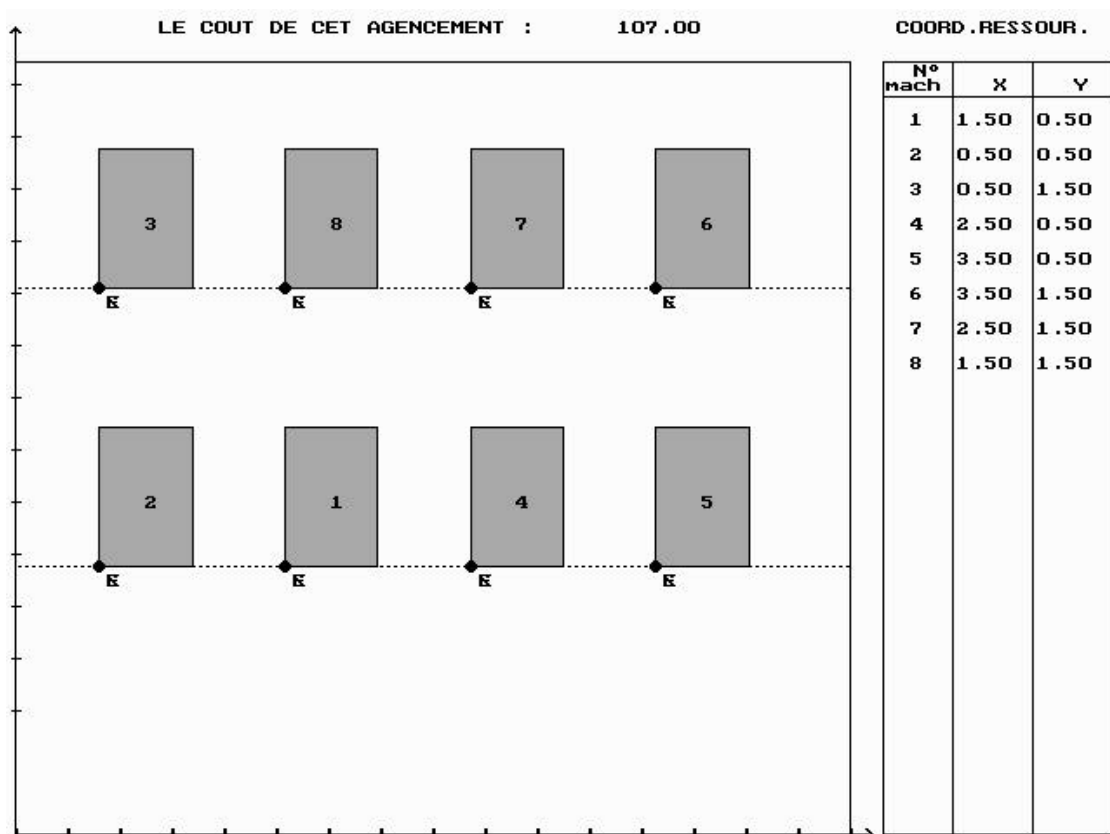
2. Agencement de 6 ressources



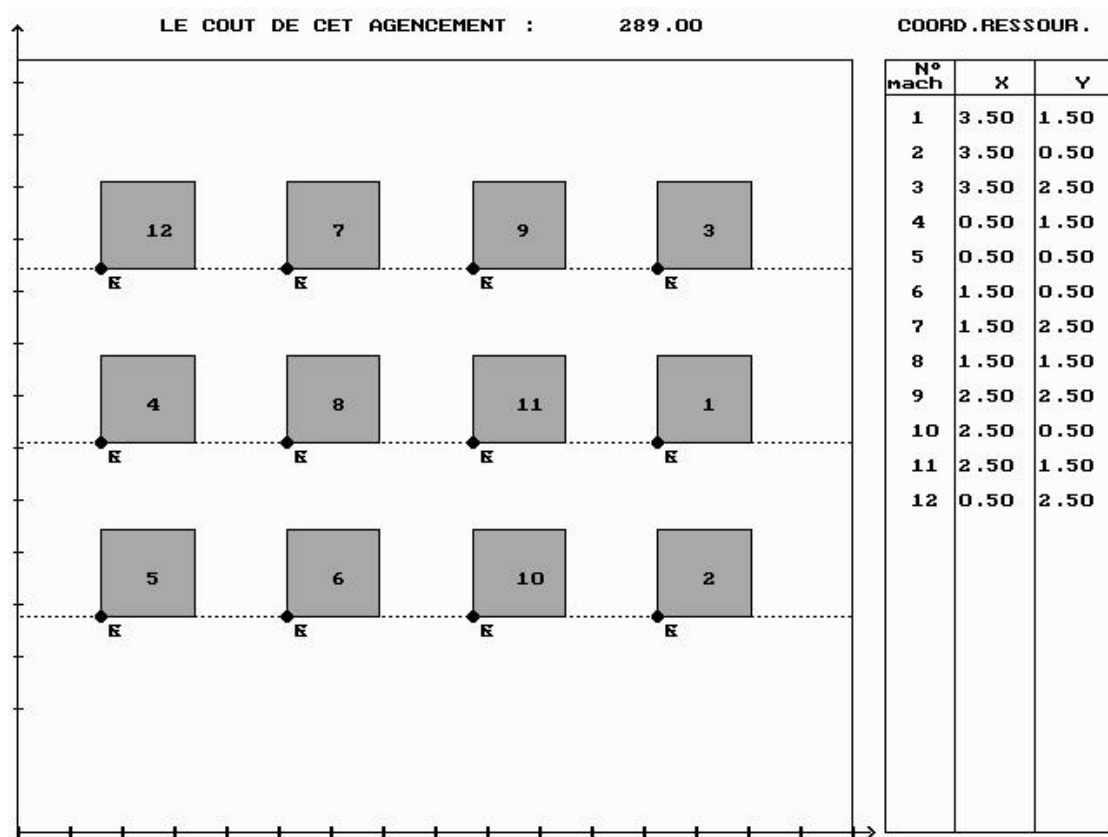
3. Agencement de 7 ressources



