

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL (PRODUCTIQUE)**

**PAR
GROSSI ABDENNOUR**

**ÉQUILIBRAGE DES LIGNES D'ASSEMBLAGE
THÉORIE ET APPLICATION**

AVRIL 1998

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

RÉSUMÉ

Depuis les années cinquante, plusieurs méthodes ont été développées pour résoudre le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage. Néanmoins, ces méthodes ne sont pratiquement pas utilisables pour plusieurs raisons qui sont :

- 1- Les algorithmes ne peuvent pas résoudre les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage de grandes tailles puisque ce type de problème appartient à la catégorie des problèmes NP-HARD ;
- 2- Les heuristiques développées ne tiennent pas en considération la plupart des contraintes du milieu industriel.

Pour ces raisons, nous avons décidé de travailler sur un projet qui répond aux exigences du milieu industriel. L'objectif est de développer une application informatique pour l'équilibrage des lignes d'assemblage en considérant les contraintes de milieu industriel qui sont les contraintes de zonage, les contraintes de disponibilité des ressources, les contraintes de côté de la ligne ainsi que les contraintes des groupes de classes d'employés.

Cette application utilise plusieurs heuristiques qui ont été sélectionnées sur la base de leur performance. Ces heuristiques ont été augmentées pour tenir compte des contraintes mentionnées auparavant.

Nous avons réalisé un plan d'expérience pour déterminer l'effet des heuristiques, la taille du réseau, le temps de cycle ainsi que les contraintes considérées sur l'efficacité des lignes d'assemblage.

Cette méthodologie expérimentale nous a permis d'identifier plusieurs points qui sont les suivants :

- 1- Toutes les variables principales, sauf la contrainte des groupes de classes d'employés, ont un effet significatif sur l'efficacité des lignes d'assemblage ;
- 2- L'effet des contraintes du milieu industriel sur l'efficacité des lignes d'assemblage semble moins important lorsqu'on utilise une heuristique performante;
- 3- Cette méthodologie expérimentale a permis d'identifier l'effet cumulatif des contraintes sur l'efficacité des lignes d'assemblage;
- 4- Il est extrêmement important de tout mettre en œuvre pour minimiser le nombre de contraintes au moment de la conception d'une nouvelle ligne d'assemblage, ceci afin d'assurer une production maximale.

REMERCIEMENTS

Je remercie M. Jocelyn Drolet pour ses encouragements, son support, ses directives, ses conseils ainsi que ses critiques qui ont été extrêmement utiles pour la réalisation de ce projet. Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi, à mes collègues du Laboratoire de Productique pour leurs supports et leurs encouragements, ainsi qu'à tous mes amis.

Enfin mes remerciements vont au ministère algérien de l'enseignement supérieur pour son support financier qui a été fortement apprécié.

TABLES DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
INTRODUCTION.....	1

CHAPITRES

1	ÉQUILIBRAGE DES LIGNES D'ASSEMBLAGE	
	1.1 Définition du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage.....	4
	1.2 Contraintes du milieu industriel.....	5
	1.3 Problème simple.....	7
	1.4 Problème général.....	8
	1.5 Relation entre les problèmes d'optimisation combinatoire et le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage.....	9
	1.6 Cas avec des temps probabilistes.....	10
	1.7 Complexité : définitions et mesures.....	13
	1.8 Formulation mathématique du problème.....	15
2	TECHNIQUES DE RÉOLUTION DU PROBLÈME D'ÉQUILIBRAGE DES LIGNES D'ASSEMBLAGE	
	2.1 Méthodes exactes	
	2.1.1 Algorithmes proposés pour la résolution de SALBP-1.....	20
	2.1.2 Méthodes exactes proposées pour la résolution du SALBP-2.....	25
	2.2 Algorithmes génétiques appliqués aux problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage.....	27
	2.2.1 Définition.....	27
	2.2.2 Codage.....	29
	2.2.3 Identification des solutions faisables.....	29
	2.2.4 La sélection pour le groupe homogène et le choix de la fonction «Fitness».....	31

2.3	Méthodes proposées pour la résolution des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage avec modèles mixtes	32
2.3.1	Introduction	32
2.3.2	Définition du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage avec modèles mixtes	33
2.3.3	Quelques méthodes de résolution du MMALP	35
2.4	Les heuristiques.....	40
2.4.1	Les règles de décision «Single Pass»	41
2.4.2	Les règles de décision combinées	41
2.4.3	Heuristiques basées sur le «backtracking».....	43
2.4.4	Les méthodes «Optimal Seeking».....	45
2.5	Conclusion.....	47
3	DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES HEURISTIQUES PRISES EN CONSIDÉRATION	
3.1	Contraintes considérées	49
3.2	Heuristiques modifiées	52
3.2.1	COMSOAL modifiée	52
3.2.2	Méthode du poids pondéré modifiée	57
3.2.3	Méthode basée sur la limite supérieure des éléments de travail.....	59
3.2.4	Méthode basée sur le quotient t_i/L_{si}	61
3.2.5	Méthode basée sur plusieurs règles de priorité	61
4	EXEMPLE ILLUSTRATIF	
4.1	Poids pondéré classique.....	66
4.2	Poids pondéré augmenté	68
5	PLAN D'EXPÉRIENCE	
5.1	Plan d'expérience.....	74
5.2	Description du programme	78
5.3	Résultats et interprétation	82
5.4	Plan d'expérience basé sur l'indice de lissage.....	101
6	CONCLUSION.....	104
7	DISCUSSION.....	106
8	BIBLIOGRAPHIE.....	108
9	ANNEXES.....	112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Les 13 règles de priorités.....	42
Tableau 4.1: Quelques éléments de réseau de la figure 4.1.....	66
Tableau 4.2: Solution finale de l'application de la méthode du poids Pondéré sans contraintes additionnelles	68
Tableau 4.3: Quelques éléments du réseau de la figure 4.1 associés à leurs poids.....	69
Tableau 4.4: Solution finale après intégration des contraintes de zonage Et de côté de la ligne	73
Tableau 5.1: Exemple d'enregistrement de la table des entrées	78
Tableau 5.2: Analyse ANOVA.....	83
Tableau 5.3: Performance des heuristiques.....	85
Tableau 5.4: Effet de la taille du produit sur l'efficacité des lignes d'assemblage	86
Tableau 5.5: Effet de la contrainte de zonage sur l'efficacité.....	88
Tableau 5.6: Effet de la contrainte de ressources sur l'efficacité des lignes d'assemblage	92
Tableau 5.7: Effet de la contrainte de côté de la ligne sur l'efficacité.....	94

LISTE DES FIGURES

Figure	1.1: Un réseau de préséances pour un problème de 11 éléments de travail	5
Figure	1.2: Composition du temps normal pour une tâche manuelle simple.....	12
Figure	2.1: Réseau de 11 éléments de travail.....	24
Figure	2.2: Réseau de 11 éléments.....	30
Figure	3.1: Fonctionnement des heuristiques	54
Figure	3.2: Intégration des contraintes additionnelles	55
Figure	3.3: Les règles de priorité dans le cas de COMSOAL.....	56
Figure	3.4: Les règles de priorité dans le cas de la méthode de poids pondéré	58
Figure	3.5: Les règles de priorité dans le cas de la méthode basée sur la limité supérieure.....	60
Figure	3.6: Les règles de priorité dans le cas de la méthode basée sur le le rapport (t_i/LS_i).....	63
Figure	3.7: Les règles de priorité dans le cas de la méthode «règles multiples»	64
Figure	4.1: Réseau de préséances d'un problème de 21 éléments de travail proposé par Tonge.....	65
Figure	5.1: Fonctionnement du programme d'expérimentation	81
Figure	5.2: Effet de l'interaction (heuristique*produit) sur l'efficacité.....	86
Figure	5.3 : Effet du temps de cycle sur l'efficacité de la ligne d'assemblage.....	87
Figure	5.4: Effet de l'interaction (heuristique*zonage) sur l'efficacité.....	89
Figure	5.5: Effet de l'interaction (produit*zonage) sur l'efficacité	90
Figure	5.6: Effet de l'interaction (Zonage*Temps de cycle) en cas du produit 45	90
Figure	5.7: Effet de l'interaction (Zonage*Temps de cycle) en cas du produit 70	91

Figure 5.8:	Effet de l'interaction (Zonage*Temps de cycle) en cas du produit 90	91
Figure 5.9:	Effet de l'interaction entre les heuristiques et la contrainte de ressources sur l'efficacité	93
Figure 5.10:	Effet de l'interaction (Produit*Contrainte de ressources) sur l'efficacité des lignes d'assemblage	94
Figure 5.11:	Effet de l'interaction (Produit*Contrainte de côté de la ligne) sur l'efficacité	95
Figure 5.12:	Effet de l'interaction (Produit*Contrainte de classes d'employés) sur l'efficacité	96
Figure 5.13:	Effet de l'interaction entre les contraintes de zonage et les contraintes de ressources sur l'efficacité	97
Figure 5.14:	Effet de l'interaction (R*T) dans le cas du produit 45.....	97
Figure 5.15:	Effet de l'interaction (R*T) dans le cas du produit 70.....	98
Figure 5.16:	Effet de l'interaction (R*T) dans le cas du produit 90.....	98
Figure 5.17:	Effet de l'interaction (C*T) dans le cas du produit 45.....	99
Figure 5.18:	Effet de l'interaction (C*T) dans le cas du produit 45.....	100
Figure 5.19:	Effet de l'interaction (C*T) dans le cas du produit 45.....	100
Figure 5.20:	Effet de l'interaction entre les contraintes de zonage et de côté de la ligne sur l'efficacité avec l'indice de lissage comme variable dépendante..	102
Figure 5.21:	Effet de l'interaction entre les contraintes de ressources et de côté de la ligne sur l'efficacité avec l'indice de lissage comme variable dépendante..	103

INTRODUCTION

L'équilibrage des lignes d'assemblage est un problème connu depuis les années cinquante. Il concerne la distribution de la charge de travail sur l'ensemble des postes localisés sur la ligne d'assemblage. Ce problème a reçu une attention de la part des chercheurs car l'industrie d'assemblage occupe une place considérable dans le monde de la production.

Plusieurs études ont été réalisées afin de trouver une solution à ce problème. Les premiers travaux ont été orientés vers l'élaboration des méthodes exactes. Parmi elles, on trouve celles basées sur la programmation en nombre entier (notamment les méthodes d'exploitation arborescente) et d'autres basées sur la programmation dynamique.

Toutefois, ces algorithmes ne donnent pas de solutions optimales aux problèmes de grande taille. Cela est dû principalement à la nature du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage (il appartient à la catégorie des problèmes NP-DUR). Pour cette raison, des heuristiques ont été développées pour rendre faisable la résolution des problèmes d'équilibrage de grande taille.

Malgré le nombre des heuristiques publiées jusqu'à présent, leurs utilisations dans les entreprises d'assemblage restent très restreintes. La raison principale réside dans le fait que ces heuristiques ne tiennent pas compte des contraintes présentes dans le milieu industriel. Parmi ces contraintes on peut citer : les contraintes de zonage qui forcent certains éléments de travail à être réalisés dans une ou plusieurs zones sur la ligne d'assemblage, les contraintes de disponibilité des ressources, les contraintes du côté de la ligne, les contraintes de classes d'employés de même que les contraintes résultantes de l'assemblage de plusieurs produits simultanément sur la même ligne d'assemblage.

L'un des objectifs de ce projet de maîtrise est de développer un outil d'aide à l'équilibrage des lignes d'assemblage. Cet outil comporte plusieurs heuristiques jugées pertinentes qui seraient augmentées pour tenir compte des contraintes citées précédemment et qui sont

présentes dans le milieu industriel sauf celles résultantes de la production mixte. Cette application est codée en Visual FoxPro sous l'environnement Windows.

Le travail présenté dans ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons une définition détaillée du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage et nous montrons le lien avec les problèmes d'optimisation combinatoire. Plusieurs contraintes du milieu industriel sont également présentées. En outre, on définit la complexité de ces problèmes et les mesures proposées pour calculer cette complexité, puis on rappelle une formulation mathématique au problème d'équilibrage des lignes d'assemblage.

Dans le chapitre qui suit, toutes les techniques de résolutions sont détaillées. Nous commençons avec les méthodes exactes, quelques algorithmes basés sur la programmation en nombre entier et d'autres basés sur la programmation dynamique. Ensuite, nous présentons une nouvelle approche de résolution des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage qui s'appuie sur l'utilisation des algorithmes génétiques.

Quelques méthodes de résolution du cas des modèles mixtes sont aussi présentées dans ce chapitre. Enfin, nous présentons les heuristiques qui sont regroupées dans quatre catégories, puis nous présentons les règles de priorité utilisées.

Les heuristiques retenues pour être incorporées dans l'application OPTILIGNE sont présentées dans le troisième chapitre. Une description des contraintes intégrées dans ces heuristiques et une formulation mathématique sont aussi présentées.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons un exemple illustratif. On solutionne un problème de 21 éléments de travail par la méthode du poids pondéré. En premier lieu, nous résolvons le problème sans tenir compte des contraintes additionnelles. Par la suite, on ajoute deux contraintes qui sont les contraintes de zonage et les contraintes de côté de la ligne. Les solutions des deux cas sont également présentées dans ce chapitre.

Le cinquième chapitre est consacré à une analyse expérimentale (plan d'expérience), en commençant par une description du programme utilisé pour réaliser cette expérimentation. Ensuite, nous présentons le modèle utilisé ainsi que toutes les hypothèses posées. Après avoir réalisé le plan d'expérience, tous les résultats de l'analyse de variance sont présentés dans le tableau ANOVA. Les variables principales sont analysées via des tableaux alors que les interactions sont illustrées à l'aide de graphiques.

Finalement, nous présentons une conclusion et une brève discussion. La bibliographie utilisée dans ce projet ainsi que les annexes se trouvent à la fin de ce mémoire.

CHAPITRE 1

ÉQUILIBRAGE DES LIGNES D'ASSEMBLAGE

L'équilibrage des lignes d'assemblages est un problème qui a reçu une attention particulière depuis les années cinquante pour diverses raisons. Parmi ces raisons, on retrouve les coûts engendrés par l'assemblage des produits, la concurrence entre les entreprises, etc.

1.1 Définition du Problème d'équilibrage des lignes d'assemblage

La définition de base de ce problème est la suivante : étant donné un ensemble d'éléments de travail. Comment regrouper ces éléments dans des postes de façon à avoir une distribution uniforme de la charge de travail sur l'ensemble des postes tout en minimisant le temps d'inactivité et en respectant les contraintes de préséances? Pour illustrer ce problème, prenons l'exemple de la figure 1.1.

Ce cas possède 11 éléments de travail que nous voulons affecter aux postes sans violation des contraintes de base. La première contrainte est celle du temps de cycle. Cela veut dire que la charge de travail allouée à chaque poste ne doit pas dépasser le temps de cycle. Supposons un temps de cycle $C=15$. Les éléments $\{1,3,4\}$ ne peuvent pas être dans le même poste puisque le temps de cycle du poste serait 18 ce qui est plus grand que 15. Deuxièmement, les contraintes de préséances. L'élément 7 par exemple ne peut pas être affecté à un poste avant les éléments $\{1,3,4,5\}$. Cette définition de base tient compte de deux contraintes, le temps du cycle et les restrictions technologiques. Dans le monde réel, l'industrie d'assemblage doit composer avec plusieurs autres contraintes. À titre d'exemple, en voici quelques-unes :

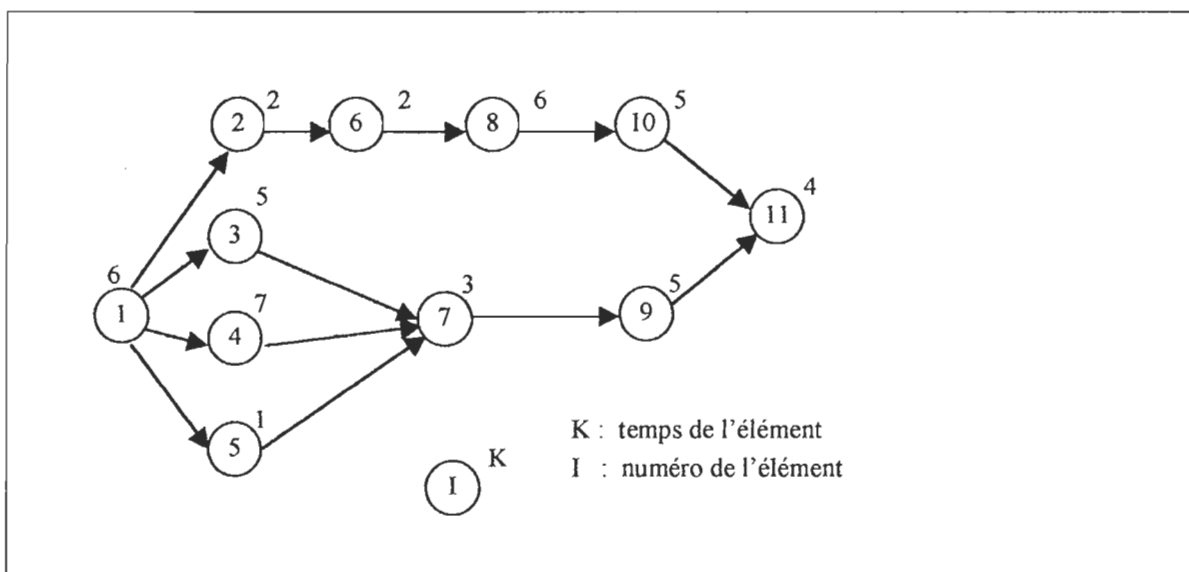


Figure 1.1 : Un réseau de préséances pour un problème de 11 éléments

1.2 Contraintes du milieu industriel

Plusieurs contraintes sont présentes dans les lignes d'assemblage. Ces contraintes affectent significativement l'efficacité de la ligne d'assemblage. Dans ce qui suit, nous présentons quelques-unes

1.2.1 Les contraintes de zonage

Ce sont les contraintes qui forcent un élément à être effectué à l'intérieur d'une zone.

1.2.2 Les contraintes de compatibilité et de non compatibilité des éléments de travail

Ce sont des contraintes qui obligent deux ou plusieurs éléments à être effectués dans le même poste de travail ou bien à ne pas être dans le même poste. Prenons l'exemple de l'opération de soudage avec l'opération de peinture. Ce sont deux opérations qui doivent être réalisées dans des zones différentes à cause des risques d'explosion potentiels.

1.2.3 Restrictions imposées par une disponibilité limitée des ressources

Les éléments qui utilisent une ressource disponible en quantité limitée sont regroupés au sein d'un même poste.

1.2.4 Le temps de quelques éléments qui dépassent le temps de cycle

Il arrive parfois que le temps d'un élément de travail soit plus long que le temps de cycle. Dans ce cas, il faut avoir deux postes parallèles pour traiter cet élément de travail.

1.2.5 Les éléments qui nécessitent la participation de plusieurs employés

Certains éléments peuvent nécessiter la présence de plusieurs assembleurs, par exemple, pour soulever un objet lourd, pour positionner un pare-brise d'automobile, etc. En pratique, les responsables du bureau des méthodes tentent d'éliminer ce genre de situation parce que cela peut engendrer des temps d'attente, diminuant de ce fait le taux d'efficacité de la ligne. Mais dans certaines situations, il n'y a pas d'autres alternatives.

1.2.6 Le temps nécessaire pour changer de poste

Il arrive parfois qu'un opérateur travaille sur deux ou plusieurs postes différents. Par conséquent, le temps des déplacements entre ces postes peut être significatif et impose une contrainte additionnelle lors de la résolution du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage.

1.2.7 Le temps nécessaire pour changer l'orientation du produit

Pour certains types de produits, le temps de changement d'orientation du produit est considérable. Donc, lors de la résolution du problème d'équilibrage, il faut inclure ce temps.