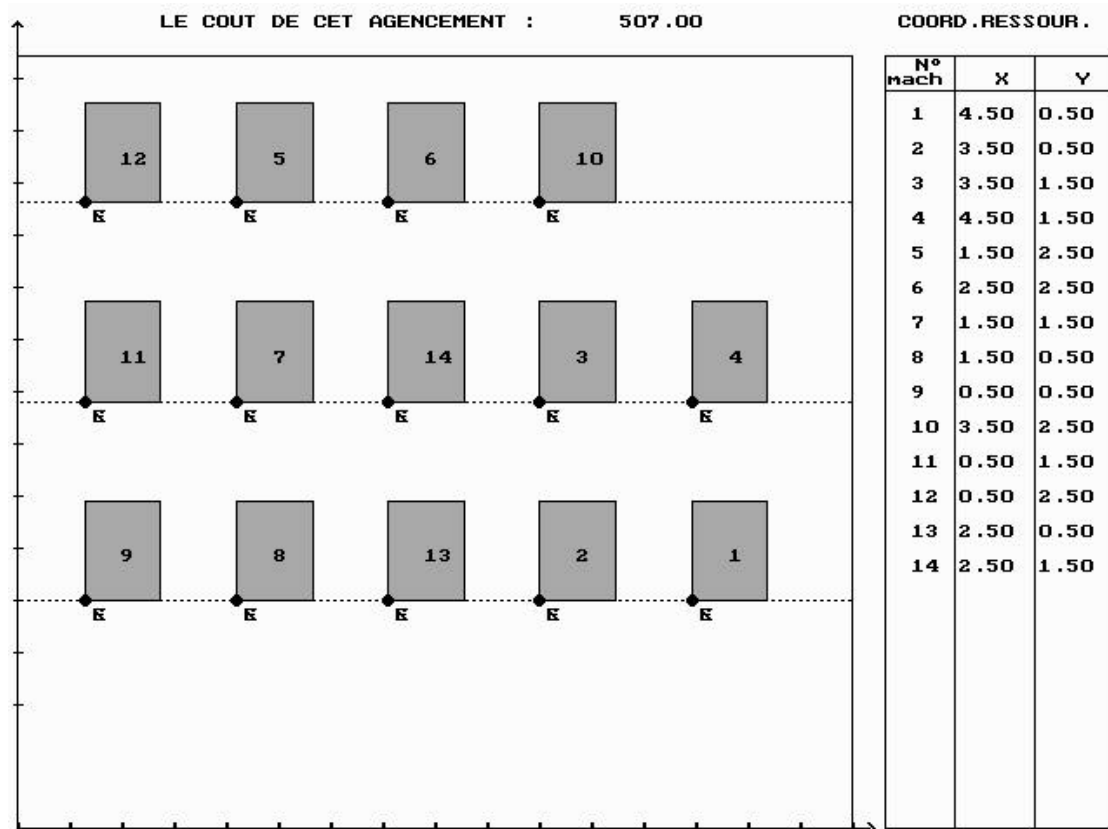
4. Agencement de 8 ressources



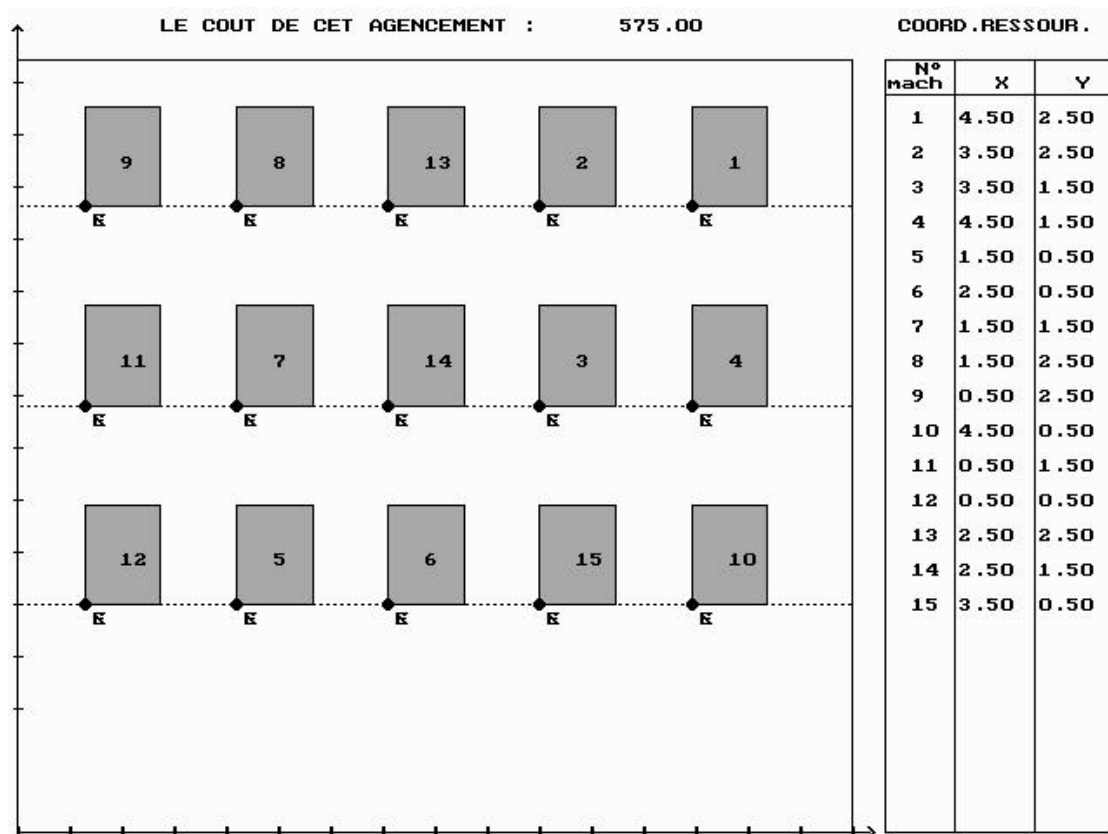
5. Agencement de 12 ressources



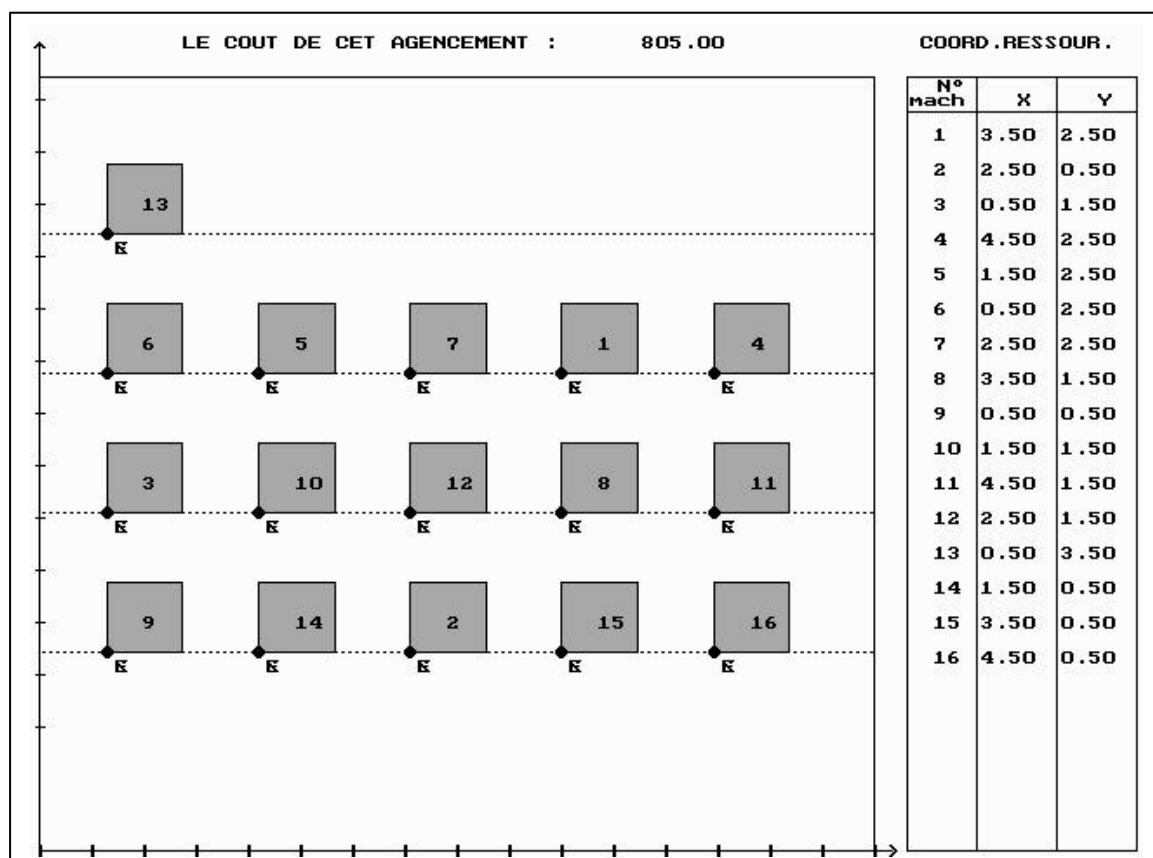
6. Agencement de 14 ressources



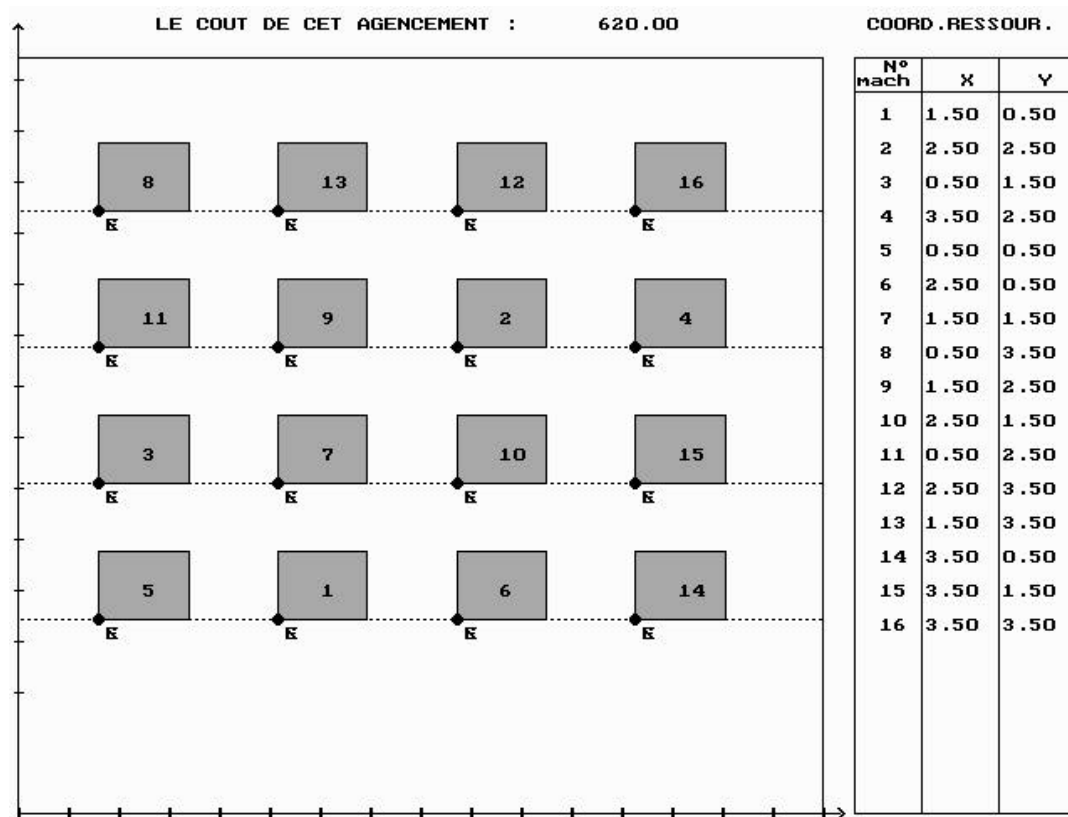