En outre, il y a d'autres complications. Par exemple, jalonner et équilibrer la charge de travail dans le cas des modèles mixtes ; tenir compte de la variabilité du temps des éléments de travail ; des habiletés et de la performance de chaque employé, composer avec les arrêts de la ligne etc. Afin de trouver une solution au problème, la plupart des chercheurs ont considéré le cas déterministe (le temps des éléments de travail est constant). Dans la catégorie des modèles déterministes, plusieurs hypothèses ont été prises en considération pour simplifier le problème. Les quatre hypothèses suivantes sont valables pour tous les modèles déterministes :

1. Tous les paramètres d'entrés sont connus avec certitude ;
2. Un élément ne peut pas être divisé entre deux postes ;
3. Les éléments ne peuvent pas être réalisés dans des séquences arbitraires dû aux relations de préséances ;
4. Tous les éléments doivent être réalisés.

Dans la catégorie des modèles déterministes, nous trouvons les problèmes suivants :

- Le problème simple d'équilibrage des lignes d'assemblage (en anglais : SALBP)
- Le problème général d'équilibrage des lignes d'assemblage (en anglais : GALBP)

1.3 Problème Simple

Selon Baybars [6], le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage dans son cas le plus simple considère les hypothèses mentionnées ci haut plus les suivantes :

5. Tous les postes sont équipés pour réaliser n'importe quel élément (Il est supposé que les coûts variables et fixes associés aux postes de travail sont les mêmes, par conséquent, il n'est pas nécessaire de les considérer dans les modèles) ;
6. Les temps de traitement des éléments de travail sont indépendants des postes où ils seront réalisés ;
7. N'importe quel élément peut être réalisé à n'importe quel poste ;
8. Il n'y a aucun poste en parallèle ;
9. La ligne d'assemblage est supposée être conçu pour un seul modèle.

La première version du problème simple (SALBP-1 en anglais) a comme objectif de minimiser le temps d'inactivité étant donné un temps de cycle fixe et prédéterminé. Minimiser le temps d'inactivité équivaut à minimiser le nombre de postes sur la ligne d'assemblage.

La seconde version (nommé SALBP-2) diffère de la première puisque le nombre de postes sur la ligne d'assemblage est donné et fixé. L'objectif est de minimiser le temps de cycle ou bien maximiser la cadence de production.

1.4 Problème Général

Le problème général d'équilibrage des lignes d'assemblage a été défini de plusieurs manières. En relaxant une ou plusieurs des hypothèses mentionnées ci-haut (à l'exception de l'hypothèse n° 5, qui sera discutée plus tard).

La ligne d'assemblage peut être utilisée pour produire des lots de deux ou plusieurs modèles en alternance. Ce problème s'intègre dans la catégorie des modèles multiples. La ligne peut aussi être utilisée pour l'assemblage de plusieurs modèles simultanément. Ce cas est connu sous le nom «Cas des modèles mixtes» (Thomopoulos [44]).

De nombreuses contraintes sont également possibles ; les contraintes de zonage, l'existence de postes parallèles, des stocks tampon, des alimenteurs sur la ligne d'assemblage, des lignes parallèles en sont des exemples.

Quel que soit l'objectif, ces cas sont inclus dans la catégorie du problème général d'équilibrage des lignes d'assemblage (en anglais GALBP). On note que dans le problème général, l'hypothèse 5 est vraie. Cela veut dire que les coûts fixes et variables associés aux postes ne sont pas pris en considération dans la résolution du problème.

La relaxation de cette hypothèse conduit à la définition d'un autre problème, celui de la conception de la ligne d'assemblage (en anglais : The assembly line design problem ALDP). Dans ce cas, le problème inclut le choix de la technologie en se basant sur les coûts fixes et variables des postes. Ainsi, ce problème est une généralisation du problème général GALBP.

1.5 Relation entre les Problèmes d'Optimisation Combinatoire et le Problème d'équilibrage des lignes d'assemblage

Le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage est lié aux problèmes d'ordonnancement et de jalonnement (en anglais : Sequencing and scheduling problem).

Le problème le plus simple dans cette catégorie consiste à ordonnancer des tâches sur une machine. Ce problème est relié de près au problème d'équilibrage des lignes d'assemblage. Dans les deux cas, les prédécesseurs immédiats d'une opération ou d'un élément doivent être réalisés avant que cette opération ou cet élément soit réalisé, en d'autres mots, les décisions sont assujetties aux contraintes de préséances.

Un cas spécial de problème d'équilibrage de ligne est connu sous le nom «bin packing problem». Ce problème est défini comme suit : étant donné une collection d'items de nature différente, l'objectif est de minimiser le nombre de boîtes identiques nécessaires pour contenir tous ces items. Ce problème est simplement le problème d'équilibrage des lignes auquel on a ajouté les contraintes de préséances. La capacité des boîtes est le temps de cycle, (Wee et Magasin [51]).

Le problème du sac à dos est un autre problème relié de près au problème SALBP. Il y a un sac à dos et un ensemble d'objets que l'on souhaite placer dans ce sac. Le choix des objets est déterminé à partir de certains critères telles que la maximisation de la valeur des objets ou bien la minimisation du poids des objets (Balas et Zemel 1980).

Finalement, il y a le problème de partition qui est aussi relié aux problèmes ALB. Ce problème se définit comme suit : Comment regrouper un ensemble d'objets donné en plusieurs sous-ensembles disjoints tout en optimisant certains critères. Dans le cas du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage les éléments de travail associés à chaque poste représentent un sous-ensemble de l'ensemble complet. Les sous-ensembles sont aussi disjoints deux à deux. Par conséquent, le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage est un cas particulier du problème de partition (Karp 1972).

1.6 Cas avec des temps probabilistes

1.6.1 Définition

Étant donné un ensemble d'éléments de travail avec des temps probabilistes. Comment regrouper ces éléments de façon à avoir une distribution uniforme de la charge de travail sur un nombre minimal de postes.

Dans les lignes d'assemblage manuelles, l'être humain est fortement impliqué dans les opérations d'assemblage. Par conséquent les temps de traitement des éléments de travail sont souvent variables d'un cycle à un autre. Cette variabilité est due à plusieurs raisons, nous pouvons en citer quelques-unes :

1. La fatigue de l'opérateur;
2. L'incompétence de l'opérateur;
3. Des variations dans la qualité et dans d'autres caractéristiques de la matière première et/ou des composantes utilisées;
4. Des modifications intervenant dans l'efficacité des outils pendant leur durée de vie utile;
5. la motivation de l'opérateur ;
6. l'habileté de l'opérateur.

Toutes ces raisons et d'autres sont représentatives de la réalité dans les lignes d'assemblage manuelles.

D'après les études réalisées dans le domaine, il y a une approche normative qui tient compte de la variabilité des éléments de travail et qui est largement utilisée dans l'industrie d'assemblage. Dans cette approche, les éléments sont affectés aux postes jusqu'à ce qu'une portion β du temps de cycle est atteinte. La marge restante permet aux opérateurs de terminer les éléments incomplets. Dans la pratique, une valeur de β de 0.9 est fréquemment utilisée.

D'après plusieurs chercheurs, cette valeur n'est pas nécessairement la meilleure pour diverses raisons :

1. Il est très difficile de fixer une valeur à β pour une variabilité donnée ;
2. il est possible que dans la proportion restante (10% dans ce cas), il y a une perte ;
3. les coûts associés aux opérateurs et à la finition des opérations n'ont jamais été considérés.

Dans le BIT (bureau international du travail), le temps de traitement d'un élément est égal au temps de base plus un facteur d'allure, une majoration de repos et une majoration auxiliaire. La figure 1.2 montre la décomposition du temps normal pour une tâche manuelle simple (pour plus de détails sur les termes utilisés consulter le BIT).

Pour résoudre le problème de la variabilité des éléments de travail, plusieurs études ont été réalisées en ce sens. Moodie et Young [33] ont suggéré une heuristique dans laquelle la probabilité de terminer les éléments affectés à n'importe quel poste est supérieure ou égale à un niveau prédéterminé. Les coûts de la main d'œuvre et de la non finition du travail ont été examinés par Kottas et Lau (1973, 1976, 1981). Reeve et Thomas (1973) ont comparé quatre procédures heuristiques de réaffectation des éléments de travail aux postes dans une ligne d'assemblage nouvellement conçu dans le but de minimiser la probabilité que un ou deux postes excèdent le temps de cycle. Silverman et Carter ont développé une fonction stochastique de coût. Cette fonction a été intégrée dans un algorithme d'équilibrage de ligne d'assemblage en vue d'obtenir un équilibre avec un coût minimum. Pour plus de détails, consulter les articles des auteurs cités plus haut.

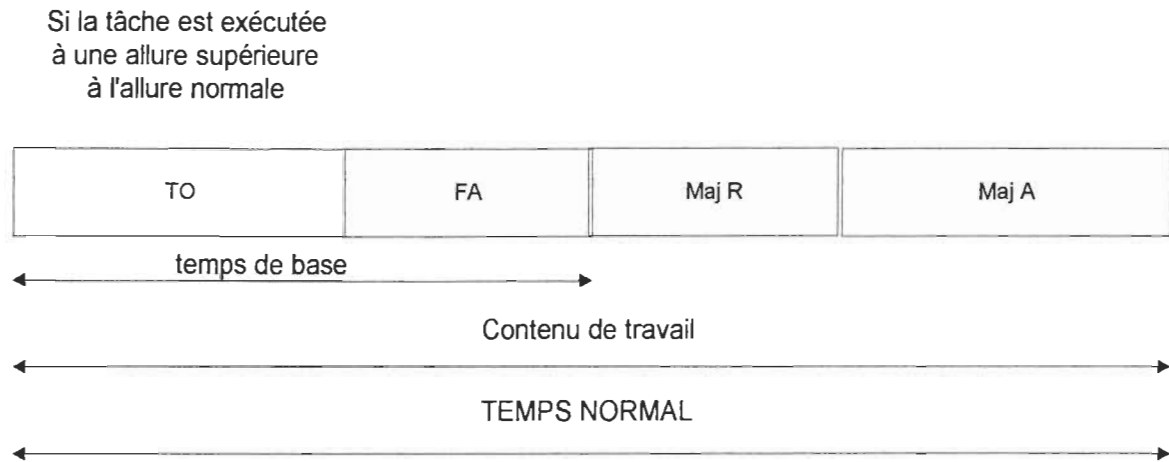


Figure 1.2. Composition du temps normal pour une tâche manuelle simple

TO : Temps observé

FA : Facteur d'allure

Maj R : Majoration de repos

Maj A : Majoration auxiliaire

Note : Les majorations auxiliaires peuvent être composées des majorations dues au travail ou aux retards inévitables.

1.7 Complexité : définitions et mesures

Le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage est un problème «NP-HARD» car c'est un cas particulier du problème de partition qui est selon Karp (1972) un problème «NP-HARD».

Si dans un problème ALB il y a m éléments de travail, on peut avoir $m!$ séquences possibles, et s'il y a r relations de préséances, le nombre de séquences faisables et distinctes est dans l'ordre de $m!/2^r$. Prenons l'exemple de la figure 1.1. Dans ce réseau, il y a 11 éléments de travail et 13 relations de préséances. Grossièrement il y a $11!/2^{13} = 4873$ séquences faisables.

La nature de ce problème a conduit plusieurs chercheurs à proposer des mesures du calcul de la complexité. Le plus important indicateur est le temps de résolution. Ce temps dépend de plusieurs facteurs (la taille du problème, le temps de cycle, le nombre de postes, la méthode utilisée pour résoudre le problème etc.).

Si on utilise par exemple un algorithme optimal pour résoudre le problème, cela conduit définitivement à un temps de résolution plus grand que celui généré par l'utilisation d'une heuristique. Le temps CPU est donc un bon indicateur de la complexité. Plusieurs autres mesures ont été proposées afin de calculer la complexité.

Mastor (1970) a proposé une mesure nommée «order strength» (dénnoté α) c'est le ratio du nombre de relations de préséances sur le nombre total possible de relations de préséances dans le même réseau. La valeur de α est située entre 0 et 1. Mastor a trouvé que ce facteur et le temps de résolution CPU sont directement proportionnels. Par conséquent, la complexité du problème croît avec la croissance du facteur «order strength». Dar-El (1975) a proposé une mesure similaire soit le ratio de flexibilité (dénnoté β). Il est égal au nombre de zéro dans la matrice de préséances divisé par le nombre total d'entrées dans cette matrice.

Dar-EL a trouvé que le ratio de flexibilité est en général un bon indicateur du temps de résolution CPU. Les deux facteurs mesurent la grandeur des séquences faisables dans le problème. Chaque mesure est le complément de l'autre. Si $\alpha = 0$, il n'y a pas de relation de préséances dans le réseau. Le problème devient un problème similaire à celui du «Bin Packing». Dans ce cas, le ratio de flexibilité égal 1 ($\beta = 1$). Le cas contraire indique qu'il y a une seule séquence dans le réseau ($\alpha = 1$ et $\beta = 0$).

Une troisième mesure appelée «west ratio» (Work element to station ratio) proposée aussi par Dar-EL (1973). Le «West ratio» (dénnoté par π) est le nombre d'éléments moyen par poste de travail dans la solution optimale. Dar-EL a trouvé que le temps de résolution CPU en général est une fonction croissante de π .

1.8 Formulation Mathématique du Problème

Selon plusieurs chercheurs [32,33,39]; Bryton 1954 est le premier chercheur qui a défini analytiquement le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage. Néanmoins, le premier modèle a été publié par Salveson en 1954.

Depuis cette date, plusieurs modèles mathématiques ont été proposés. Cette variété est due à la technique de modélisation utilisée (par exemple, la programmation dynamique ou la programmation en nombre entier) ou bien elle est due au type de problème à traiter (ex : minimiser le nombre de postes ou minimiser le temps de cycle).

Dans cette étude, nous allons essayer de présenter un modèle qui regroupe les contraintes les plus connues. Une définition des termes utilisés est nécessaire à la compréhension du modèle [57].

N : le nombre d'éléments de travail dans le réseau ;

K : nombre maximal de postes possible ;

t_i : temps de traitement de l'élément i ;

C : le temps de cycle ;

$PI = \{(u, v); \text{l'élément } u \text{ précède l'élément } v\}$

ZS : l'ensemble des paires d'éléments qui doivent être dans le même poste;

ZD : l'ensemble des paires d'éléments qui ne doivent pas être dans le même poste.

Nous utilisons des variables de décision binaires. Ces variables indiquent si un élément est affecté à un poste de travail ou non.

$$X_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si l'élément } i \text{ est inclu dans le poste } k \\ 0 & \end{cases}$$

Commençant par la description des contraintes :

1.8.1 Contraintes d'affectation

Un élément doit être affecté à un seul poste. Il y a autant de contraintes qu'il y a d'éléments.

$$\sum_{k=1}^K X_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (1.1)$$

1.8.2 Contraintes du temps de cycle

Cette contrainte assure que la somme des temps de réalisation des éléments de travail affectés à un poste n'excède pas un temps limite nommé temps de cycle. Il y a une contrainte pour chaque poste.

$$\sum_{i=1}^N t_i X_{ik} \leq C \quad k = 1, \dots, K \quad (1.2)$$

À titre d'exemple, dans le réseau de la figure 1.1 si on considère un temps de cycle $C = 10$.

Pour le premier poste, la contrainte du temps de cycle s'écrit comme suit :

$$6X_{11} + 2X_{21} + 5X_{31} + 7X_{41} + X_{51} + 2X_{61} + 3X_{71} + 6X_{81} + 5X_{91} + 5X_{10,1} + 4X_{11,1} \leq 10$$

1.8.3 Contraintes de Préséances

Cette contrainte force tous les prédécesseurs d'un élément i à être affectés à des postes antérieurs ou bien au poste où l'élément i est affecté. Les équations représentant ces contraintes s'écrivent comme suit :

$$X_{vh} \leq \sum_{j=1}^h X_{uj} \quad h = 1, \dots, K \quad \text{et} \quad (u, v) \in PI \quad (1.3)$$

Pour clarifier ces équations prenons l'exemple précédent. Supposons qu'on a 3 postes de travail au maximum ($K = 3$). Le couple $(3,7)$ appartient à l'ensemble PI . Dans ce cas, les équations s'écrivent de la façon suivante :

$$X_{71} \leq X_{31} \quad (1)$$

$$X_{72} \leq X_{31} + X_{32} \quad (2)$$

$$X_{73} \leq X_{31} + X_{32} + X_{33} \quad (3)$$

Puisque l'élément 7 ne sera affecté qu'à un seul poste (équation (1.1)), une seule inéquation devra avoir la partie gauche différente de zéro. Dans la première équation, si l'élément 3 est

affecté au poste 1 ($X_{31} = 1$), cela implique que l'élément 7 doit être dans le même poste ou bien il n'est pas encore affecté à un poste ($X_{71} \leq 1$). La deuxième équation signifie que le premier poste dans lequel l'élément 7 peut être affecté est le poste 2. La même chose pour la troisième équation.

1.8.4 Contraintes de regroupement et de non compatibilité

1- *Contraintes de regroupement* : Ils arrivent parfois que des éléments doivent être réalisés dans le même poste de travail dû à plusieurs facteurs tels que les coûts très élevés des outils, etc. Dans ce cas, ces éléments seront regroupés dans le même poste de travail. Les équations de cette contrainte sont les suivantes :

$$\sum_{k=1}^K X_{uk} X_{vk} = 1 \quad (u, v) \in ZS \quad (1.4)$$

Pour comprendre ces équations, prenons le même exemple avec $K = 3$. Supposons que le couple (2,6) appartient à ZS . On aura alors l'équation suivante :

$$\sum_{k=1}^3 X_{2k} X_{6k} = 1 \Leftrightarrow X_{21} X_{61} + X_{22} X_{62} + X_{23} X_{63} = 1$$

Cette équation force les deux éléments 2 et 6 à être dans le même poste.

2- *Contraintes d'incompatibilité* : Ces contraintes sont reliées aux éléments qui ne peuvent pas être ensemble dans le même poste de travail. À titre d'exemple, la soudure à l'arc ne peut pas être jumelé à une tâche de nettoyage utilisant un liquide inflammable.

Ces contraintes s'écrivent comme suit :

$$X_{uk} + X_{vk} \leq 1 \quad k = 1, \dots, K \quad \text{et } (u, v) \in ZD \quad (1.5)$$

Dans le réseau précédant, supposons pour $K = 3$ que les éléments 8 et 9 ne peuvent pas être ensemble dans le même poste, les équations qui vérifient cela s'écrivent de la façon suivante :

$$X_{81} + X_{91} \leq 1$$

$$X_{82} + X_{92} \leq 1$$

$$X_{83} + X_{93} \leq 1$$

Avec ces 3 équations, les éléments 8 et 9 ne peuvent faire partie du même poste.

1.8.5. La Fonction Objective

Plusieurs fonctions objectives sont possibles, cette variété est due au critère d'optimisation considéré. Dans ce modèle, nous avons défini une constante K (le nombre maximum de postes de travail possible sur la ligne d'assemblage), cette constante va servir dans la définition de la fonction objective.

Pour minimiser le temps d'inactivité, on tente d'affecter les éléments de travail à un nombre minimal de postes de travail, les postes inutilisés seront écartés de la solution.

Pour réaliser cela, nous définissons des coefficients de coûts C_{ik} tel que $NC_{ik} \leq C_{i,k+1}$ avec $k = 1, \dots, K$ et N le nombre d'éléments de travail dans le réseau.

La fonction objective se définit comme suit :

$$\text{minimiser } \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K C_{ik} X_{ik} \quad (1.6)$$

Cette fonction objective assure un nombre minimal de postes de travail sur la ligne d'assemblage. Pour plus de détails sur les formulations mathématiques proposées, consulter Baybars [6]. Pour une formulation plus générale, voir DECKRO [18]. L'objectif du modèle de DECKRO est de minimiser le temps de cycle et le nombre de postes simultanément.