7. Agencement de 15 ressources



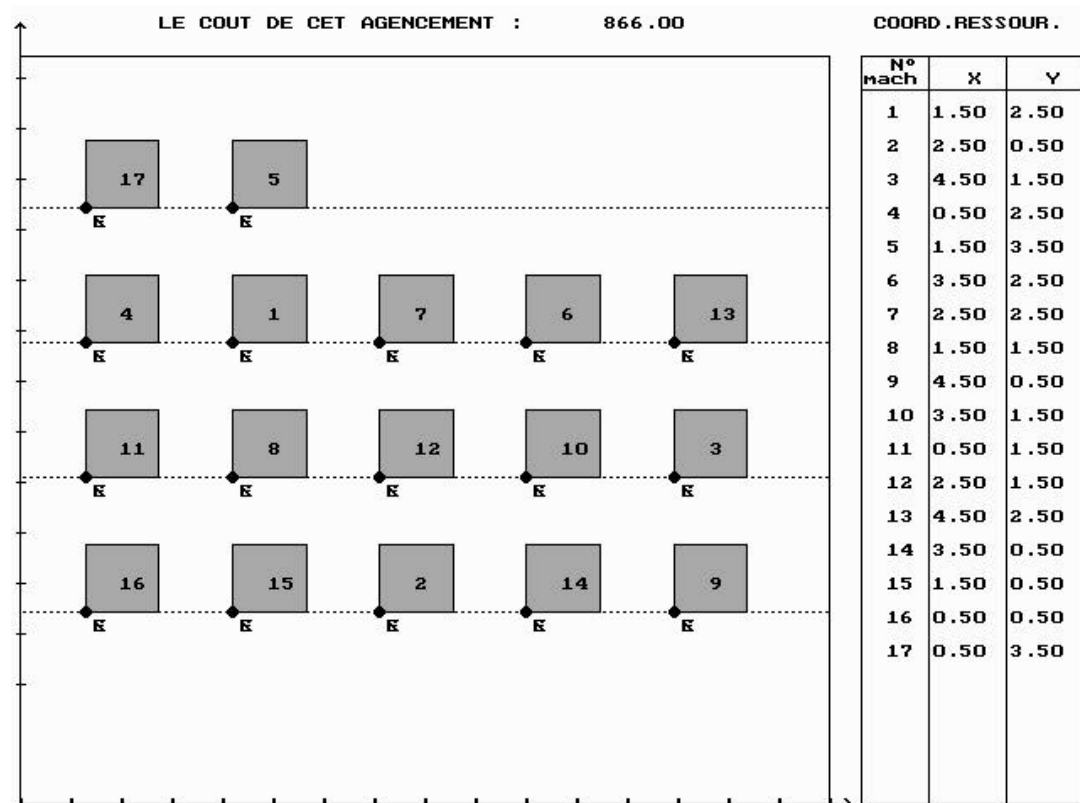
8. Agencement de 16 ressources (instance a)



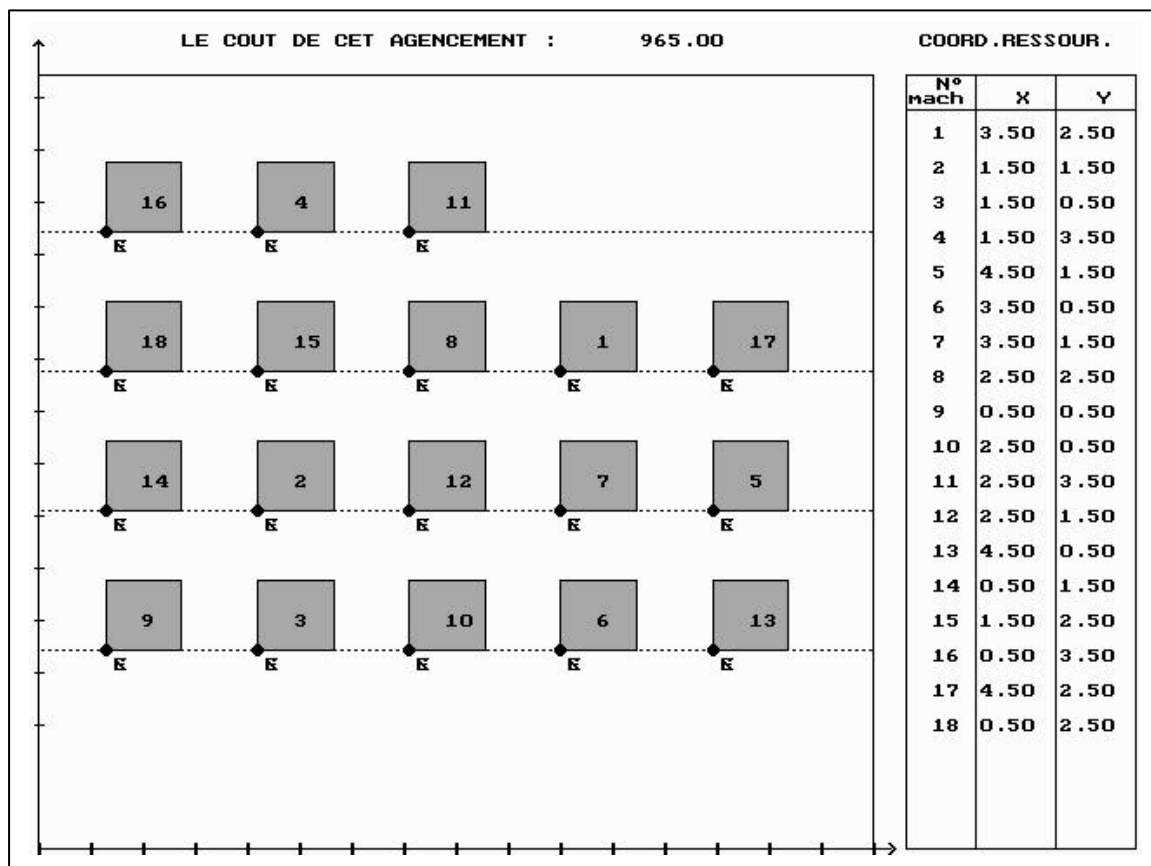
9. Agencement de 16 ressources (instance b)