CHAPITRE 2

TECHNIQUES DE RÉOLUTION DU PROBLÈME D'ÉQUILIBRAGE DES LIGNES D'ASSEMBLAGE

Depuis les années cinquante, les chercheurs ont utilisé plusieurs méthodes pour résoudre le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage [45]. Ces approches se résument en :

1. Énumération de toutes les séquences possibles;
2. sélection de la meilleure séquence d'un ensemble de séquences choisi arbitrairement;
3. sélection d'une solution compatible avec la pratique courante de la compagnie;
4. utilisation des algorithmes (méthodes exactes);
5. solution obtenue par une heuristique (méthode inexacte);
6. solution obtenue à l'aide d'algorithmes génétiques.

Ces approches ont été examinées par plusieurs chercheurs. La méthode d'énumération est impraticable sauf pour les problèmes triviaux (pour le réseau de la figure 1.1, il y a 4873 séquences faisables). La deuxième approche ne garantit pas l'obtention d'une meilleure solution car le choix de l'échantillon est arbitraire.

En bref, la plupart des méthodes développées depuis la publication du premier modèle mathématique s'intègrent dans les deux catégories suivantes : les algorithmes (méthodes exactes) et les heuristiques (méthodes inexactes). Ce chapitre vise essentiellement à faire connaître ces méthodes.

2.1 Méthodes Exactes

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour résoudre les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage. Parmi ces algorithmes, nous présentons les suivantes :

2.1.1 Algorithmes proposés pour la résolution du SALBP-1

2.1.1.1 Algorithmes de la programmation en nombre entier (PI)

Dans cette catégorie, les méthodes les plus utilisées sont les méthodes d'exploitation arborescente (branch & bound).

Les procédures par séparation et évaluation permettent de déterminer par énumération implicite des solutions réalisables d'un problème, celles qui optimisent certains critères.

L'exploration des solutions réalisables du problème étudié repose sur deux principes :

a- Un principe de séparation qui permet de réduire l'étude de l'ensemble des solutions réalisables (par exemple l'ensemble U) à celle de sous-ensembles de U de plus en plus réduit. Ce principe de séparation consiste le plus souvent en une partition;

b- un principe d'évaluation. Pour chaque sous-ensemble de U obtenu par séparation, ce principe consiste à définir une évaluation par défaut dans le cas d'une minimisation de la fonction objective. Le processus d'exploitation des solutions est représenté par une arborescente d'où vient le nom "Méthodes d'exploitation arborescentes".

Cette arborescence a pour racine l'ensemble des solutions réalisables U et pour autre sommet les sous-ensembles de U créés successivement par séparation.

Le mode de construction de l'arborescence dépend du choix de sommet que l'on doit séparer.

Dans les Procédures dites par Séparation et Évaluation Progressive (PSEP), on choisit le sommet sans successeur qui a la meilleure évaluation dans l'arborescence, tandis que dans les Procédures par Séparation et Évaluation Séquentielle (PSES), on choisit le dernier sommet créé par séparation. Les procédures PSEP consistent à faire une exploitation en largeur, alors que les procédures PSES le font en profondeur.

1. Algorithme général de la programmation en nombre entier appliquée au SALBP-1

Thangavelu et Shetty (1971) ont proposé un algorithme général de la programmation en nombre entier basée sur l'algorithme additif de Balas(1965). Cet algorithme est une méthode d'exploitation en profondeur (PSEP). Elle est composée de deux procédures, une

pour compléter la solution partielle si elle conduit à une solution faisable meilleure que la précédente, la deuxième est pour le retour en arrière «backtracking» et l'enregistrement de la meilleure solution obtenue.

2. Algorithmes spécialisés basés sur les méthodes générales de la programmation en nombre entier

Dans cette partie, on présente deux méthodes spécialisées pour les problèmes SALBP-1. La première a été proposée par Patterson et Abbracht (1975). Cette méthode examine les séquences des programmes O-1 pour l'obtention des solutions faisables.

Pour réduire le nombre de variables, ils introduisent le concept de poste au plus tôt et au plus tard pour chaque élément de travail. En plus, ils éliminent les contraintes d'occurrence, ils utilisent aussi des tests de faisabilité pour les contraintes de préséances et un test binaire de non faisabilité pour les contraintes du temps de cycle.

La deuxième méthode a été proposée par Talbot et Patterson [42]. Elle est basé sur l'algorithme d'énumération de Balas.

Cet algorithme utilise des variables entières plutôt que des variables binaires (le nombre de variables égal au nombre d'éléments de travail), cela signifie une réduction importante de la mémoire allouée à la résolution du problème. Des parties significatives du processus d'énumération sont réalisées implicitement par l'utilisation des tests. (pour des détails consulter Baybars [6])

3. Algorithmes spécialisés «Branch and bound»

Les solutions du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage peuvent être représentées par un arbre. Chaque chemin représente une solution faisable et chaque arc représente un poste de travail. Le premier algorithme développé pour SALBP-1 et qui utilise cette notion, a été construit par Jackson(1956).

En utilisant la méthode d'énumération de Jackson, Van Assche et Herroelen (1979) ont construit une procédure par séparation et évaluation progressive «frontier search method». Dans cette procédure, ils utilisent des règles de dominance, des arguments de limitation et

des heuristiques de branchement pour limiter l'exploration dans l'arbre et pour trouver rapidement une solution. Wee et Magazine(1981a) ont présenté aussi une méthode de Branch & Bound. Dans cette méthode, ils utilisent deux heuristiques (IUFFD et IUBRPW) pour générer une limite supérieure sur le nombre optimum de postes nécessaires. La première est une variante de la règle «First Fit Decreasing» utilisée dans les heuristiques développées pour le problème «Bin Packing» (Wee et Magazine [42]).

En utilisant cette règle (FFD) les éléments de travail sont listés dans un ordre décroissant de leurs temps d'exécution (similaire à la règle du candidat le plus large de Moodie et Young [33]). Dans l'ordre indiqué, les éléments sont affectés aux postes avec un temps libre plus grand ou égal au temps de l'élément. Après l'affectation d'un élément, la liste des éléments candidats est mise à jour et elle est ordonnée dans un ordre décroissant du temps de réalisation des éléments (de là, découle le nom «IUFFD: immediate update first fit decreasing»). La deuxième heuristique est celle nommée : «backward recursive positionnal weight» (BRPW). Elle utilise aussi le principe de mise à jour de la liste des éléments candidats. La liste est ordonnée en ordre décroissant selon le BRPW (c'est la somme des temps de l'élément concerné et le temps de tous ses prédécesseurs).

Wee et Magazine utilisent un arbre d'énumération similaire à celui de Jackson (1986). Chaque nœud de l'arbre représente un poste regroupant les éléments qui respectent les contraintes de préséances et de temps de cycle. La procédure commence avec un nombre de postes arbitraire. Si avec ce nombre on trouve une solution, il sera baissé de 1 et la procédure est répétée jusqu'à l'obtention d'une solution optimale. Le nœud de départ (0) est l'ensemble vide et les nœuds descendant du nœud 0 représentent les ensembles des éléments candidats au premier poste, (Baybars [6]).

2.1.1.2 Méthodes basées sur d'autres techniques de la programmation en nombre entier

Klein (1963) a proposé une approche alternative pour résoudre SALBP-1. Il a présenté deux formulations différentes au problème. La première commence par la résolution d'une série de problèmes d'affectations. Klein propose de générer toutes les séquences faisables

des éléments pour un diagramme de préséances donné. L'affectation qui minimise le temps d'inactivité est déterminée par la résolution du problème d'affectation associé. Cette procédure est répétée pour chaque séquence faisable. La solution optimale du problème SALBP-1 se trouve parmi les solutions de la série des problèmes d'affectations.

La deuxième formulation est similaire à la méthode proposée par Gutjahr et Nemhauser. Pour comprendre la méthode, on présente les définitions suivantes :

- 1- Selon Held, Karp et Sheresian (1963), un sous-ensemble faisable est un sous-ensemble d'éléments qui peuvent être réalisés sans la réalisation à priori de n'importe quel autre élément et dans n'importe quel ordre sans violation des relations de préséances.
- 2- Une sous séquence faisable est un cas spécial : Elle a été défini comme étant une sous séquence d'éléments qui peuvent être réalisés dans l'ordre indiqué sans la finition de n'importe quel autre élément.

Pour illustrer les deux définitions précédentes, voici un exemple :

Pour le réseau de la figure 2.1, l'ensemble {1,2,3,4} est un sous-ensemble faisable car on peut le réaliser sans la finition à priori de d'autres éléments, en plus les éléments 1 et 2 peuvent être réalisés dans n'importe quel ordre.

Pour la deuxième définition, supposons que les éléments 1 jusqu'à 8 ont été affectés à des postes. Dans ce cas, la séquence [9,10,11] est faisable et doit être réalisée dans l'ordre indiqué avec respect aux contraintes de préséances.

Gutjahr et Namhauser utilisent le concept des sous-ensembles faisables. La méthode est une technique de recherche du chemin le plus court. Ils commencent par la génération d'un réseau orienté basé sur le diagramme de préséances, les nœuds correspondent aux sous-ensembles faisables. Le nœud de la source est l'ensemble vide et le nœud puits est l'ensemble de tous les éléments. Le temps associé à chaque nœud est simplement la somme des temps de tous les éléments appartenant à ce nœud.

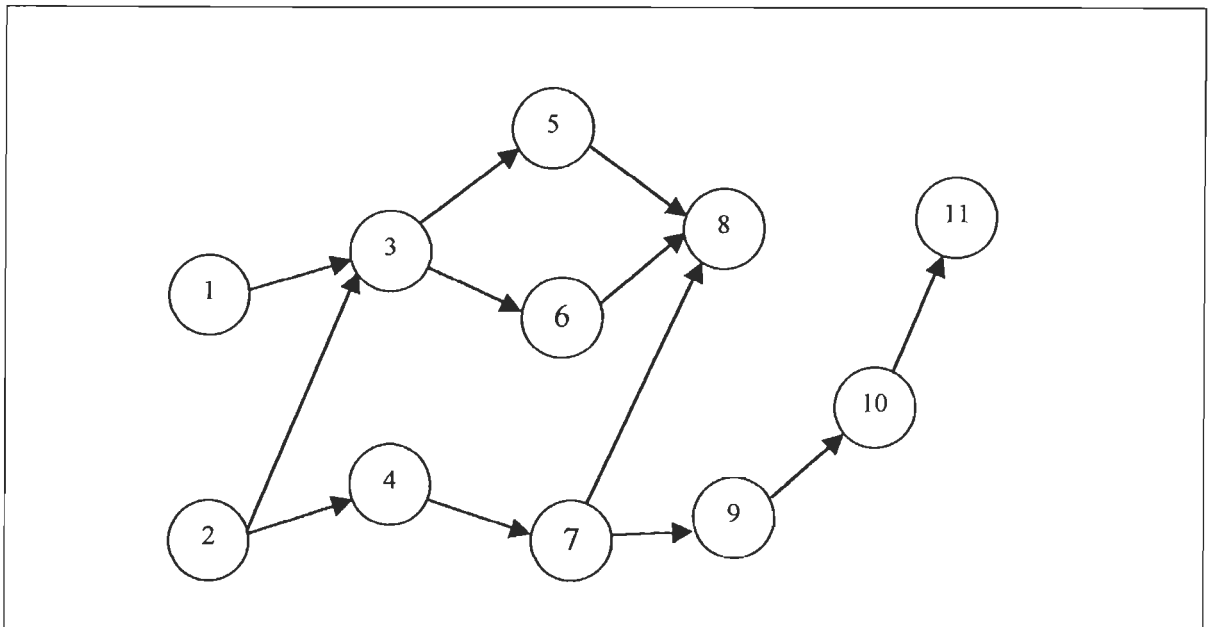


Figure 2.1. Réseau de 11 éléments de travail

Soit $S(i)$ le sous-ensemble d'éléments représenté par le nœud i . Un arc (i, j) est dans le réseau orienté si et seulement si $S(i)$ est un sous-ensemble de $S(j)$ et

$$T(j) - T(i) \leq C \quad (2.1)$$

$T(j)$: temps associé au nœud j

$T(i)$: temps associé au nœud i

C : temps de cycle

Ainsi, un arc (i, j) correspond à l'affectation à un poste des éléments qui se trouvent dans $S(j)$ et non pas dans $S(i)$. Par conséquent, il y a une correspondance un à un entre les chemins (source- puits) et les affectations faisables. Ainsi, trouver le chemin le plus court dans le réseau orienté est équivalent à trouver le nombre minimal de postes nécessaire.

2.1.1.3 Les méthodes de la programmation dynamique

Le premier algorithme pour résoudre SALBP-1 a été développé par Jackson (1956). L'algorithme commence par la génération de toutes les affectations faisables au premier

poste (parmi ces affectations il y a sûrement une affectation qui va appartenir à la solution optimale). Étant donné les affectations au premier poste, il génère toutes les affectations au deuxième poste. Après, pour chaque combinaison (premier, deuxième poste), toutes les affectations faisables seront construites pour le troisième poste, etc. Le processus est répété et chaque fois on ajoute un poste jusqu'à l'obtention d'une solution optimale.

Jackson utilise plusieurs règles pour réduire le nombre de séquences générées. Ces règles se résument en ce qui suit :

- 1- toute séquence similaire à une autre sera éliminée (une seule sera gardée)
- 2- toute séquence dominée sera éliminée (une séquence dominée est une séquence dont tous ses éléments sont inclus dans une autre séquence).

Quelques années plus tard (1962), un nouvel algorithme basé sur la programmation dynamique a été présenté par Held et Karp. Dans cet algorithme, les auteurs ont utilisé les deux concepts suivants: les sous-ensembles faisables et les séquences faisables. (Pour plus de détails sur cette méthode, consulter Baybars [6]).

2.1.2 Méthodes exactes proposées pour la résolution du SALBP-2

2.1.2.1 Définition

Le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage de type-2 est un problème qui a pour objectif la minimisation du temps de cycle étant donné un nombre de postes fixe. Ce type de problème est classé dans la catégorie des problèmes NP-HARD, ainsi sa résolution exige un temps et un espace mémoire importants.

2.1.2.2 Méthodes Proposées

Il y a peu d'algorithmes proposés pour résoudre les problèmes SALBP-2 puisque n'importe quel algorithme proposé pour résoudre SALBP-1 peut être utilisé pour résoudre les problèmes SALBP-2 en augmentant successivement le temps de cycle pour le nombre de postes donné jusqu'à l'obtention d'une solution optimale (voir mastor 1970 et talbot-Patterson [46]).

Parmi les méthodes de résolution des problèmes SALBP-2 on trouve celle de Helgeson et Birnie [22]. Ils ont proposé une procédure itérative basée sur leur heuristique «Ranked Positional Weight». Une autre méthode a été proposée par Mansoor (1964b). Elle est basée sur l'heuristique de Helgeson et Birnie «Ranked Positional Weight method ». La procédure commence avec un nombre de postes égal au nombre théorique de postes. Elle cherche une séquence faisable contenant tous les éléments de travail. Si cette séquence est trouvée, on regroupe les éléments dans des sous-ensembles, chacun représente un poste de travail, sinon le temps de cycle est augmenté par une unité. Si la séquence ne peut être générée, le nombre de postes sera augmenté d'une unité, puis on répète la procédure jusqu'à l'obtention d'une solution optimale.

Mansoor et Yadin (1971) ont présenté une autre procédure qui minimise le temps de cycle étant donné un nombre de postes fixe. Elle commence avec un temps de cycle égal au temps de cycle théorique. Son objectif est de trouver une séquence faisable qui va contenir tous les éléments de travail. Si cette séquence est trouvée, alors le temps de cycle considéré est le minimum. Sinon, le temps de cycle d'essai est augmenté d'une unité et la procédure est répétée jusqu'à l'obtention d'une solution optimale.

Une autre méthode nommée BALB basée sur les poids pondérés a été proposée par Rao (1971). Cette méthode commence par le calcul du temps d'inactivité théorique en utilisant la limite inférieure du nombre de postes. Dans une deuxième étape, la procédure remplit les postes tout en actualisant le temps d'inactivité. Ce processus est répété jusqu'au remplissage de tous les postes. S'il n'y a pas de solution faisable, le temps de cycle est augmenté d'une unité et la procédure est répétée une autre fois.

D'autres méthodes ont été proposées par (Wee, Magazine 1981b) et (Charlton, Deuth 1969) pour résoudre le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage de type-2, (consulter Baybars [6]).

2.2 Algorithmes génétiques appliqués aux problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblages

Dans les dernières années, un intérêt particulier a été voué aux algorithmes basés sur la génétique. Des chercheurs ont examiné leurs utilisation pour optimiser des fonctions non linéaire, d'autres les ont utilisés pour résoudre, entre autres, le problème du voyageur de commerce. L'intérêt de cette section est de démontrer leurs utilités pour résoudre des problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage.

2.2.1 Définition

Un algorithme génétique opère avec un ensemble de solutions potentielles (population). Chaque individu de cette population représente une solution potentielle. La population change dans le temps en conservant toujours la même taille (par exemple : de taille N). Chaque individu est représenté par une chaîne de caractères. A chaque itération, une valeur nommée «fitness value» $f(i)$ avec $(i = 1, \dots, N)$ est calculée pour chaque individu de la population courante.

Basé sur la fonction $f(i)$, des individus sont sélectionnés comme des parents potentiels. Ils forment un groupe homogène, en anglais «mating pool». Ce groupe aura la même taille que la population initiale (N). Cela veut dire que ce groupe contient des individus en plusieurs copies et d'autres sans duplication. Les individus non choisis pour être dans le groupe homogène sont perdus.

Prenons un exemple simple pour illustrer ce principe. Supposons que la population initiale est composée de 8 individus {a, b, c, d, e, f, g, h}, chaque individu est composé d'une chaîne de caractères simple (une seule lettre).

Selon une «fonction fitness» quelconque, on a choisit des individus de cette population pour être dans le groupe homogène, par exemple a, c, d et f. Le groupe homogène doit être de même taille que la population initiale, soit 8 individus. Donc, il sera composé des 4 individus choisis et 4 autres qui sont des copies de un ou plusieurs individus de l'ensemble

des individus choisis $\{a, c, d, f\}$. Le groupe homogène est formé par exemple de l'ensemble suivant $\{a, a, c, d, d, f, f, f\}$, les individus b, e, g et h de la population initiale sont perdus.

Deux nouveaux individus peuvent être obtenus de deux parents potentiels se trouvant dans le groupe homogène par le choix d'un point aléatoire sur chaque chaîne (représentant chaque individu), couper les deux chaînes en ce point et faire joindre les morceaux résultants deux à deux. Ainsi les parents A-B-C-A-B-C-A-B-C et A-A-B-B-C-C-C-B-A en les coupant après la troisième lettre, peuvent produire les individus A-B-C-B-C-C-C-B-A et A-A-B-A-B-C-A-B-C. Ce processus est dit «crossover» Il n'est pas nécessaire que tous les individus du groupe homogène soient impliqués dans ce processus. Les individus dans le groupe homogène peuvent aussi changer par une mutation aléatoire des caractères dans la chaîne de caractères de l'individu concerné.

Les deux processus (crossover, mutation) permettent d'obtenir une nouvelle génération. En répétant les processus plusieurs fois, les différences entre les individus deviennent petites. En outre, si l'algorithme génétique fonctionne bien, la population converge vers une bonne solution au problème d'optimisation posé. Le meilleur individu sera probablement proche de l'optimum.

Le concept général des algorithmes génétiques se présente comme suit (Anderson [2]) :

Répéter jusqu'à ce que la variance de la population soit petite
Pour chaque individu, évaluer la fonction $f(i)$ « fitness value »
Créer un groupe homogène de taille N basé sur $f(i)$.
Pour $i=1$ à $(N/2)$ enlever des paires d'individus (j, k) du groupe homogène.
Recomposer en utilisant les individus j et k .

Dans le contexte des algorithmes génétiques, le problème ALB est celui de maximiser le taux de production, en d'autres mots, minimiser le temps de cycle étant donné un nombre de postes fixes.