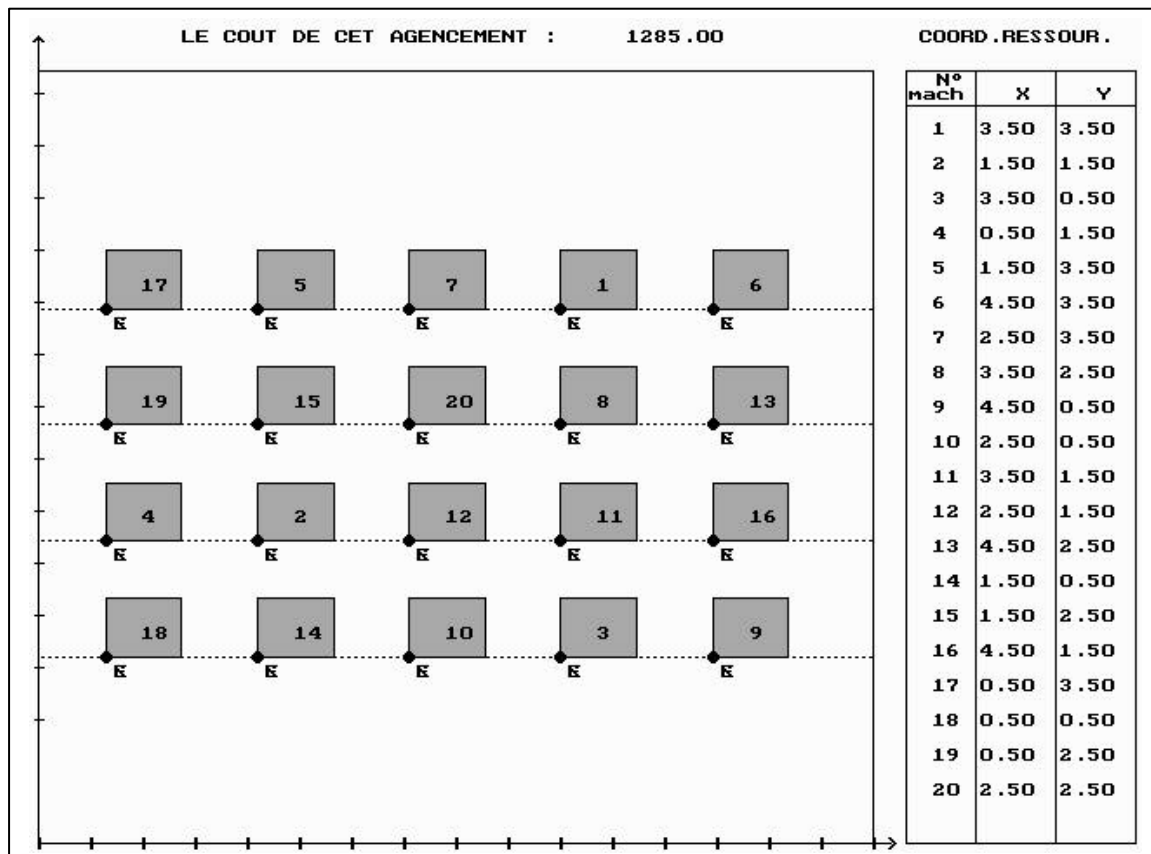
10. Agencement de 17 ressources



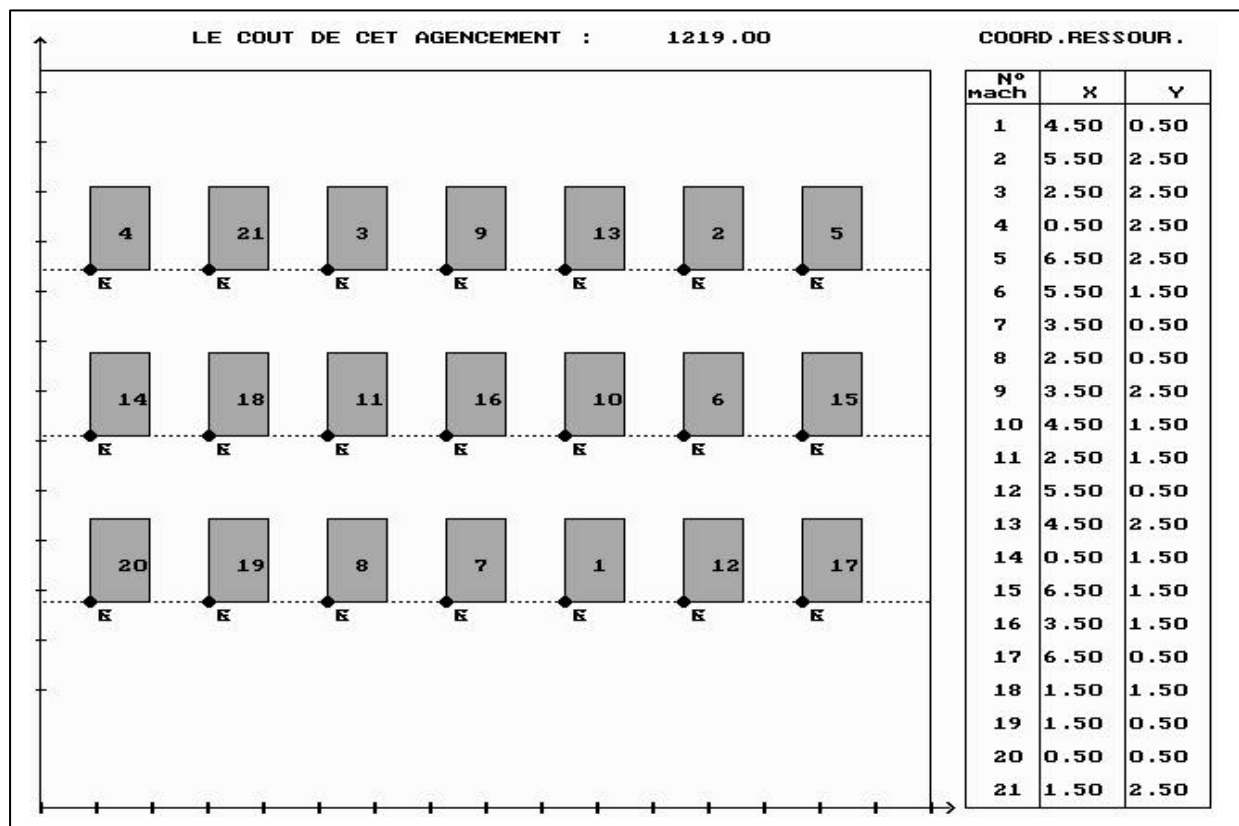
11. Agencement de 18 ressources