Plusieurs mécanismes sont nécessaires pour adapter un algorithme génétique aux problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage. Ces mécanismes seront définis plus en détails dans la partie qui suit.

2.2.2 Codage

Il y a deux aspects de codage. Le premier consiste à relier la solution aux éléments de la chaîne de caractères. Dans ce cas, une solution est représentée par une chaîne, chaque élément de cette chaîne est un numéro. Le numéro dans la i ème place sur la chaîne représente le poste à lequel le i ème élément de travail sera affecté. Le deuxième aspect est la numérotation des éléments de travail. Cette numérotation est importante pour éviter que les opérations de croisement (en anglais crossover) divisent la chaîne de caractères dans un point où les éléments adjacents sont proches dans le réseau de préséances. Pour cette raison, il est nécessaire d'utiliser une numérotation compatible avec les relations de préséances. Par conséquent, si un élément précède un autre, il sera placé avant sur la chaîne de caractères.

Pour illustrer ces définitions, prenons l'exemple du réseau de la figure 2.2, l'affectation des éléments de travail aux postes sera codée de la façon suivante 1121223233

Le tableau suivant montre la position de chaque élément dans le code précédent.

Chaîne de caractères	1	1	2	1	2	2	3	2	3	3
Élément de travail	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Poste # 1 = {1, 2, 4}, **Poste # 2** = {3, 5, 6, 8}, **Poste # 3** = {7, 9, 10}

2.2.3 Identification des solutions faisables

Plusieurs solutions obtenues par un algorithme génétique sont non faisables (violation des contraintes de préséances). Pour éliminer ces problèmes, quelques auteurs ont proposé d'utiliser des formes spéciales du processus de croisement et de mutation pour garantir l'obtention des solutions faisables dans tous les cas. D'autres optent pour les opérateurs standards.

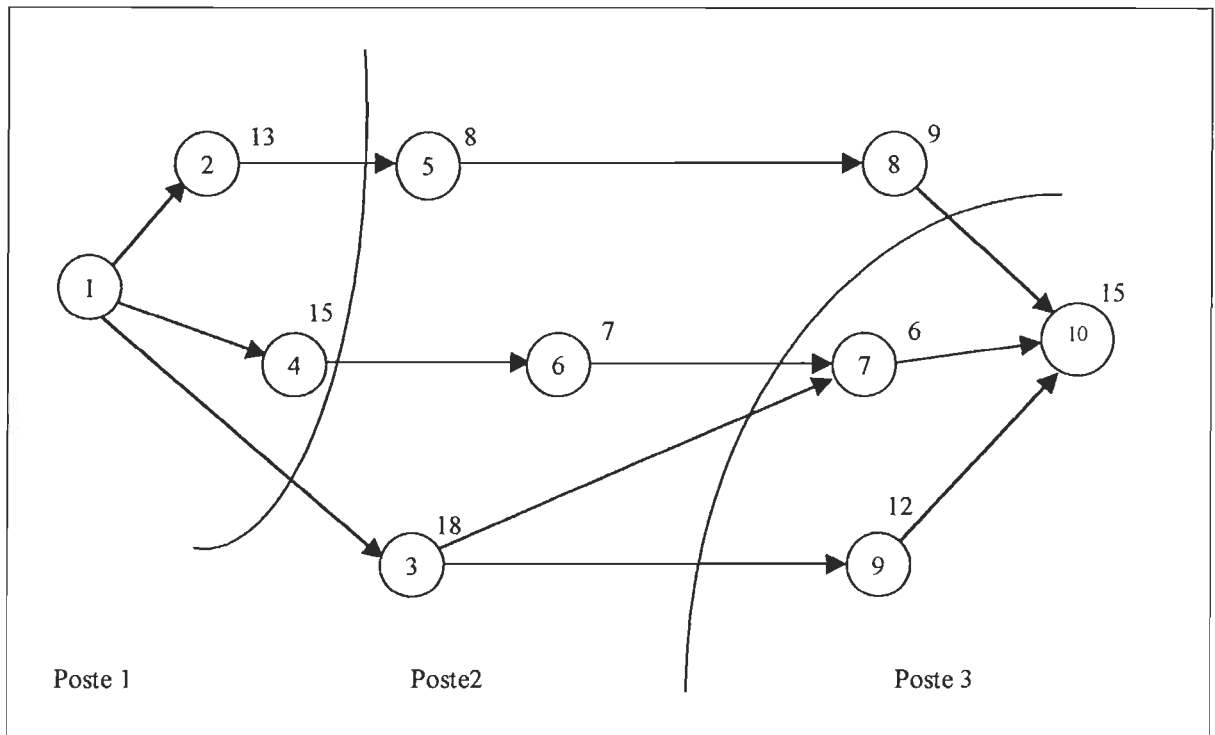


Figure 2.2. Un réseau de 10 éléments

Pour éliminer les problèmes de non faisabilité dans le cas où on utilise des opérateurs standards, trois approches ont été proposées :

- 1- La première est d'utiliser une fonction de pénalité pour conduire les solutions vers la faisabilité ;
- 2- La deuxième est de forcer chaque chaîne générée de correspondre à une solution faisable. Ainsi, après avoir manipulé la chaîne par les opérateurs «crossover» et «mutation», une corrélation sera faite pour ajuster la chaîne afin d'être faisable;
- 3- La troisième approche est caractérisée par le décodage de la chaîne de caractères. L'individu reste inchangé dans la population mais il sera décodé en utilisant des règles garantissant une affectation faisable.

2.2.4 La sélection pour le groupe homogène et le choix de la fonction « fitness »

Pour le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage, la valeur «fitness» inclue un élément correspondant au temps total du poste le plus chargé et une pénalité pour toutes les solutions non faisables à cause des relations de préséances.

Nous définissons la fonction objective de la façon suivante :

$$\text{Min } Y = \max_i(S_i) + kN_v \quad (2.2)$$

S_i : temps total des éléments de travail affectés au poste i ;

N_v : le nombre de relations de préséances non respectées ;

k : une constante égale au temps de l'élément de travail le plus long.

Le but principal est de minimiser la fonction objective, qui n'est pas une mesure de $f(i)$ «fitness value». Car nous voulons maximiser la valeur fitness et non pas la minimiser.

Il y a plusieurs façons pour pallier cette difficulté. Nous présentons les suivantes :

$$1- f(i) = M - Y \quad (2.3)$$

$$2- f(i) = 1/Y \quad (\text{l'inverse de la fonction objective}) \quad (2.4)$$

$$3- f(i) = \exp(-hv_i) \quad (2.5)$$

M : une constante très grande de telle façon que $f(i)$ soit positif;

Y : la valeur de la fonction objective;

h : une constante choisie de telle sorte que le «fitness» se situe à l'intérieur d'un intervalle particulier.

Pour les opérateurs de «crossover» et de «mutation», leur application sur les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage est similaire à la manière décrite précédemment.

2.3 Méthodes proposées pour la résolution des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage avec modèles mixtes

Notation

MMAL : mixed model assembly line ;

MMLBP : mixed model line balancing problem ;

MMLS : mixed model line sequencing ;

MMLSP : mixed model line sequencing problem ;

MMALP : mixed model assembly line problem ;

N : nombre de modèles considéré ;

N_j : ($j = 1, \dots, N$) nombre d'unités du modèle j à produire durant la période T ;

n : nombre de postes sur la ligne d'assemblage ;

p_{ij} : ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, N$) temps d'opération d'une unité du modèle j dans le poste i ;

C : temps de cycle de la ligne de production ;

C_j : ($j = 1, \dots, N$) temps de cycle du modèle j ;

T : quart de travail (shift) ou une journée de travail ;

t_{jk} : ($j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, Z$) temps de l'élément k du modèle j ;

γ : temps fixe entre le lancement de deux unités successives (temps de lancement fixe) ;

$\tau = \max C_j (j = 1, \dots, N)$;

Z : le nombre total d'éléments dans le diagramme de préséances combiné.

2.3.1 Introduction

La diversification dans la demande des clients et le désir de produire sur commande et de réduire les inventaires des produits finis forcent les manufacturiers à assembler simultanément une variété de produits sur une seule ligne de production.

Pour arriver à avoir une ligne efficace, les planificateurs sont forcés de résoudre deux problèmes :

- 1- L'équilibrage de la ligne d'assemblage;
- 2- le jalonnement des modèles.

Une variété de méthodes pour la résolution de ce problème existent [50]. La plupart ont été développées pour la résolution du problème d'équilibrage avec un seul modèle. Cependant, elles peuvent être adaptées pour résoudre les cas des modèles mixtes.

D'autre part, la méthodologie pour résoudre le problème de jalonnement n'est pas aussi riche que celle du problème d'équilibrage.

Deux approches de résolution sont possibles pour résoudre le cas des modèles mixtes :

- A. Approche modulaire : Premièrement, on réalise l'équilibrage pour chaque modèle, par la suite, on combine l'ensemble des solutions partielles obtenues pour former la solution globale.
- B. Approche globale : on considère le problème dans son ensemble et la solution sera globale.

2.3.2 Définition du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage avec modèles mixtes

Le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage avec modèles mixtes (MMLBP) est le problème de distribution du temps total de traitement des éléments de travail sur les postes de travail de manière à avoir une charge de travail presque égale sur chaque poste. Il diffère du cas avec un seul modèle par le fait qu'il traite plusieurs modèles avec des éléments de travail potentiellement différents.

Les hypothèses souvent utilisées dans ce cas sont les suivantes :

- 1- Le temps des éléments de travail sont constants et donnés pour chaque modèle ;
- 2- les relations de préséances entre les éléments de travail sont prédéfinis.

L'efficacité est mesurée par le temps d'inactivité qui est défini comme suit :

soit I_{ij} : le temps d'inactivité du poste i quand il traite le modèle j .

Le temps d'inactivité total I pour une quart de travail (shift) est donné par :

$$I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N I_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N (C - P_{ij}) N_j \quad (2.6)$$

Ainsi, l'objectif est de minimiser le temps d'inactivité I , en d'autres mots, trouver la fonction objective f suivante :

$$f(n,C) = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N (C - p_{ij}) N_j \right] \quad (2.7)$$

De cette équation, le problème MMLBP est exprimé dans une des deux formes suivantes :

- 1- Pour un temps de cycle donné C , minimiser le nombre de postes (n);
- 2- pour un nombre de postes donné n , minimiser le temps de cycle C .

Pour résoudre MMLBP, n'importe quelle technique de résolution des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage avec un seul modèle peut être appliquée avec les deux approches présentées ci-dessous.

Deux approches de résolution de ce problème ont été proposées : la première est basée sur l'affectation des éléments de chaque modèle pris séparément. Cette procédure consiste en la résolution de plusieurs problèmes avec un seul modèle. Avec cette approche, des éléments similaires dans tous les modèles peuvent ne pas être réalisés dans les mêmes postes. Ainsi, il peut être nécessaire d'ajouter des ressources supplémentaires.

Dans la deuxième approche [44], les éléments de travail sont affectés aux postes sur la base d'un quart de travail (shift) plutôt que sur la base du temps de cycle comme dans le cas des problèmes avec un seul modèle.

2.3.3 Problème de jalonnement des modèles mixtes

Pour chaque modèle, le contenu de travail peut varier, conduisant à une affectation irrégulière de la charge de travail sur la ligne d'assemblage. Cette irrégularité tend à croître avec la dissimilarité entre les contenus de travail des modèles. Par conséquent, elle réduit la performance globale de la ligne de production.

Dans le but de réduire cette irrégularité, le jalonnement des modèles est nécessaire et consiste à déterminer la séquence optimal conduisant à une utilisation efficace de la ligne d'assemblage. Les hypothèses souvent utilisées dans le cas du jalonnement sont les suivantes :

- 1- La ligne d'assemblage est considérée comme un convoyeur qui se déplace avec une vitesse constante et les unités sont équidistantes ;
- 2- La charge de travail est divisée équitablement sur tous les postes de travail en utilisant des méthodes d'équilibrage des lignes d'assemblage ;
- 3- Les modèles ne changent pas d'un quart de travail (shift) à un autre ;
- 4- Il y a un seul opérateur par poste.

Le jalonnement des modèles dépend du taux de lancement utilisé (variable ou fixe). Avec un taux de lancement variable, les unités peuvent être lancées sur la ligne dans n'importe quel ordre étant donné que le temps du poste est égal au maximum des temps de cycle de tous les modèles. Cependant, la situation est différente avec le taux de lancement fixe. Dans ce cas, il est nécessaire de jalonner les modèles afin de minimiser l'inefficacité de la ligne.

Dans la plupart des études, le taux fixe de lancement est utilisé avec une des deux formulations suivantes : Pour un programme de production donné et une charge de travail équilibrée.

- A. Déterminer la séquence des modèles qui minimise l'inefficacité de l'opérateur pour une ligne d'assemblage de longueur fixe. Cette formulation permet une sélection arbitraire des dimensions des postes, elle est mieux utilisée dans des lignes d'assemblage déjà établies.
- B. Déterminer la séquence des modèles qui minimise la longueur totale de la ligne pour un taux d'inefficacité d'opérateur nul. Contrairement à la première, celle-ci ne requiert pas des hypothèses pour les paramètres du poste, elle répond au problème de jalonnement des modèles quand la ligne est nouvelle.

2.3.4 Quelques méthodes de résolution du MMALP

2.3.4.1 La méthode de jalonnement de Wester et Kilbridge [53]

Le problème de jalonnement des modèles mixtes a été défini au début par Wester et Kilbridge. Leur méthode se base sur les hypothèses mentionnées plus haut plus la suivante: les dimensions de chaque poste sont fixes (les tolérances sont nulles sur les deux côtés du poste). Ils ont utilisé deux critères de jalonnement :

- 1- Le temps inoccupé de l'opérateur n'est pas permis;
- 3- La congestion du travail (accumulation du travail) dans n'importe quel poste doit être évitée.

Ils ont proposé deux méthodes de résolution. La première est basée sur un taux de lancement variable où le temps entre le lancement de deux unités est proportionnel au temps total du contenu de travail des unités. Pour une utilisation optimale de la ligne d'assemblage, le temps de cycle de l'opérateur est égal au maximum des temps de cycle de tous les modèles $\tau = \max C_j (j = 1, \dots, N)$. Dans ce type de lancement, il n'y a pas de problème de jalonnement, les unités peuvent être lancées dans n'importe quel ordre. La deuxième méthode est basée sur un taux de lancement fixe, les unités seront mises en production dans des intervalles de temps réguliers.

2.3.4.2 Méthode d'équilibrage et de jalonnement de Thomopoulos

1- Équilibrage de la ligne: la procédure d'équilibrage assigne les éléments de travail aux postes sur la base d'un quart de travail plutôt que sur la base du temps de cycle. Cette procédure utilise le programme de production quotidienne et le diagramme de préséances avec les temps des éléments de travail (Thomopoulos [44]).

2- Le jalonnement des modèles : la procédure de jalonnement est basée sur le calcul des coûts de pénalités en cas d'inefficacité résultant du jalonnement de différents modèles en utilisant un taux de lancement fixe.

2.3.4.3 Méthode d'équilibrage de Macaskill [54]

Macaskill a présenté une formulation qui facilite l'obtention des solutions au problème d'équilibrage des lignes d'assemblage pour modèles mixtes à grande échelle. La structure générale de cette méthode est la suivante :

Soit le diagramme de préséances G_j associé avec le modèle $j (j = 1, \dots, N)$. G_j a un ensemble de nœuds $D(j)$ et un ensemble d'arcs $R(j)$ qui vérifies :

$$D(j) = \{d(j)_1, d(j)_2, \dots\}$$

$$R(j) = \{r(j)_1, r(j)_2, \dots\}$$

Les nœuds $(d(j)_1, d(j)_2, \dots)$ représentent les éléments de travail du modèle j et les arcs $(r(j)_1, r(j)_2, \dots)$ représentent les relations de préséances du même modèle. Les relations de préséances d'un ensemble de modèles $(j = 1, \dots, N)$ peuvent être définis par un diagramme de préséances combiné G_j avec un ensemble de nœuds $D(J)$ et un ensemble d'arcs $R(J)$ qui sont définis comme suit :

$$D(J) = \{D(1) \cup D(2) \cup \dots \cup D(N)\}$$

$$R(J) = \{R(1) \cup R(2) \cup \dots \cup R(N)\}$$

Pour déterminer si un élément de travail donné fait partie d'un modèle particulier, un vecteur $V(k)$ connu sous le nom du vecteur d'identification du modèle est associé avec chaque nœud de l'ensemble $D(J)$ et il est défini comme suit :

$$V(k) = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kN}) \quad \text{avec } (k = 1, \dots, Z)$$

avec $v_{kj} = 1$ si l'élément $d(j)_k$ appartient au modèle j ; 0 sinon.

La durée totale A_k de chaque occurrence de l'élément k dans chaque unité de chaque modèle est déterminée et allouée à chaque poste. Elle est défini comme suit :

$$A_k = \sum_{j=1}^N v_{kj} t(j)_k N_j \quad \text{avec } (k = 1, \dots, Z) \quad (2.8)$$

$t(j)_k$ est la durée de l'élément $d(j)_k$.

Les nœuds de G_j sont groupés dans des sous-ensembles B_i ($i = 1, \dots, n$) de telle sorte que chaque nœud $d(j)_k \in D(J)$ se trouve exactement dans un seul sous-ensemble B_i en tenant compte des contraintes de préséances. Ainsi pour chaque sous-ensemble B_i , l'expression suivante doit être vérifiée :

$$\sum_{z=1}^{z=s(i)} (A_k)_{iz} \leq T \quad \text{avec } i = 1, \dots, n \quad (2.9)$$

$(A_k)_{iz}$: la durée totale de l'élément représenté par le nœud $d(j)_k$;

$s(i)$: nombre de nœud dans le sous-ensemble B_i .

2.3.4.4 Méthode d'équilibrage et de jalonnement de Bonney et Schofield [55]

Bonney et Schofield ont conçu un programme informatique (connu sous le nom de NULISP) pour résoudre les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage et de jalonnement pour modèles mixtes.

L'approche utilisée est basée sur la génération de plusieurs solutions de telle sorte qu'il y a une forte probabilité d'obtenir une solution optimale. Chaque élément de travail est pondéré selon plusieurs facteurs tels que le temps de traitement de l'élément de travail, le nombre de successeurs, etc.

La procédure de résolution est basée sur l'équilibrage des modèles pris séparément. Pour le jalonnement des modèles, un programme séparé a été conçu pour régler ce problème.

2.3.4.5 Méthode d'équilibrage de John D.Lorenz [56]

Lorenz a proposé un programme informatique ALPACA (Assembly Planning And Control Activity) pour résoudre le problème MMALB. Il est utilisé comme un outil d'aide à l'équilibrage et le contrôle de lignes d'assemblage. Ce programme consiste en trois phases :

- 1- Planification (équilibrage des lignes);
- 2- Jalonnement des modèles;
- 3- Le contrôle ou bien l'évaluation des deux phases précédentes.

Les critères d'équilibrage considérés sont :

- 1- L'obtention d'un taux d'efficacité élevé du travail par la minimisation du temps d'inactivité;
- 2- Éliminer les temps d'opération qui dépassent largement le temps de cycle afin de ne pas affecter la qualité du produit;

- 3- Réduire la complexité de l'opération d'assemblage en terme du nombre des combinaisons (modèle/option) par opérateur.

Dans la phase de jalonnement, ALPACA simule l'assemblage d'une séquence de modèles à travers chaque poste développé dans la phase d'équilibrage.

La phase du contrôle relie le programme quotidien aux affectations effectuées à chaque poste. Dans cette phase, des rapports réguliers sur l'équilibrage des lignes pour chaque modèle sont produit, ces rapports peuvent être utilisés pour identifier les postes surchargés, ainsi que pour calculer l'efficacité de la ligne d'assemblage. Pour plus de détails sur ces méthodes consulter [50].

2.4 Les heuristiques

Le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage est un problème «NP-Hard», cela signifie que le temps de résolution croît exponentiellement avec la taille du problème. Par conséquent, pour les problèmes volumineux, les heuristiques sont les seules méthodes disponibles. En outre, il est plus facile de les adapter pour résoudre certains problèmes spéciaux par exemple, un problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage avec une contrainte sur la disponibilité d'une ressource.

Pour ces raisons, plusieurs heuristiques ont été développées pour répondre aux questions du milieu industriel. Talbot et al [43] ont divisé les heuristiques développées en quatre catégories :

- 1- Les heuristiques qui utilisent des règles «single pass» ;
- 2- Celles qui utilisent des règles combinées «composite rules» ;
- 3- Les heuristiques qui utilisent le «backtracking» ;
- 4- Les méthodes «optimal seeking».

Les principales étapes des méthodes des deux premières catégories sont similaires, leur structure générale se résume en ce qui suit :

étape 1 : établir la liste des éléments de travail candidats à l'affectation ;
étape 2 : si la liste est vide, ajouter un poste et aller à l'étape 1 sinon aller à l'étape 3 ;
étape 3 : assigner l'élément de travail qui a la priorité la plus élevée au poste courant.

Dans cette procédure, un élément de travail est candidat à l'affectation s'il vérifie les deux conditions suivantes :

- 1- Tous ses prédécesseurs sont déjà affectés à des postes ;
- 2- Le temps de réalisation de cet élément ne dépasse pas le temps restant dans le poste courant.

La différence entre les deux catégories réside dans le fait que dans la première, l'affectation d'un élément de travail est basée sur une seule règle de priorité tandis que dans la deuxième, on utilise deux ou plusieurs règles pour trouver une solution au problème posé. Les procédures appartenant à la troisième catégorie sont ceux avec le retour en arrière «backtracking», ces procédures essayent d'améliorer une solution obtenue précédemment. Finalement, la quatrième catégorie est composée des approches «optimal seeking». Ce sont des méthodes exactes avec un temps de résolution fixe. Elles ont été introduites pour voir la qualité des solutions obtenues.

Talbot, Patterson et Gehrlein [43] ont publié une étude dans laquelle ils ont comparé et évalué les quatre catégories du point de vue de leurs efficacité à résoudre les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage. Dans les sections suivantes, une description de chaque catégorie est présentée selon cette étude.

2.4.1 Les Règles de Décision « Single Pass »

Dans cette catégorie, 13 règles de priorité « single pass » ont été choisies (par exemple «maximum ranked positional weight» de Helgeson et Birnie [22], le nombre maximum des successeurs immédiats de Tonge (1961), le temps maximal de l'élément de travail de Moodie et Young [33], etc.

Chaque heuristique utilisant une règle de décision de cette catégorie consiste en une procédure simple qui affecte les éléments de travail aux postes selon leurs priorités en respectant les contraintes du temps de cycle et de préséances.

Les 13 règles de décision utilisées dans l'étude sont décrites dans la table 2.1.

2.4.2 Les Règles de Décision Combinées « Composite Decision Rules »

2.4.2.1 La meilleure des 13 règles (composite-13)

La première règle de décision combinée qui a été évaluée sélectionne la meilleure des solutions utilisant les règles de décision « single pass ». Mais dans certains cas, il est possible qu'une règle de décision donnée ne puisse distinguer entre les éléments de travail

Tableau 2.1. Les 13 Règles de priorités [43]

Rule	Reference	Notation	Basis for Determining Task Priority
1. Maximum Ranked Positional Weight	Helgeson & Birnie (1961)	MAXRPW	$RPW_i = t_i + \sum_{j \in S_i} t_j$
2. Maximum Total Number of Follower Tasks	Talbot et al. (1984)	MAXTFOL	NS_i
3. Maximum Task Time	Moodie & Young (1965)	MAXDUR	t_i
4. Maximum Number of Immediate Follower Tasks	Tonge (1961)	MAXIFOL	NIS_i
5. Minimum Slack	Talbot et al. (1984)	MINTSLK	$UB_i - LB_i$
6. Random Task Assignment	Arcus (1963)	RANDOM	random (uniform)
7. Minimum Lower Bound	Talbot et al. (1984)	MINLB	$LB_i = \left[\left(t_i + \sum_{j \in P_i} t_j \right) / c \right]^+$
8. Minimum Upper Bound	Talbot et al. (1984)	MINUB	$UB_i = N + 1 - \left[\left(t_i + \sum_{j \in S_i} t_j \right) / c \right]^+$
9. Minimum Task Number	Arcus (1963)	MINTSKNO	task number, i
10. Maximum Average Ranked Positional Weight	Talbot et al. (1984)	MAXAVGRPW	$RPW_i / (NS_i + 1)$
11. Minimum Upper Bound Divided by the Total Number of Followers	Talbot et al. (1984)	MIN(UB/TFOL)	$UB_i / (NS_i + 1)$
12. Maximum Task Time Divided by Task Upper Bound	Talbot et al. (1984)	MAX(DUR/UB)	t_i / UB_i
13. Maximum Total Task Followers Divided by Task Slack	Talbot et al. (1984)	MAX(TFOL/SLK)	$NS_i / (UB_i - LB_i)$

C Station cycle time.

N The number of tasks to be balanced into work stations.

$NS_i(NP_i)$ The total number of tasks which succeed (precede) task i (i.e., the number of elements of $S_i(P_i)$).

$NIS_i(NIP_i)$ The number of tasks which must immediately succeed (precede) task i .

$S_i(P_i)$ The set of tasks which must succeed (precede) task i .

t_i Assembly time required to complete task i .

$\lceil X \rceil^+$ The smallest integer greater than or equal to X .

candidats à l'affectation (par exemple, deux ou plusieurs éléments de travail candidats à l'affectation peuvent avoir le même temps de réalisation quand la règle de décision est basée sur le temps de réalisation des éléments de travail). Dans ce cas, il est possible d'utiliser une des 12 règles restantes pour briser cette égalité. En utilisant cette approche, on aura 156 (13×12) combinaisons de règles (règle/ bris d'égalité) pour résoudre les problèmes posés. En plus, il est possible d'équilibrer la ligne en commençant avec le dernier élément de travail dans le réseau de préséances et en terminant avec le premier. Par conséquent, on aura 312 (156×2) combinaisons de règles disponibles pour résoudre les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage.

2.4.2.2 Procédure d'échantillonnage biaisé d'Arcus

La procédure d'Arcus [3] utilise une approche d'échantillonnage biaisé pour générer des séquences faisables. Une liste « fit list » contenant les éléments de travail candidats à l'affectation est établie, des poids sont affectés aux éléments de travail. Un élément de travail est choisi pour l'affectation à un poste sur la base de son poids.

Dans l'étude d'évaluation et de comparaison entre les heuristiques, la règle d'arcus IX est choisie pour biaiser la sélection des éléments de travail. Les éléments de travail affectés seront ensuite enlevés de la liste qui sera mise à jour. Le processus continue jusqu'à ce que tous les éléments de travail soient assignés aux postes. La ligne sera équilibrée plusieurs fois résultant en plusieurs affectations possibles. La meilleure affectation est retenue comme solution optimale.

2.4.3 Heuristiques basées sur le « Backtracking »

Les procédures considérées dans cette catégorie sont les suivantes :

2.4.3.1 La Procédure d'énumération de Hoffmann (Hoffmann-0.0)

Cette procédure a été développée en 1963. Elle affecte à chaque poste (les postes sont ordonnés numériquement) une combinaison d'éléments de travail qui minimise le temps d'inactivité dans ce poste.

En commençant par le premier poste, une liste d'éléments de travail candidats à l'affectation est construite (un élément de travail est candidat si tous ces prédécesseurs ont été déjà affectés à des postes et que les temps de cet élément ne dépasse pas le temps restant dans le poste courant).

Via une énumération complète dans la liste construite de toutes les affectations faisables au premier poste, on trouve l'ensemble des éléments de travail qui minimise le temps d'inactivité dans le poste considéré. Cette combinaison d'éléments sera affectée au premier poste et le processus se répète pour les autres postes et à chaque fois on met à jour la liste des éléments candidats à l'affectation.

2.4.3.2 La Procédure d'énumération modifiée de Hoffmann (0.5, 1.0, 2.0)

L'approche originale de Hoffmann considère les postes de travail dans un ordre numérique ce qui conduit à une concentration du temps d'inactivité dans les derniers postes. En plus, quand la liste des éléments candidats est longue ou bien un temps d'inactivité nul n'existe pas ou il est difficile de l'obtenir (ce qui veut dire une énumération de toutes les combinaisons possibles), le temps de résolution dans ce cas sera très important.

Dans le but de palier à ces difficultés, Gehrlein et Patterson (1975) ont proposé une modification légère à la procédure originale de Hoffmann. Au lieu de déterminer une solution avec un temps d'inactivité nul, déterminer une solution avec un temps d'inactivité qui ne dépasse pas une limite prédéterminée. Gehrlein et Patterson utilisent le temps moyen d'inactivité par poste comme limite. La procédure de Hoffmann a été modifiée de la façon suivante : on arrête la recherche de la combinaison d'éléments de travail (p) résultant en un temps d'inactivité qui vérifie l'expression suivante :

$$0 \leq C - \sum_p t_i \leq \theta \left(\left[(C * M) - \sum_{i=1}^n t_i \right] / M \right) \quad (2.10)$$

M : le nombre de postes théorique ;

C : le temps de cycle ;

t_i : le temps de réalisation de l'élément i ;

θ : un paramètre permettant d'obtenir un équilibre requérant le plus petit nombre de postes, les valeurs les plus utilisées sont (0.5, 1.0, 2.0).

Gehrlein et Patterson ont montré que cette légère modification peut avoir un impact significatif sur le temps de résolution et que cette amélioration est souvent réalisée sans augmentation dans le nombre de postes nécessaires.

2.4.3.3 L'heuristique d'équilibrage des lignes d'assemblage de Dar_EL (MALB)

Dar-EL [16] a développé MALB en 1973, une heuristique qui découle de sa procédure itérative « optimal seeking » (1964). Basée sur l'heuristique de poids pondéré de Helgeson et Birnie [22] et enrichi par un algorithme « backtracking » qui génère toutes les séquences faisables.

Dar_EL a trouvé que le temps de résolution de sa première méthode réduit son applicabilité. Pour cette raison, il a développé une approche heuristique qui retient la puissance de l'approche optimale mais qui n'utilise pas un temps de résolution important, MALB était le résultat de ces efforts.

Pour limiter le nombre de séquences générées et réduire le temps de résolution, MALB utilise quatre types de règles qui sont les suivantes :

- 1- Les règles qui limitent le temps inoccupé dans chaque poste ;
- 2- celles qui limitent le « backtracking » dans le poste ;
- 3- celles qui limitent le « backtracking » entre les postes ;
- 4- celles qui limitent le « backtracking » total dans le problème.

2.4.4 Les Méthodes « Optimal Seeking »

Ce sont des méthodes de type exacte, elles ont été incluses avec les heuristiques pour voir la qualité des solutions obtenues pour un temps de résolution limité. Dans cette catégorie, on trouve les méthodes suivantes :

2.4.4.1 Les Méthodes Branch and Bound (MAG-1 et MAG-2)

Magazine et Wee (1981b) ont reporté d'excellents résultats de l'application de leur procédure B&B aux problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage de type-1. Dans leur méthode, chaque nœud de l'arbre de la solution correspond à un ensemble d'affectations faisables des éléments de travail à un poste particulier.

Deux règles de décision ont été utilisées : IUFFD « immédiat update first fit decreasing », dans la table on la réfère à MAXDUR. La deuxième est IUBRPW « immédiat update backward recursive positional weight » une variante de MAXRPW. En plus, cette procédure utilise une stratégie de branchement nommée « breadth-first search method ».

Une limite supérieure au niveau de chaque nœud est déterminée en utilisant une des deux heuristiques mentionnées précédemment pour les éléments de travail non affectés. MAG-1 et MAG-2 correspondent à l'utilisation des deux heuristiques IUFFD et IUBRPW respectivement.

2.4.4.2 Procédures basées sur la programmation en nombre entier (ALBCUT et ALBHOFF)

Deux variantes de la procédure de Talbot et Patterson ont été incluses dans l'étude d'évaluation considérée. La première utilise la règle de décision MINUB pour choisir un élément de travail pour l'affectation au poste courant. Pour briser l'égalité, elle utilise la règle MAXDUR.

La seconde (ALBHOFF) utilise aussi MINUB et MAXDUR comme règles de décision pour la recherche et le « backtracking » mais elle n'utilise aucune règle de découpage. En plus, le problème est initialement résolu par la procédure HOFFMANN-0.5 pour avoir une solution initiale et une limite supérieure sur le nombre de postes de travail nécessaire.

2.4.4.3 Approche basée sur la programmation dynamique

Shrage et Baker (1978) ont proposé une méthode efficace pour l'implantation de l'approche de Held et al (1963) à travers des procédures améliorées pour la génération des sous-ensembles faisables et pour le marquage «labelling».

2.4.4.4 La technique MUST (Multiple Solution Technique)

Une technique développée par Dar-El et Rubinovitch (1979) qui utilise l'énumération exhaustive pour générer les solutions des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage de type 2. La méthode fonctionne de la façon suivante :

En commençant par le poste #1, la méthode génère toutes les affectations faisables des éléments de travail , les redondances seront éliminées.

Au poste #2 et dans les postes qui suivent dans un ordre numérique, les sous-ensembles sont élargis par l'insertion de toutes les affectations faisables au poste.

Ce processus se répète jusqu'à ce que tous les éléments de travail soient assignés. MUST mémorise les ensembles comme une séquence de bits et utilise des mémoires tampon circulaires pour gérer le processus d'énumération exhaustive.

2.5 Conclusion

Après avoir consulté les méthodes présentées ci-haut, nous avons retenu cinq heuristiques. Nous avons écarté les méthodes exactes car les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage sont des problèmes NP-HARD. Les méthodes «optimal seeking» sont aussi écartées car ce sont aussi des méthodes exactes. Les méthodes de troisième catégorie sont aussi écartées car elles utilisent l'énumération exhaustive pour trouver la solution optimale. Il reste la première et la deuxième catégorie. À partir de ces deux catégories, nous avons retenu les quatre heuristiques dont leurs solutions se rapprochent le plus de la solution optimale [43]. La cinquième heuristique est retenue de l'étude de Boctor [12]. Cette méthode a prouvé une meilleure performance par rapport aux heuristiques évaluées par Talbot et al [43].

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES HEURISTIQUES PRISES EN CONSIDÉRATION

Nous décrivons dans ce chapitre les heuristiques utilisées dans l'application développée pour résoudre le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage. Ces heuristiques ont été choisies sur la base de leur performance en traitant des problèmes pris de la littérature et d'autres générés aléatoirement (consulter [43]). Les modèles retenus sont les suivants :

Comsoal

Une abréviation de « A Computer Method Of Sequencing Operations For Assembly Lines » (Arcus [3]). Cette heuristique utilise les probabilités comme règle primaire pour l'affectation des éléments de travail aux postes de travail. Un élément est choisi parmi tous les éléments candidats à l'affectation si sa probabilité est la plus élevée.

Méthode De Poids Pondéré

C'est une méthode « single pass ». Elle utilise le poids de chaque élément de travail comme règle de priorité, l'élément qui a le poids le plus élevé est choisi pour être affecté au poste courant.

Le poids de chaque élément se définit comme suit : soit un élément quelconque α avec un temps de réalisation t_α , le poids de cet élément est la somme de son temps de réalisation et le temps de tous ses successeurs (Helgeson et Birnie [22]).

Méthode Basée sur la Limite Supérieure (LS_i)

Dans cette procédure, le choix de l'élément pour l'affectation au poste courant est basé sur la limite supérieure. Celui avec la limite supérieure la plus basse est choisi pour être assigné au poste courant (Talbot et al [43]). Pour calculer cette limite supérieure, consulter le tableau 2.1.

Méthode Basée sur le rapport (t_i / LSi)

L'élément avec le quotient maximum est choisi pour l'affectation au poste courant (Talbot et al [43]).

Méthode Basée sur plusieurs règles de priorité

Quatre règles de priorité sont utilisées pour l'assignation des éléments de travail aux postes (Boctor [12]).

3.1 Contraintes considérées

Les heuristiques précédentes ont été augmentées pour traiter des contraintes additionnelles qui existent dans le milieu industriel et qui peuvent affecter la solution significativement.

La notation suivante est utilisée pour la modélisation des contraintes

$i = 1, \dots, n$ indice des éléments de travail ;

$k = 1, \dots, P$ indice des postes créés ;

$z = 1, \dots, Z$ indice des zones existant sur la ligne d'assemblage ;

$EP_z =$ ensemble des postes affectés à la zone z ;

$E_z =$ ensemble des éléments qui doivent être réalisés dans la zone z ;

$P_{\max}(z) =$ nombre de postes maximal dans la zone z ;

$r = 1, \dots, R$ indice des ressources critiques disponibles sur la ligne d'assemblage ;

$P_r =$ nombre de postes utilisant la ressource r ;

$R_{\max}(r) =$ quantité disponible de la ressource r ;

$m = 1, \dots, M$ indice des classes d'employés ;

$s = 1, \dots, S$ indice des groupes de classes d'employés ;

G_s : groupe de classes d'employés de type s

$|E| =$ le cardinale de l'ensemble E

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si l'élément } i \text{ est affecté au poste } k \\ 0 & \end{cases}$$

$$X_{iz} = \begin{cases} 1 & \text{si l'élément } i \text{ doit être réalisé dans la zone } z \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$C_i = \begin{cases} -1 & \text{si l'élément devra être réalisé à gauche de la ligne} \\ 0 & \text{si l'élément peut se réaliser sur les deux côtés} \\ 1 & \text{si l'élément devra être réalisé à droite de la ligne} \end{cases}$$

Note : Le point de référence pour déterminer le côté est le début de la ligne.

- 1- Contraintes de zonage : Ce sont les contraintes qui forcent un ou plusieurs éléments à être réalisés à l'intérieur d'une zone donnée. Mathématiquement, nous pouvons exprimer ces contraintes de la façon suivante :

$$\sum_i \sum_{k \in EP_z} y_{ik} X_{iz} = |E_z| \quad \forall z$$

Pour ne pas dépasser le nombre de postes dans une zone donnée z , il faut que les inéquations suivantes soient vérifiées :

$$|EP_z| \leq P \max(z) \quad \forall z \in \{1, \dots, Z\}$$

- 2- Contraintes de ressources : Il arrive parfois que la quantité de certaines ressources soit très limitée. Dans ce cas, les éléments qui utilisent ces ressources sont regroupés dans des postes de façon à ne pas dépasser les quantités disponibles. On note qu'une ressource ne peut pas servir deux postes simultanément. Une formulation mathématique de ces contraintes est la suivante :

$$P_r \leq R \max(r) \quad r = 1, \dots, R$$

- 3- Contraintes de côté de la ligne: Ces contraintes assurent que les éléments qui doivent être réalisés à gauche ne seront pas regroupés avec des éléments qui doivent être réalisés à droite dans les mêmes postes.

Un élément qui doit être réalisé à gauche ne peut pas être dans le même poste avec un élément qui doit être réalisé à droite de la ligne. Les inéquations suivantes assurent le respect de ces contraintes

$$(C_i y_{ik})(C_j y_{jk}) \geq 0 \quad \forall (i, j) \in k \quad k = 1, \dots, P$$

4- Contraintes des classes d'employés : Ces contraintes assurent le regroupement des éléments qui nécessitent les mêmes classes d'employés.

- un groupe de classes d'employés est formé d'une ou plusieurs classes d'employés.
- deux ou plusieurs groupes peuvent contenir une ou plusieurs classes similaires.

Soit un élément i qui nécessite un groupe de classes d'employés G_{s_1} pour être réalisé.