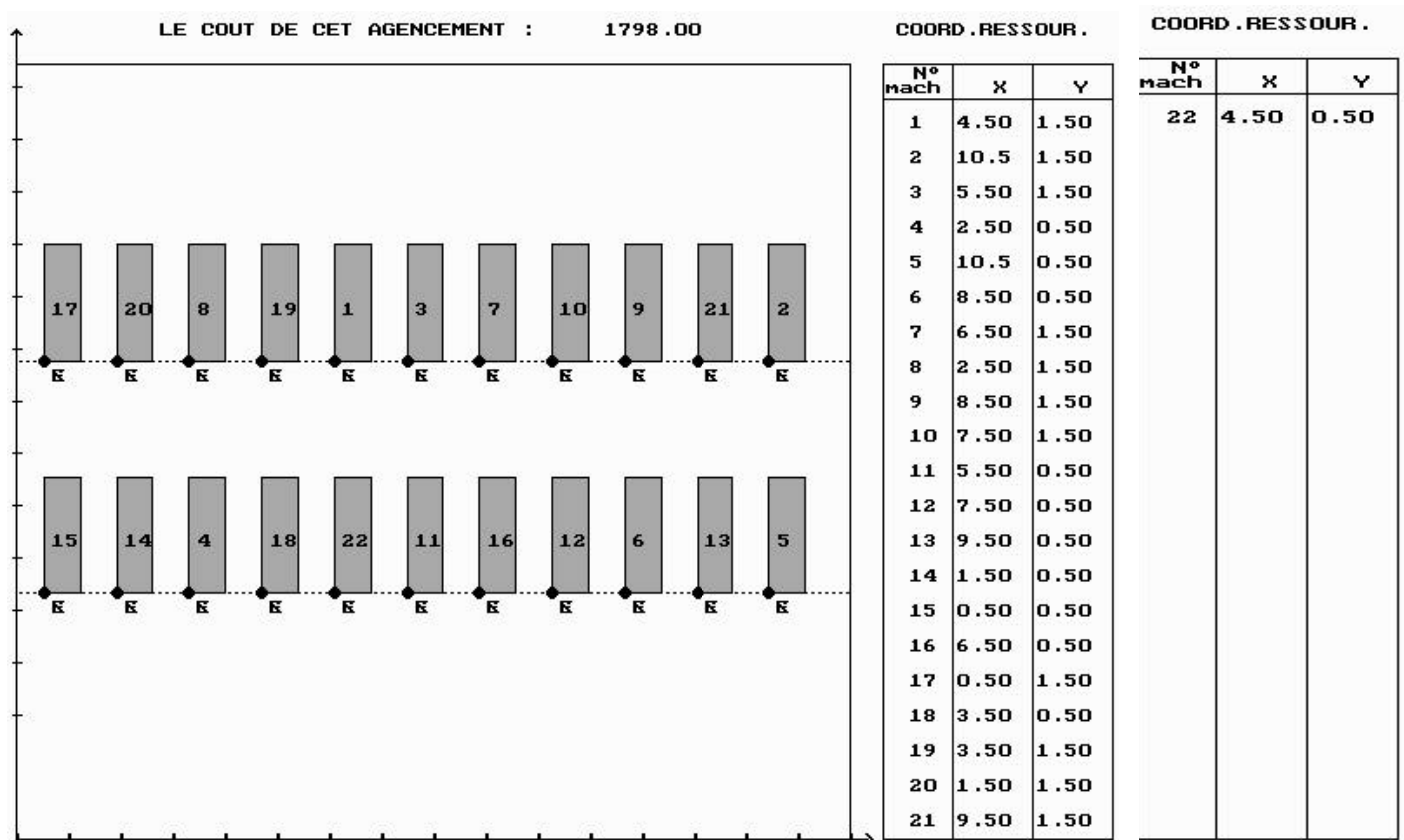
12. Agencement de 20 ressources



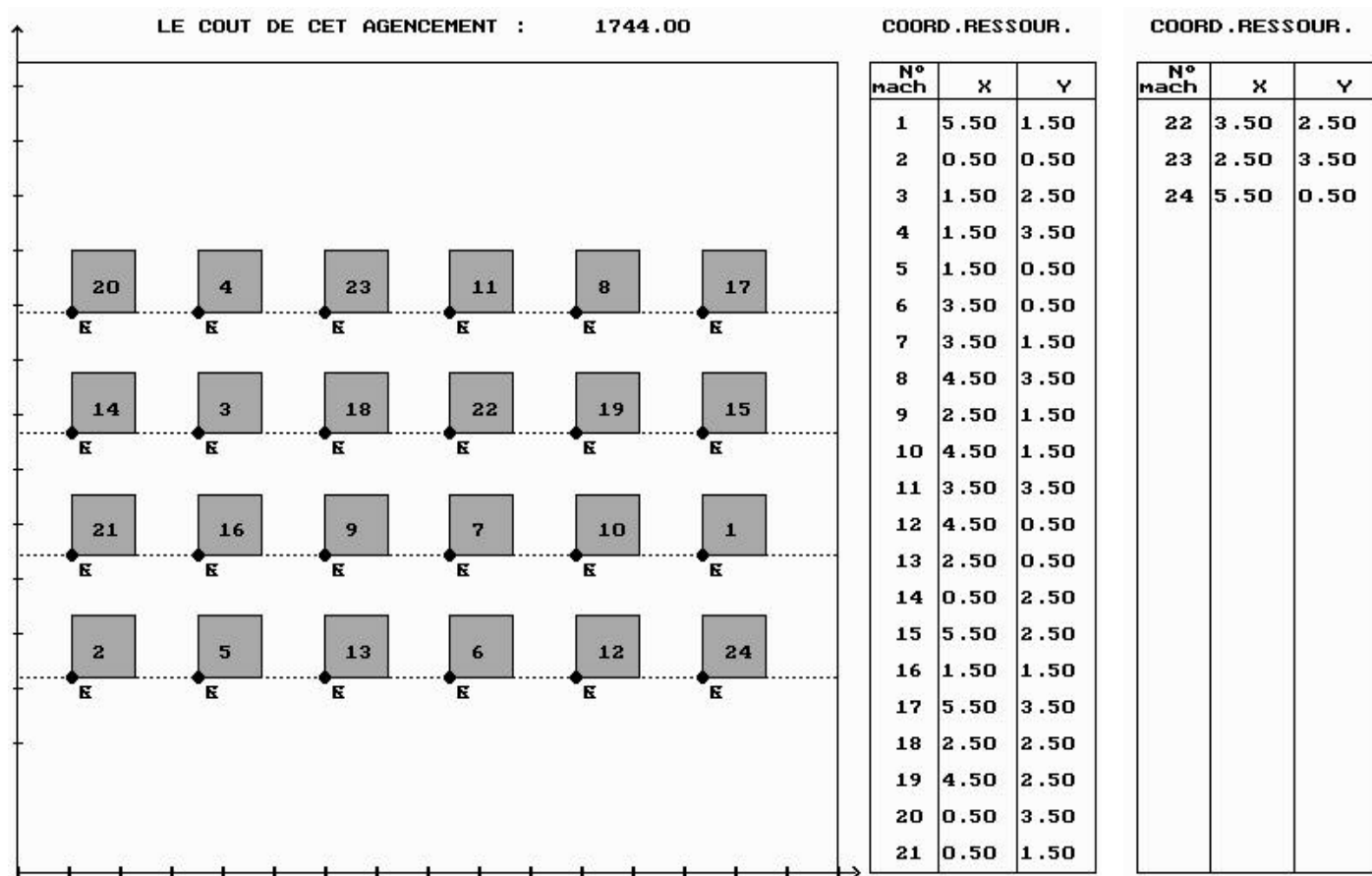
13. Agencement de 21 ressources



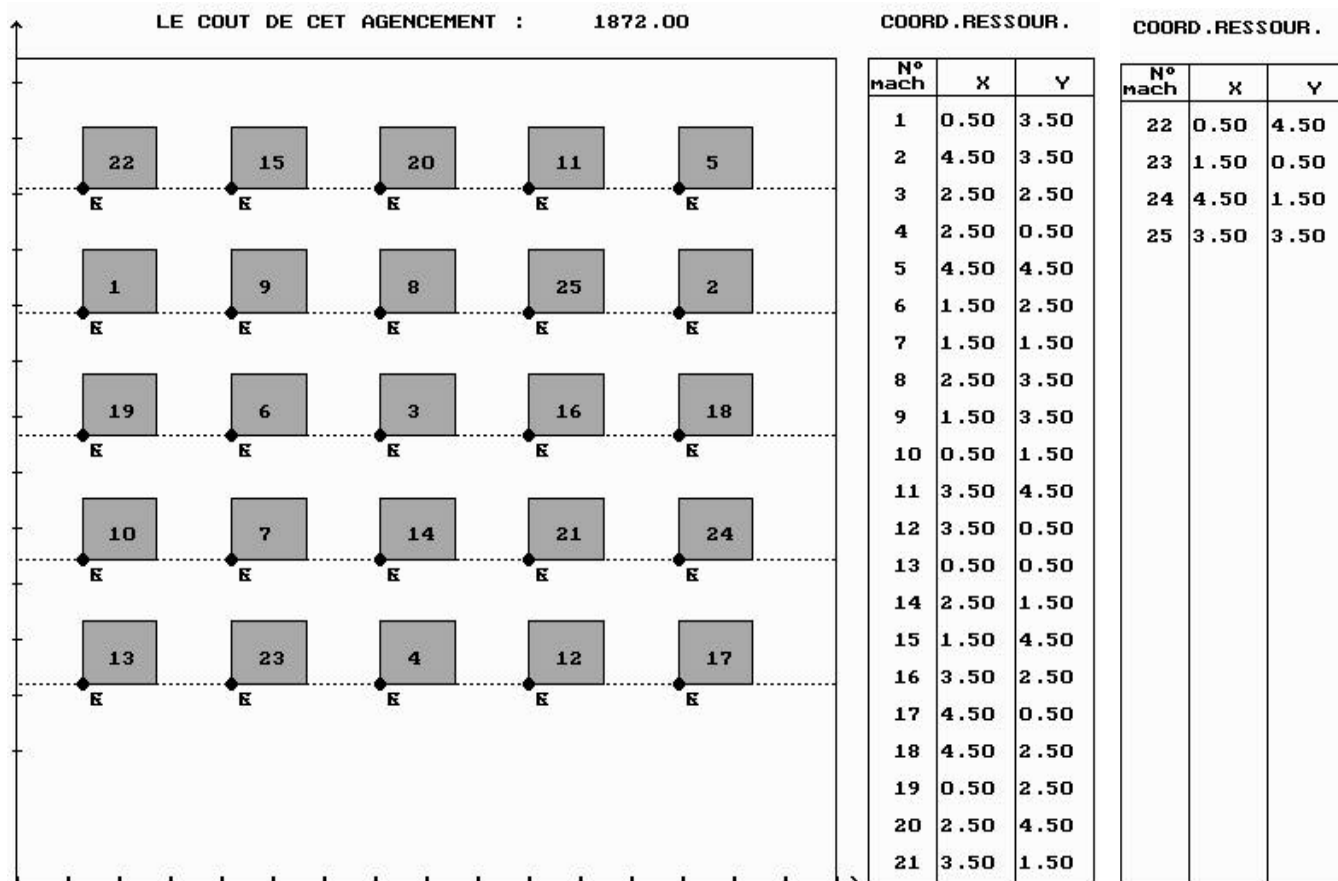
14. Agencement de 22 ressources



15. Agencement de 24 ressources



16. Agencement de 25 ressources



17. Agencement de 30 ressources