Et soit j un autre élément qui nécessite un autre groupe G_{s_2}

$$\text{Si } G_{s_1} \cap G_{s_2} = \phi \quad \Rightarrow \quad y_{ik} y_{jk} < 1 \quad \forall k = 1, \dots, P$$

On note que l'application développée est dotée d'une base de données multi-produits. Une procédure a été incorporée pour en extraire les éléments d'un produit quelconque.

L'application permet aussi de saisir et de valider le temps de cycle si nous voulons minimiser le nombre de postes sur la ligne ou de le déterminer à partir du nombre d'employés prédéfinis si nous voulons augmenter la cadence de production.

3.2 Heuristiques Augmentées

Le diagramme de la figure 3.1 illustre le fonctionnement général des cinq heuristiques retenues.

3.2.1 COMSOAL Augmentée

Étape 1 : Construction de la liste des éléments de travail

Construire une liste A contenant tous les éléments de travail, le nombre de prédécesseurs pour chacun et une valeur aléatoire associée à chaque élément.

Étape 2 : Sélectionner les éléments sans prédécesseurs.

De la liste A, sélectionner les éléments de travail sans prédécesseurs et les placer dans la liste B.

Étape 3 : Intégration des contraintes

1) *Si La Contrainte de Zonage est activée*

De la liste B, sélectionner les éléments qui doivent être réalisés dans la même zone et les éléments qui ne nécessitent pas une zone particulière pour être réalisé. On appelle la liste résultante, liste C.

2) *Si la Contrainte de Ressource est activée*

De la liste B, sélectionner les éléments qui utilisent la même ressource et les éléments qui n'exigent pas une ressource particulière. On appelle la liste résultante, liste D.

3) *Si la Contrainte de Côté de la Ligne est activée*

De la liste B, sélectionner les éléments qui doivent être réalisés sur le même côté de la ligne avec ceux pouvant être réalisés sur les deux côtés. La liste résultante est la liste E.

4) *Si la Contrainte de la Classe d'Employés est activée*

De la liste B, sélectionner les éléments qui peuvent être réalisés par la même classe d'employés. On appelle la liste résultante, la liste F.

Étape 4 : Construction de la liste potentielle

Des listes B,C,D,E,F on extrait les éléments de travail similaires. Ces éléments forment la liste potentielle P.

L'organigramme de la figure 3.2 illustre l'intégration de ces quatre contraintes et la construction de la liste potentielle P.

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

Sélectionner un élément de travail de la liste P qui a la valeur aléatoire la plus élevée et l'affecter au poste courant. S'il y a une égalité entre deux ou plusieurs éléments, choisir celui avec le temps de réalisation le plus élevé en respectant le temps restant dans le poste. La figure 3.3 illustre les règles de priorité utilisées dans ce cas.

Étape 6 : Actualisation de la liste A

Le nombre de prédécesseurs de l'élément choisi dans la liste A est réduit de 1 ainsi que le nombre de prédécesseurs de chaque élément successeur immédiat de l'élément choisi.

Dans chaque nouvelle itération, la liste A actualisée est la liste qui sera utilisée à l'étape 2.

Les étapes 2 à 6 seront répétées jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'éléments à affecter. Cette procédure est répétée plusieurs fois et la meilleure solution sera retenue comme solution finale au problème d'équilibrage de la ligne d'assemblage.

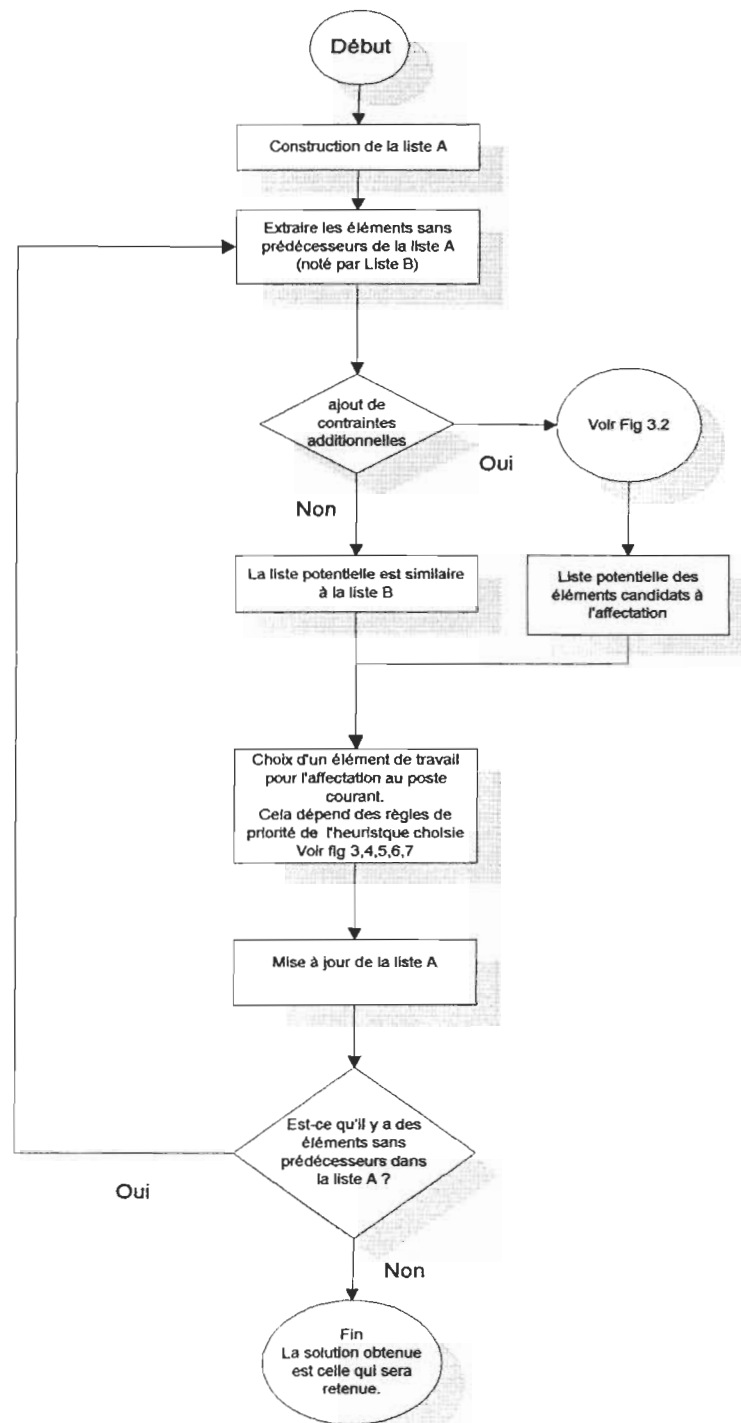


Figure 3.1. Fonctionnement des heuristiques

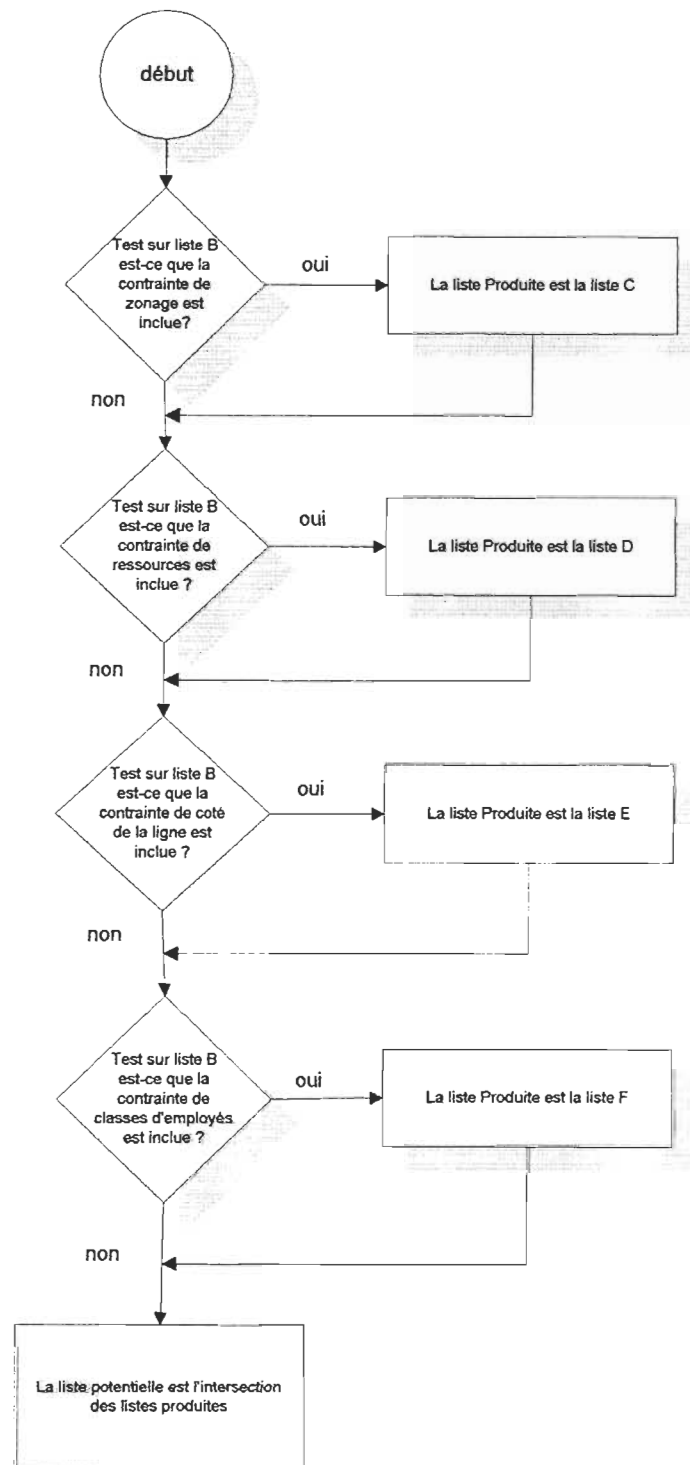


Figure 3.2. Intégration des contraintes additionnelles

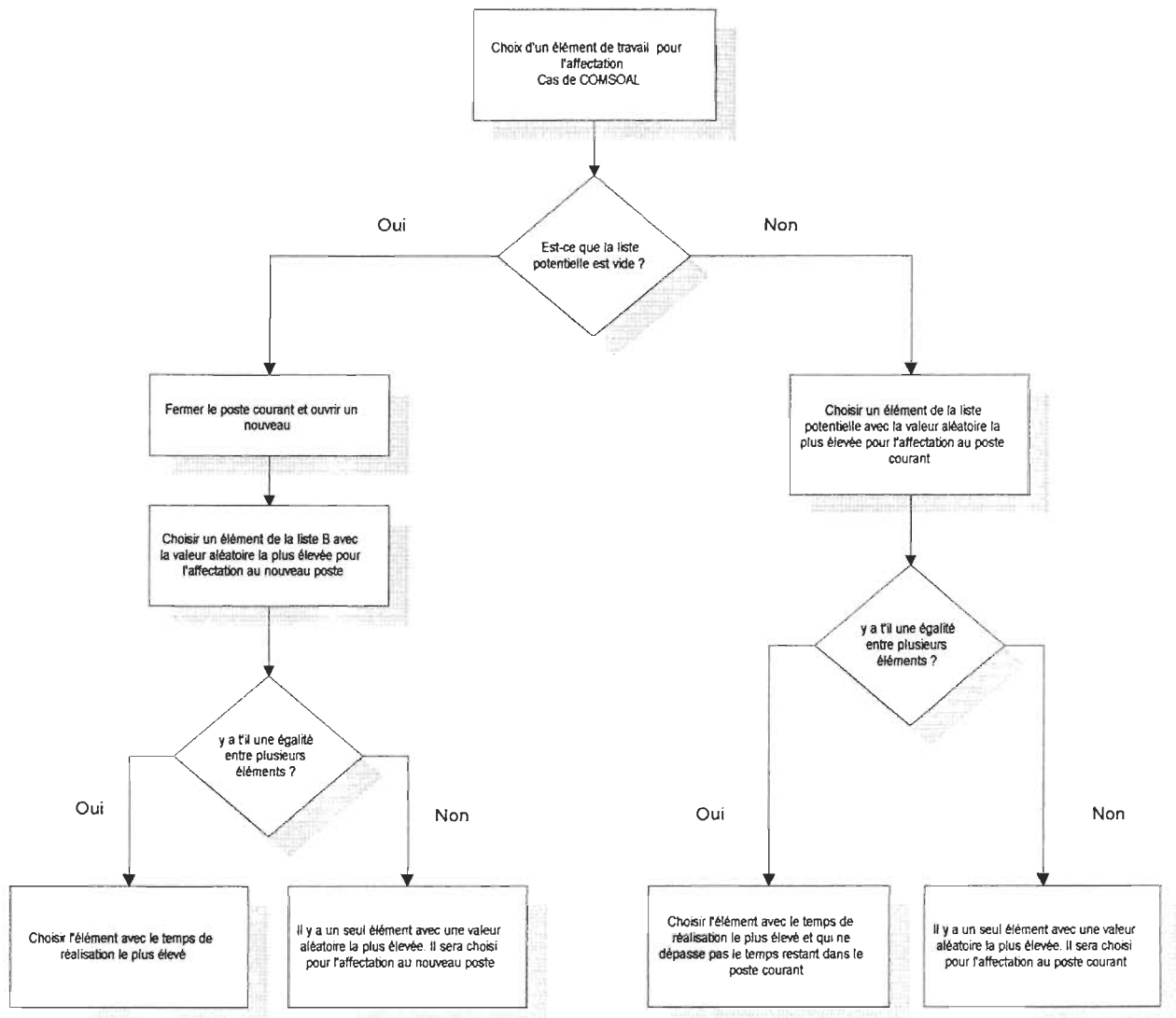


Figure 3.3. Les règles de priorité dans le cas de COMSOAL

3.2.2 Méthode Du Poids Pondéré Augmentée

Cette méthode utilise le poids de chaque élément de travail comme règle d'affectation aux postes de travail. Le poids d'un élément de travail est la somme du temps de réalisation de l'élément considéré et le temps de tous ses successeurs.

Étape 1 : Construction de la liste A

Construire une liste A contenant tous les éléments de travail, le nombre d'éléments qui précèdent chacun d'eux et le poids associé à chaque élément de travail.

Étape 2 : Sélectionner les éléments sans prédécesseurs.

De la liste A sélectionner les éléments de travail sans prédécesseurs. Ces éléments forment la liste B.

Étape 3, 4 : Ces étapes sont similaires aux étapes 3,4 de COMSOAL augmentée.

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

Affecter l'élément de travail avec le poids le plus élevé au poste courant. S'il y a une égalité entre deux ou plusieurs éléments de travail, on choisit l'élément avec le temps de réalisation le plus grand sans violation du temps restant dans le poste courant et si l'égalité persiste, on choisit un élément aléatoirement. La figure 3.4 montre les règles de priorité utilisées dans la méthode du poids pondéré.

Étape 6 : Actualisation de la liste A.

Cette étape est similaire à l'étape 6 de COMSOAL augmentée.

Retour à l'étape 2 tant qu'il y a des éléments sans prédécesseurs dans la liste A.

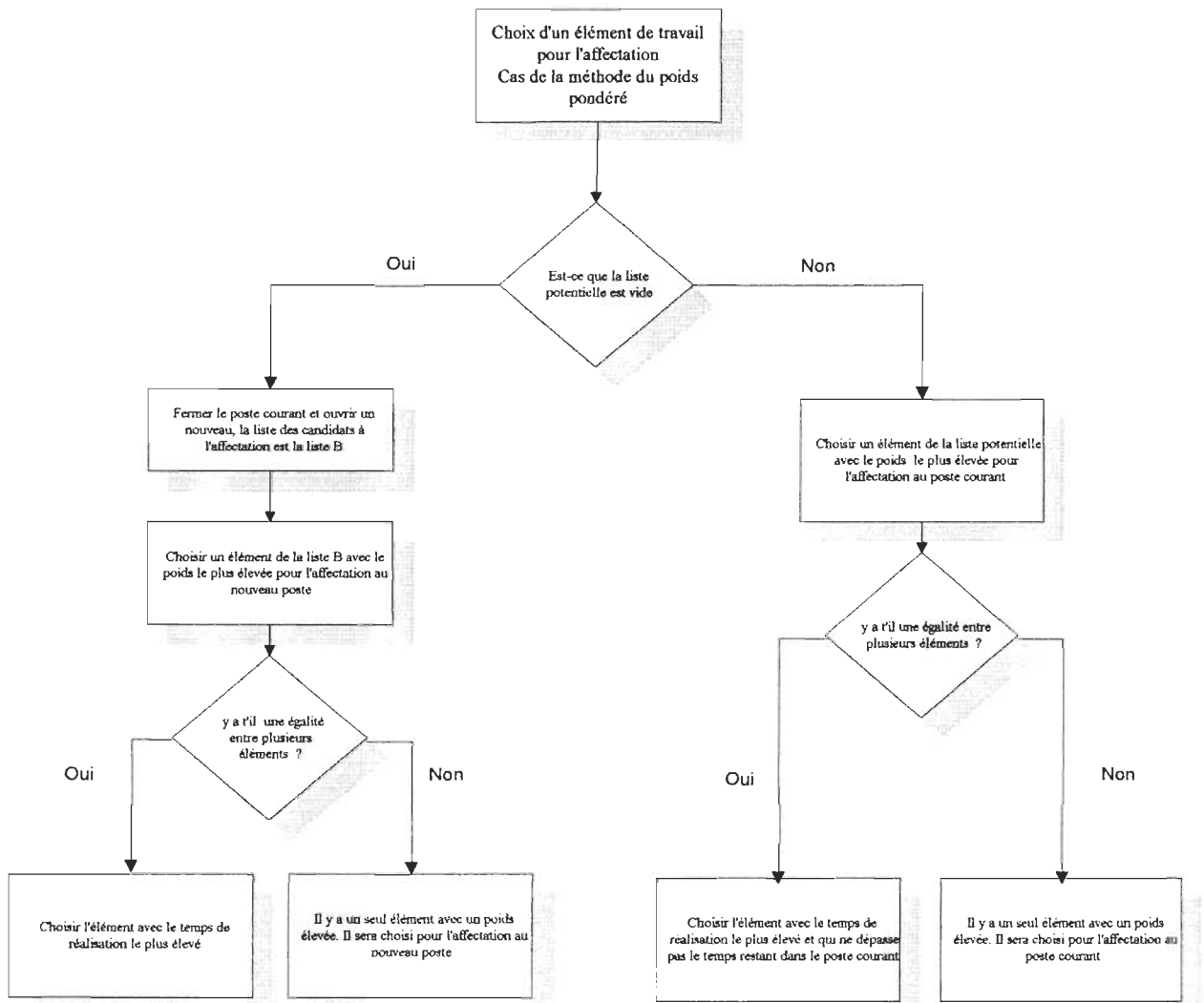


Figure 3.4. Les règles de priorité dans le cas de la méthode du Poids Pondéré

3.2.3 Méthode basée sur la limite supérieure des éléments de travail augmentée

Cette méthode ressemble à la méthode du poids pondéré augmentée. La seule différence réside dans la règle de priorité utilisée. La structure générale de la méthode est la suivante :

Étapes 1 : Construction de la liste A

Construire une liste A contenant tous les éléments de travail, le nombre d'éléments qui précèdent immédiatement chacun d'eux et la limite supérieure associée à chaque élément de travail. La limite supérieure d'un élément de travail quelconque i se calcule de la façon suivante :

$$LS_i = N + 1 - \left[\left(t_i + \sum_{j \in S_i} t_j \right) / C \right]^+ \quad \text{avec}$$

N : Le nombre d'éléments de travail dans le réseau;

C : Le temps de cycle de la ligne;

t_i : Le temps de réalisation de l'élément i ;

S_i : L'ensemble d'éléments successeurs de l'élément i ;

$[X]^+$: Le plus petit nombre entier plus grand ou égal à X .

Étapes 2,3,4 : Ces étapes sont similaires à celles de la méthode du poids pondéré augmentée.

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

Sélectionner l'élément de travail avec la limite supérieure la plus petite de la liste potentielle P et l'affecter au poste courant. S'il y a une égalité entre deux ou plusieurs éléments, celui qui a le temps de réalisation le plus grand est affecté au poste courant et si cette égalité persiste, on choisit aléatoirement un élément.

Étape 6 : Actualisation de la liste A.

Cette étape est similaire à l'étape 6 de la méthode du poids pondéré augmentée.

Retour à l'étape 2 tant qu'il y a des éléments sans prédécesseurs dans la liste A. La figure 3.5 illustre le fonctionnement de cette règle.

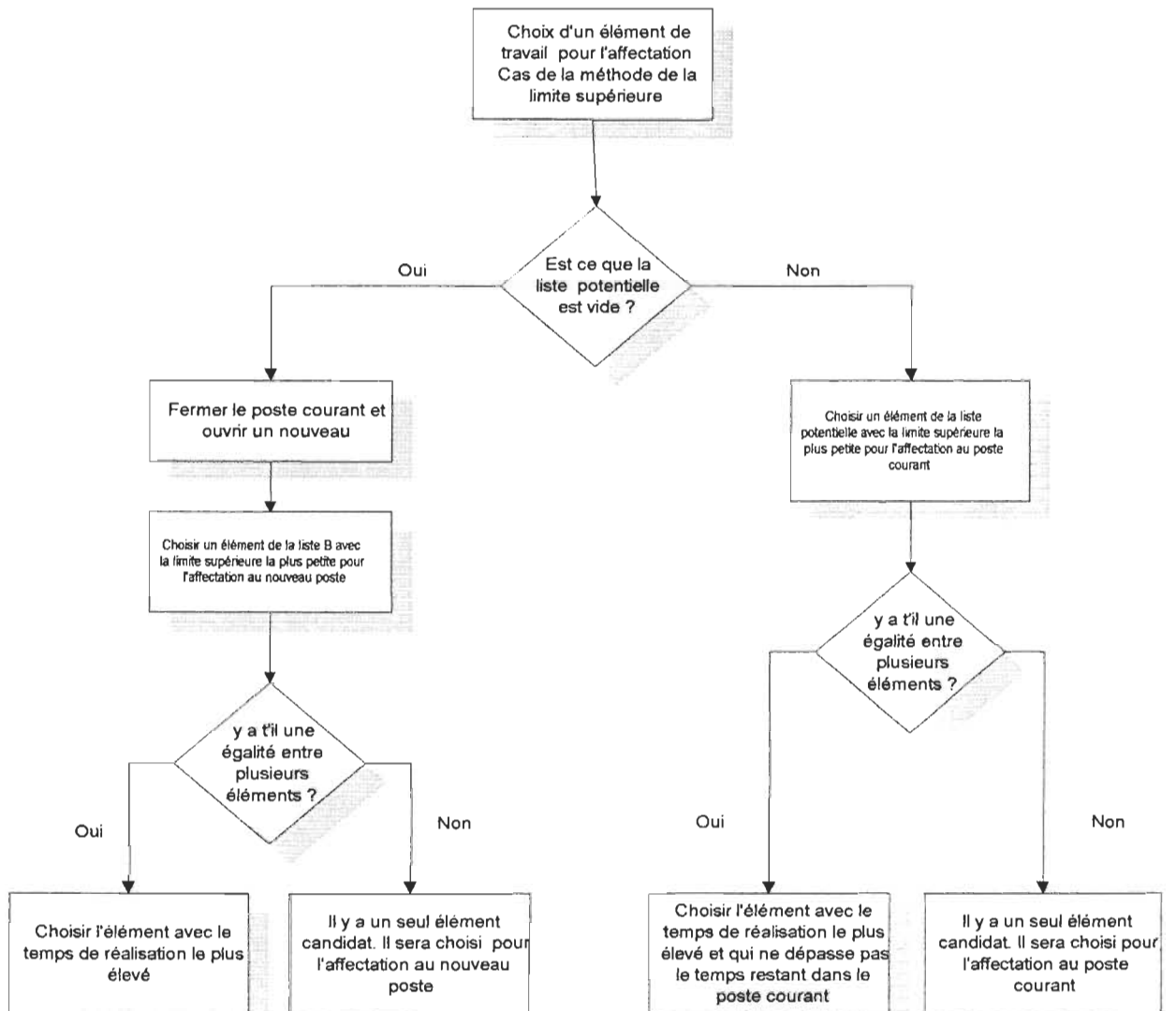


Figure 3.5. Les règles de priorité dans le cas de la méthode de la limite supérieure

3.2.4 Méthode basée sur le quotient t_i/LS_i augmentée

Cette méthode est similaire à la méthode précédente. La seule différence est la règle de priorité. Dans ce cas-ci, la règle de priorité est basée sur le quotient entre le temps de l'élément de travail et sa limite supérieure.

L'élément qui a le quotient le plus élevé est affecté au poste courant. Dans le cas d'égalité, les règles présentées dans la méthode précédente s'appliquent. Le quotient se calcule de la façon suivante : Pour un élément de travail i , le quotient noté par K est égal à $K = t_i / LS_i$. La figure 3.6 montre le fonctionnement de cette règle de priorité.

3.2.5 Méthode basée sur plusieurs règles de priorité augmentée

Une méthode développée et publiée en 1995 par BOCTOR [12] a été évaluée et comparée à 15 heuristiques telles que la méthode du poids pondéré et la procédure d'énumération de Hoffmann. Le critère d'évaluation est le nombre de fois, chaque méthode était capable de trouver la meilleure solution. Deux catégories de problèmes ont été utilisées pour l'évaluation de la performance de cette heuristique. La première catégorie regroupe 67 problèmes sélectionnés de la littérature et la deuxième catégorie contient 700 problèmes générés aléatoirement.

Les résultats obtenus indiquent que cette heuristique donne de meilleurs résultats que les 15 autres heuristiques. Cette heuristique se présente comme suit :

Étape 1 : Construction de la liste A

Construire une liste A contenant tous les éléments de travail du produit concerné avec leurs nombres de prédécesseurs respectifs.

Étapes 2,3,4

Ces trois étapes sont similaires à celles de l'heuristique COMSOAL augmentée.

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

Choisir un élément de travail de la liste potentielle P pour l'affectation au poste courant selon une des règles suivantes:

- 1- Choisir un élément de travail qui a un temps de réalisation égal au temps restant dans le poste courant. S'il n'y a pas un tel élément, utiliser la règle suivante. Pour briser l'égalité, assigner l'élément avec le plus grand nombre de candidats subséquents.
 - *un élément devient candidat subséquent d'un élément i s'il reste ou devient candidat à l'affectation après l'affectation de l'élément i au poste courant.*
- 2- Choisir un élément avec un temps de réalisation qui dépasse la moitié du temps de cycle et qui a le plus grand nombre de candidats subséquents. S'il n'y a pas un tel élément, utiliser la règle suivante. Pour briser l'égalité, choisir l'élément avec le temps de réalisation le plus élevé.
- 3- Choisir une combinaison de deux éléments avec un temps égal au temps restant dans le poste courant. S'il n'y a pas une telle combinaison, utiliser la règle suivante. Pour briser l'égalité, utiliser la combinaison ayant le plus grand nombre de candidats subséquents.
- 4- Choisir l'élément ayant le plus grand nombre de candidats subséquents. Pour briser l'égalité, choisir l'élément avec le plus grand nombre d'éléments successeurs immédiats et ayant un temps de réalisation qui dépasse la moitié du temps de cycle. Si l'égalité persiste, assigner l'élément avec le temps de réalisation le plus élevé.

La figure 3.7 montre les quatre règles de priorité utilisées dans cette méthode.

Étape 6 : Actualisation de la liste A

Le nombre de prédécesseurs de l'élément choisi dans la liste A est réduit de 1 ainsi que le nombre de prédécesseurs de tous les successeurs immédiats de l'élément choisi.

On note que dans chaque nouvelle itération, la liste A actualisée est la liste qui sera utilisée à l'étape 2.

Les étapes 2 à 6 sont répétées jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'élément à affecter.

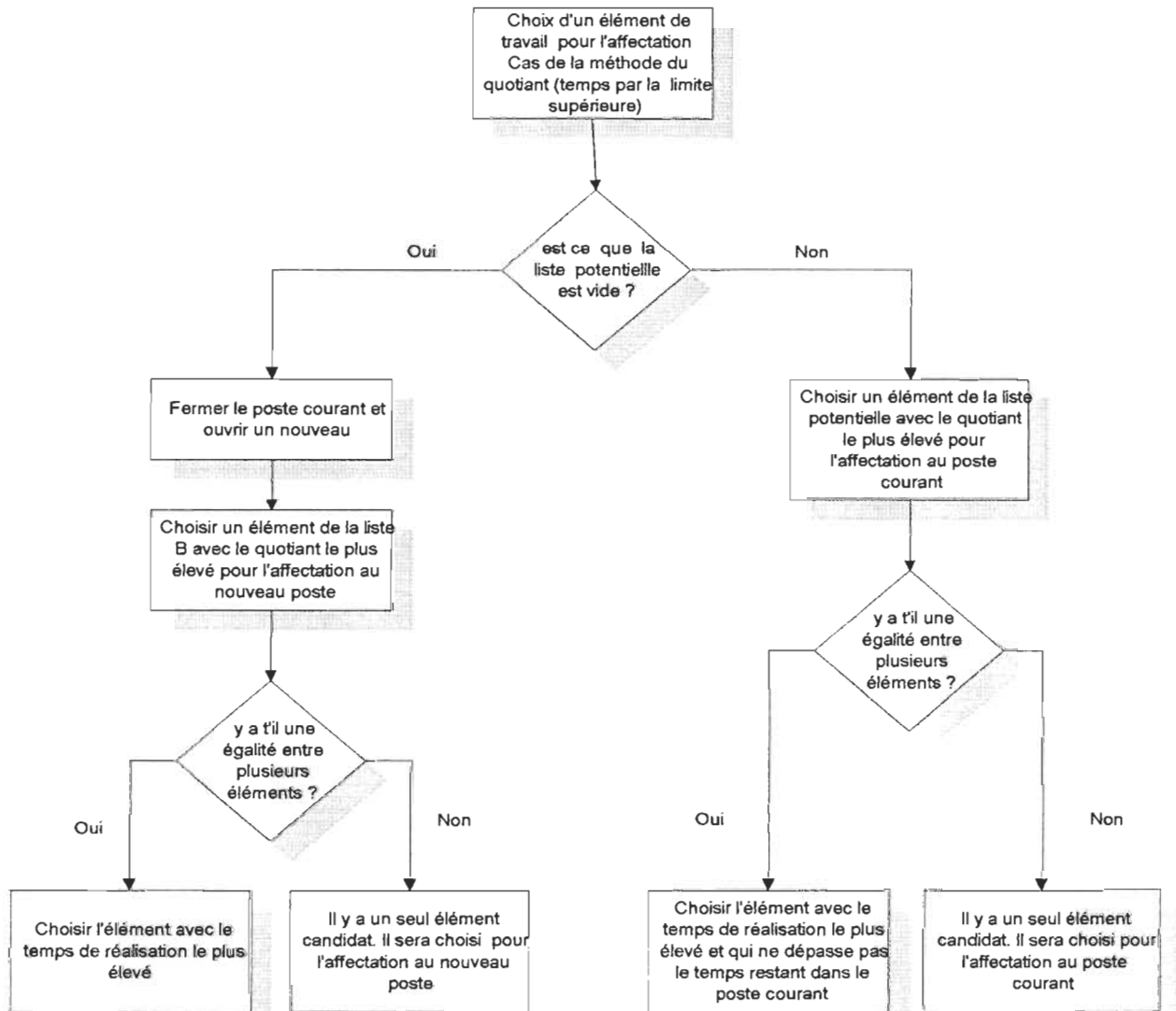


Figure 3.6. Les règles de priorité dans le cas de la méthode basée sur le quotient (t_i/L_s)

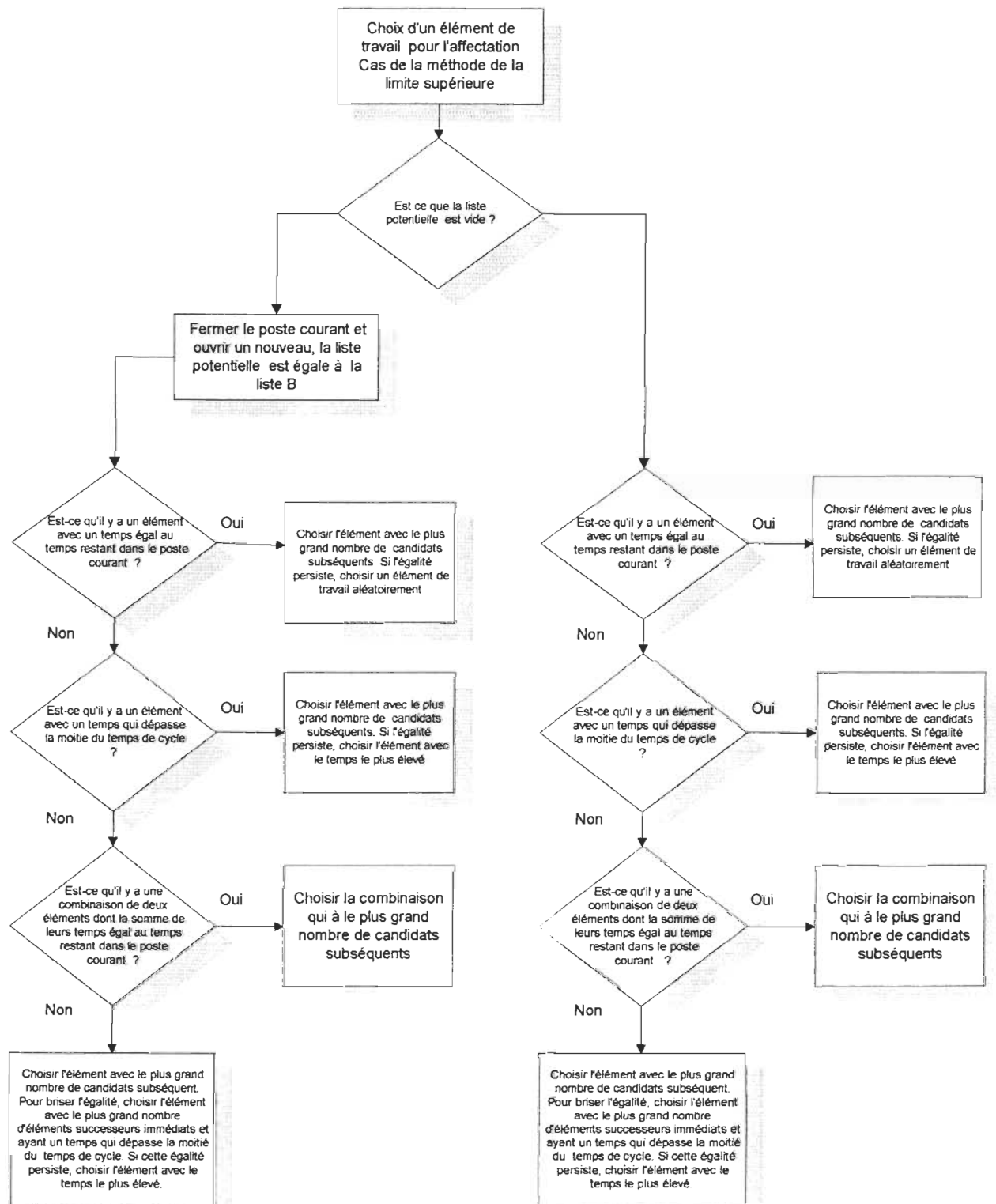


Figure 3.7. Les règles de priorité dans le cas de la méthode «règles multiples»

CHAPITRE 4

EXEMPLE ILLUSTRATIF

À l'aide d'un exemple simple, nous allons illustrer l'impact de l'intégration des contraintes sur la solution obtenue. En utilisant la méthode du poids pondéré, deux cas seront présentés. Dans le premier cas on ne tient pas compte de d'autres contraintes. Par contre, dans le deuxième cas on intègre deux contraintes additionnelles (zonage et côté de la ligne).

Le réseau de préséances du problème à résoudre est le suivant :

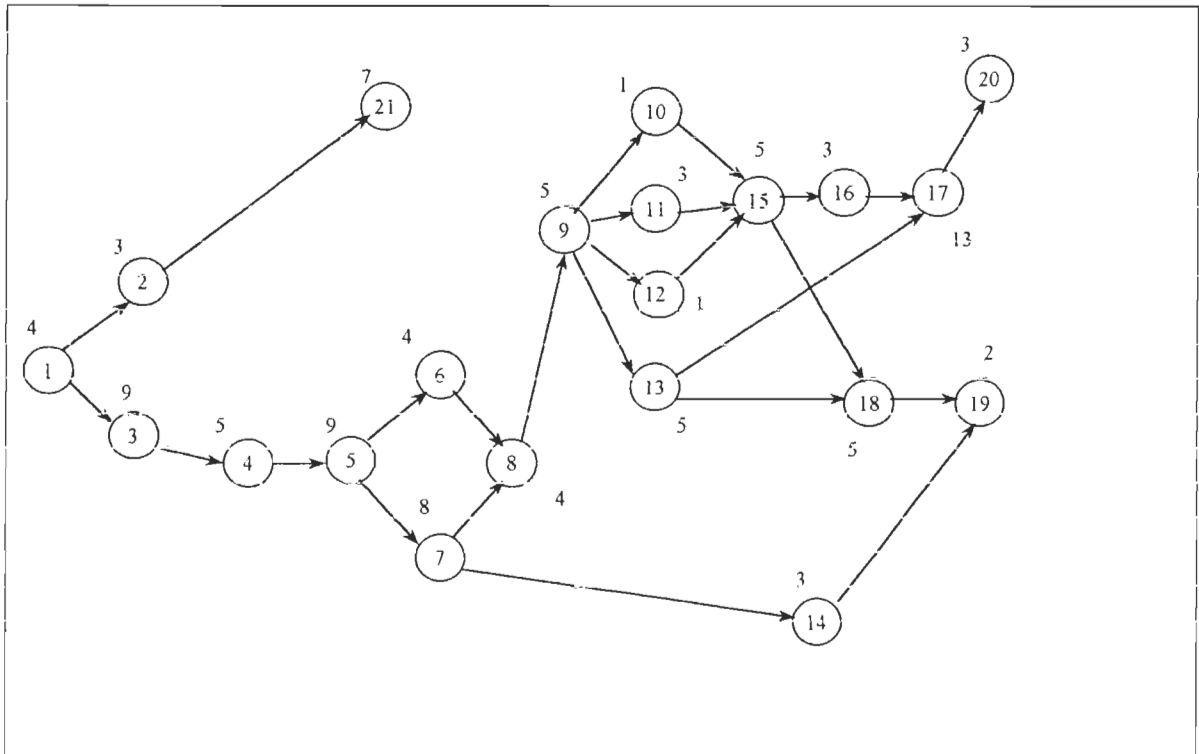


Figure 4.1. Réseau de préséances d'un problème de 21 éléments de travail proposé par Tonge.

Note : Les numéros des éléments se trouvent à l'intérieur des cercles tandis que leurs temps de réalisation se trouvent à l'extérieur des cercles.

4.1 Poids Pondéré Classique (sans contrainte additionnelle)

Dans ce cas, il n'y a pas de contrainte additionnelle. Par conséquent, les étapes 3 et 4 de la procédure ne seront pas traitées. La liste potentielle P est la même que la liste B.

Le temps de cycle de la ligne est égal à 14 secondes.

Itération 1

Étape 1 : Création de la liste A.

Tous les éléments, leurs temps de réalisation et leurs préséances se trouvent à la figure 4.1.

Pour ce qui est du poids associé à chaque élément, on le calcule de la façon suivante :

$$P(i) = t_i + \sum_{j \in S} t_j$$

$P(i)$ = poids de l'élément i

t_i : temps de l'élément i

S : ensemble des éléments successeur de l'élément i

Par exemple :

$$P(1) = 4+3+9+\dots+2+3+7 = 102$$

$$P(2) = 3+7=10$$

$$P(21) = 7+0=7$$

Dans le tableau suivant, nous présentons une partie des éléments qui seront utiles pour comprendre l'exemple.

N° de l'élément	Temps	Nbre de prédécesseurs	Poids
1	4	0	102
2	3	1	10
3	9	1	95
4	5	2	86
5	9	3	74

Tableau 4.1. Quelques éléments du réseau de la figure 4.1

Étape 2 : Sélectionner les éléments sans prédécesseurs

D'après la figure 4.1, la liste des éléments sans prédécesseurs (la liste B) contient seulement l'élément 1.

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

Il y a un seul élément dans la liste B. Cet élément sera affecté au premier poste.

Poste 1 = [1], le temps restant dans ce poste $(14 - 4) = 10$ s.

Étape 6 : Actualisation de la liste A.

En affectant l'élément 1 au premier poste, les éléments 2 et 3 deviennent sans prédécesseurs.

Il y a des éléments sans prédécesseurs qui n'ont pas été affectés. Aller à l'étape 2 et répéter la procédure.

Itération 2

Étape 2 : Sélectionner les éléments sans prédécesseurs

La liste des éléments sans prédécesseurs Liste B = [2, 3].

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

L'élément avec le poids le plus élevé sera choisi pour l'affectation au poste courant. Donc c'est l'élément 3 avec un temps égal à 9 inférieur au temps restant dans le poste courant.

Poste 1 = [1,3], le temps restant dans ce poste $(10 - 9) = 1$ s.

Étape 6 : Actualisation de la liste A

Avec l'affectation de l'élément 3 au poste 1, l'élément 4 devient sans prédécesseurs.

Dans la liste A actualisée, les éléments 2 et 4 ont un nombre de prédécesseurs égal à zéro. Aller à l'étape 2 et répéter la procédure.

Itération 3

Étape 2 : Sélectionner les éléments sans prédécesseurs

La liste des éléments sans prédécesseurs Liste B = [2,4].

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

L'élément 4 est choisi pour l'affectation au poste courant (Il a le poids le plus élevé), mais comme il y a violation du temps inoccupé dans le poste courant (temps de l'élément 4 est supérieur au temps restant dans le poste courant), on ferme le poste courant et on ouvre le *Poste 2* = [4], le temps restant dans ce poste (14 - 5) = 9 s.

Étape 6 : Actualisation de la liste A

L'élément 5 qui est le successeur immédiat de l'élément 4 devient sans prédécesseurs.

Les éléments 2 et 5 sont des éléments sans prédécesseurs, dans ce cas, aller à l'étape 2 et répéter la procédure. La solution complète se trouve dans le tableau 4.2.

N° de poste	N° des éléments
1	1, 3
2	4, 5
3	6, 7
4	8,9,10, 11, 12
5	13, 15, 16
6	17
7	14, 18, 2, 20
8	19, 21

Tableau 4.2. Solution finale de l'application de la méthode du poids pondéré
Sans contrainte additionnelle

4.2 POIDS PONDÉRÉ AUGMENTÉ

Dans ce cas, nous allons intégrer deux contraintes additionnelles qui sont les contraintes de zonage et les contraintes de côté de la ligne. Le temps de cycle est toujours 14 secondes.

Supposons qu'il y a 3 zones sur la ligne d'assemblage {zone1, zone2, zone3} et que les ensembles des éléments E_1, E_2, E_3 appartiennent aux zones 1,2,3 respectivement.

$$E_1 = \{1, 2\} ; E_2 = \{3, 4, 5, 9, 16\} ; E_3 = \{7, 10, 11, 18\}$$

Pour la contrainte de côté de la ligne, supposons que l'ensemble G contient les éléments qui doivent être réalisés à gauche et que l'ensemble D contient les éléments qui doivent être réalisés à droite.

$$G = \{2, 5, 7, 8, 13, 14, 18\} ; D = \{3, 9, 10, 15, 17\}$$

Itération 1

Étape 1 : Création de la liste A

Tous les éléments, leurs temps de réalisation et leurs préséances se trouvent à la figure 4.1. Pour ce qui est du poids associé à chaque élément, on le calcule de la même façon que dans le cas précédent (sans contrainte additionnelle). Dans le tableau suivant, nous présentons une partie des éléments qui seront utiles pour comprendre l'exemple.

N° de l'élément	Temps	Nbre de prédécesseurs	N° zone	Côté de la ligne	Poids
1	4	0	1	n	102
2	3	1	1	g	10
3	9	1	2	d	95
4	5	2	2	n	86
5	9	3	2	g	74

Tableau 4.3. Quelques éléments du réseau de la figure 4.1 associés à leurs poids

Étape 2 : Sélectionner les éléments sans prédécesseurs

D'après la figure 4.1, la liste des éléments sans prédécesseurs (la liste B) contient seulement l'élément 1.

Étape 3 : Intégration des contraintes

Comme il y a un seul élément dans la liste B, les listes résultantes de l'intégration des deux contraintes (zonage et côté de la ligne) sont similaires à la liste B

Étape 4 : Construction de la liste potentielle

La liste potentielle P est similaire à la liste B

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

Il y a un seul élément dans la liste P. Cet élément sera affecté au premier poste.

Poste 1 = [1], le temps restant dans ce poste $(14 - 4) = 10$ s.

Étape 6 : Actualisation de la liste A.

En affectant l'élément 1 au premier poste, les éléments 2 et 3 deviennent sans prédécesseurs.

Il y a des éléments sans prédécesseurs dans la liste A actualisée qui n'ont pas été affectés. aller à l'étape 2 et répéter la procédure.

Itération 2**Étape 2** : Sélectionner les éléments sans prédécesseurs

Les éléments de travail sans prédécesseurs 2 et 3 forment la liste B

Étape 3 : Intégration des contraintes

1- la contrainte de zonage est active

De la liste B, l'élément 3 appartient à la zone 2 et l'élément 2 appartient à la zone 1.

Dans le poste courant, il y a l'élément 1 qui doit être réalisé dans la zone 1. Par conséquent, la liste résultante C contient seulement l'élément 2. $C = \{2\}$

2- la contrainte de côté de la ligne est active

Les éléments du poste courant (l'élément 1) peuvent se réaliser sur l'un des deux côtés.

De la liste B, l'élément 2 nécessite d'être réalisé à gauche de la ligne. Par contre, l'élément 3 nécessite d'être réalisé à droite de la ligne d'assemblage. Par conséquent, n'importe lequel des éléments 2 et 3 peut être inclus avec l'élément 1 dans le poste courant. $E = \{2, 3\}$

Étape 4 : Construction de la liste potentielle

La liste potentielle P est l'intersection des liste C et E. $P = C \cap E = \{2\}$

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

L'élément choisi pour l'affectation est l'élément 2 (le seul élément de la liste P).

Poste 1 = [1,2], le temps restant dans ce poste $(14 - 4 - 3) = 7$ s.

Étape 6 : Actualisation de la liste A

L'élément 21 devient sans prédécesseurs après l'affectation de l'élément 2 au poste courant.

Il y a les éléments 3 et 21 sans prédécesseurs dans la liste A. Dans ce cas, aller à l'étape 2 et répéter la procédure.

Itération 3

Étape 2 : Sélectionner les éléments sans prédécesseurs

Les éléments de travail sans prédécesseurs 3 et 21 forment la liste B

Étape 3 : Intégration des contraintes

1- la contrainte de zonage est active

De la liste B, l'élément 3 \in à la zone 2 et l'élément 21 n'appartient à aucune zone.

Dans le poste courant, les éléments 1,2 doivent être réalisés dans la zone 1. Par conséquent, la liste résultante C contient seulement l'élément 21. $C = \{21\}$

2- la contrainte de côté de la ligne est active

l'élément 2 du poste courant doit être réalisé sur le côté gauche, ce qui signifie que ce poste se trouve à gauche de la ligne d'assemblage.

De la liste B, l'élément 3 nécessite d'être réalisé à droite de la ligne. Par contre, l'élément 21 peut se réaliser sur les deux côtés de la ligne d'assemblage. Par conséquent, seul l'élément 21 peut être inclus dans le poste courant. $E = \{21\}$

Étape 4 : Construction de la liste potentielle

La liste potentielle P est l'intersection des liste C et E. $P = C \cap E = \{21\}$

Étape 5 : Choix d'un élément pour l'affectation

L'élément choisi pour l'affectation est l'élément 2 (le seul élément de la liste P).

Poste 1 = [1,2,21], le temps restant dans ce poste $(14 - 4 - 3 - 7) = 0$ s.

Étape 6 : Actualisation de la liste A

L'élément 21 devient sans prédécesseurs après l'affectation de l'élément 2 au poste courant.

On note que le poste courant est saturé. Par conséquent, nous allons ouvrir un nouveau poste dans l'itération suivante.

Il y a l'élément 3 sans prédécesseurs dans la liste A. Dans ce cas, aller à l'étape 2 et répéter la procédure.

La solution finale après l'intégration des contraintes de zonage et de côté de la ligne se trouve dans le tableau 4.4

N° de poste	N° d'élément	N° de zone	Côté de la ligne
1	1	1	g
	2	1	
	21		
2	3	2	d
	4	2	
3	5	2	g
	6		
4	7	3	g
	8		
5	14		g
6	9	2	d
	12		
7	10	3	d
	11	3	
	15		d
8	13	2	g
	16		
9	17		d
10	18	3	g
	19		
	20		

Tableau 4.4 Solution finale après intégration des contraintes de zonage et de côté de la ligne

CHAPITRE 5

PLAN D'EXPÉRIENCE

L'objectif principal de ce plan d'expérience est d'étudier l'effet des variables considérées dans l'application OPTILIGNE (ex : contrainte de zonage, de ressources, etc.) et de comparer la performance des heuristiques utilisées. Il sera également possible d'étudier l'effet des interactions du second ordre entre les variables sur l'efficacité des lignes d'assemblage (on se limite aux interactions de premier ordre car les autres interactions sont difficilement explicables).

5.1 Plan d'expérience

le modèle utilisé dans le plan d'expérience, est le suivant :

$$\begin{aligned}
 eff = & \mu + H_i + P_j + HP_{ij} + T_{k(j)} + Z_l + HZ_{il} + PZ_{jl} + R_m + HR_{im} + PR_{jm} + RT_{mk(j)} + C_n + \\
 & HC_{in} + PC_{jn} + CT_{lk(j)} + E_s + HE_{is} + PE_{js} + ET_{sk(j)} + ZR_{lm} + ZC_{ln} + ZE_{ls} + RC_{mn} + \\
 & RE_{ms} + CE_{ns} + \varepsilon_{y(ijklmns)}
 \end{aligned}$$

eff : C'est la réponse mesurée. Elle représente l'efficacité de la ligne d'assemblage.

μ : La moyenne de la population

H_i : L'heuristique utilisée $i \in \{comsoal, poids\ pondéré, UB, T / UB, RM\}$

P_j : Le produit considéré, $j \in \{45, 70, 90\}$ noeuds }

$T_{k(j)}$: Le Temps de cycle. Pour chaque produit, deux niveaux sont considérés.

Z_l, R_m, C_n, E_s : Ce sont les contraintes de zonage, ressources, côté de la ligne et classes d'employés respectivement.

Les interactions de second ordre sont représentées dans le modèle par le produit de deux variables principales (ex : HP est l'interaction de la variable heuristique avec la variable produit). Le niveau de signification considéré est de 5%.

On note que ce modèle est hiérarchique car il y a une variable indépendante (le temps de cycle) incluse dans une autre variable indépendante (le produit).

Avec les sept variables définies plus haut, nous avons réalisé 2430 expériences. Pour chaque expérience, deux répétitions ont été effectuées, ce qui nous a permis d'obtenir 4860 observations.

Les hypothèses que nous voulons tester sont les suivantes :

- 1- $h_0: H_i = 0 \quad \forall i$ la variable heuristique n'a pas d'effet sur l'efficacité de la ligne. Autrement dit, il n'y a pas de différence entre les heuristiques choisies quant à la réponse mesurée.
- 2- $h_{01} : P_j = 0 \quad \forall j$ la taille du réseau n'a pas d'effet sur l'efficacité de la ligne
- 3- $h_{02} : HP_{ij} = 0 \quad \forall i, j$ l'interaction entre les variables heuristiques et produit n'a pas d'effet sur l'efficacité de la ligne
- 4- $h_{03} : T_{k(j)} = 0 \quad \forall k, j$ la longueur du temps de cycle n'a pas d'effet sur l'efficacité
- 5- $h_{04} : Z_l = 0 \quad \forall l$ la contrainte de zonage n'a pas d'effet sur l'efficacité de la ligne d'assemblage
- 6- $h_{05} : HZ_{il} = 0 \quad \forall i, l$ l'interaction entre les heuristiques et la contrainte de zonage n'a pas d'effet sur l'efficacité de la ligne d'assemblage
- 7- $h_{06} : PZ_{jl} = 0 \quad \forall j, l$ l'interaction entre les variables produit et contrainte de zonage n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 8- $h_{07} : ZT_{lk(j)} = 0 \quad \forall k, l, j$ l'interaction entre la contrainte de zonage et le temps de cycle n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage

- 9- $h_{0,8} : R_m = 0 \quad \forall m$ la contrainte de ressource n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 10- $h_{0,9} : HR_{im} = 0 \quad \forall i, m$ l'interaction entre les heuristiques et la contrainte de ressources n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 11- $h_{0,10} : PR_{jm} = 0 \quad \forall j, m$ l'interaction entre les produits et la contrainte de ressources n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 12- $h_{0,11} : RT_{nk(j)} = 0 \quad \forall j, k, m$ l'interaction entre la contrainte de ressources et le temps de cycle n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 13- $h_{0,12} : C_n = 0 \quad \forall n$ la contrainte de côté de la ligne n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 14- $h_{0,13} : HC_{in} = 0 \quad \forall i, n$ l'interaction entre les heuristiques et la contrainte de côté de la ligne n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 15- $h_{0,14} : PC_{jn} = 0 \quad \forall j, n$ l'interaction entre le produit et la contrainte de côté de la ligne n'a pas d'effet sur l'efficacité
- 16- $h_{0,15} : CT_{nk(j)} = 0 \quad \forall n, k, j$ l'interaction entre la contrainte de côté de la ligne et le temps de cycle n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 17- $h_{0,16} : E_s = 0 \quad \forall s$ la contrainte de classes d'employés n'a pas d'effet sur l'efficacité
- 18- $h_{0,17} : HE_{is} = 0 \quad \forall i, s$ l'interaction entre les heuristiques et la contrainte de classes d'employés n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 19- $h_{0,18} : PE_{js} = 0 \quad \forall j, s$ l'interaction entre la contrainte de classes d'employés et la variable produit n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage

- 20- $h_{0,19} : ET_{sk(j)} = 0 \quad \forall s, k, j$ l'intersection entre le temps de cycle et la contrainte de classes d'employés n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 21- $h_{0,20} : ZR_{lm} = 0 \quad \forall l, m$ l'interaction entre les contraintes de zonage et de ressources n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes.
- 22- $h_{0,21} : ZC_{ln} = 0 \quad \forall l, m$ l'interaction entre les contraintes de zonage et de côté de la ligne n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 23- $h_{0,22} : ZE_{ls} = 0 \quad \forall l, s$ l'interaction entre les contraintes de zonage et de classes d'employés n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 24- $h_{0,23} : RC_{mn} = 0 \quad \forall m, n$ l'interaction entre les contraintes de ressources et de côté de la ligne n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 25- $h_{0,24} : RE_{ms} = 0 \quad \forall m, s$ l'interaction entre les contraintes de ressources et de classes d'employés n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage
- 26- $h_{0,25} : CE_{ns} = 0 \quad \forall n, s$ l'interaction entre les contraintes de côté de la ligne et de classes d'employés n'a pas d'effet sur l'efficacité des lignes d'assemblage.

Pour réaliser les expériences, nous avons codé un programme en Visual FoxPro. Ce programme utilise une table des entrées contenant l'heuristique utilisée, le produit considéré, le temps de cycle, le pourcentage des éléments assujettis à chacune des contraintes suivantes : zonage, ressources, côté de la ligne ainsi que la contrainte de classes d'employés. Le programme génère une table des résultats (parmi les champs de cette table, on trouve l'efficacité de la ligne d'assemblage).

Pour valider le programme, nous l'avons testé sur plusieurs problèmes sélectionnés de la littérature. Les résultats obtenus étaient satisfaisants, ce qui nous a permis de conclure sur la validité du programme utilisé.

5.2 Description du programme

La table des entrées contient 4860 enregistrements. Un exemple d'un enregistrement est représenté dans le tableau 5.1.

Nombre source	Heuristique	Numéro de Produit	Temps de cycle	Contrainte de Zonage	Contrainte de Ressources	Contrainte de Côté de la ligne	Contrainte de Classes d'employés
40201	Comsoal	90	0.88	20%	10%	0%	0%

Tableau 5.1. Exemple d'enregistrement de la table des entrées

On peut décrire les champs comme suit :

- Un nombre source «seed» qui permet de générer une série de nombres aléatoires.
- L'heuristique utilisée. Il y a cinq heuristiques (Comsoal, Poids Pondéré, Upper bound, Multiple Rules et Time/ Upper bound);
- Le produit : nous avons considéré 3 produits, deux sont pris de la littérature (45 et 70 nœuds) et le troisième est un cas réel de 90 éléments de travail ;
- Le temps de cycle : deux niveaux du temps de cycle ont été considérés pour chaque produit. Au premier niveau, le temps de cycle est égal au temps de l'élément de travail le plus long, le deuxième niveau est à 150% du temps de l'élément de travail le plus long ;
- Le pourcentage des éléments de travail sujets à une contrainte particulière (zonage, ressource, côté de la ligne et classe d'employés). Nous avons établi trois niveaux pour chaque contrainte (0%, 10%, 20%).

On note que les niveaux des variables sont établis sur la base d'un jugement d'expert. La structure générale du programme est la suivante :

Répéter les étapes suivantes pour chaque enregistrement jusqu'à la fin de la table des entrées.

Si

on ne considère pas les contraintes additionnelles (zonage, ressources, côté de la ligne et classes d'employés), exécuter l'heuristique de l'enregistrement courant.

Sinon

1- *Si la contrainte de zonage est considérée :*

En se basant sur le nombre source

- Déterminer les éléments de travail sujets à la contrainte de zonage. Le nombre de ces éléments sera basé sur le pourcentage d'éléments assujettis à la contrainte de zonage dans l'enregistrement courant ;
- Identifier les zones qui vont contenir les éléments identifiés précédemment ;
- Affecter ces éléments de travail aux zones identifiées.

2- *Si la contrainte de ressource est incluse :*

- Identification des éléments de travail sujets à la contrainte de ressource. Le nombre d'éléments de travail identifié dans ce cas est limité par le pourcentage des éléments de travail sujets à la contrainte de ressource dans l'enregistrement courant ;
- Identification des ressources nécessaires à l'ensemble des éléments de travail identifié dans l'étape précédente ;
- Affectation des ressources aux éléments identifiés.

3- *Si la contrainte de côté de la ligne est incluse :*

- Déterminer les éléments de travail sujets à la contrainte de côté de la ligne toute en respectant le pourcentage des éléments de travail sujets à cette contrainte dans l'enregistrement courant ;
- Distribution des éléments déterminés entre les deux côtés de la ligne d'assemblage.

4- *Si la contrainte de classes d'employés est incluse :*

- Détermination des éléments de travail soumis à la contrainte de classes d'employés ;
- Détermination des classes d'employés qui vont être utilisées dans l'expérience ;
- Affectation des éléments de travail aux classes d'employés.

En considérant les contraintes précédentes, l'heuristique spécifiée dans l'enregistrement courant est exécutée et les résultats sont intégrés dans une table des résultats. La figure 5.1 résume le fonctionnement du programme.

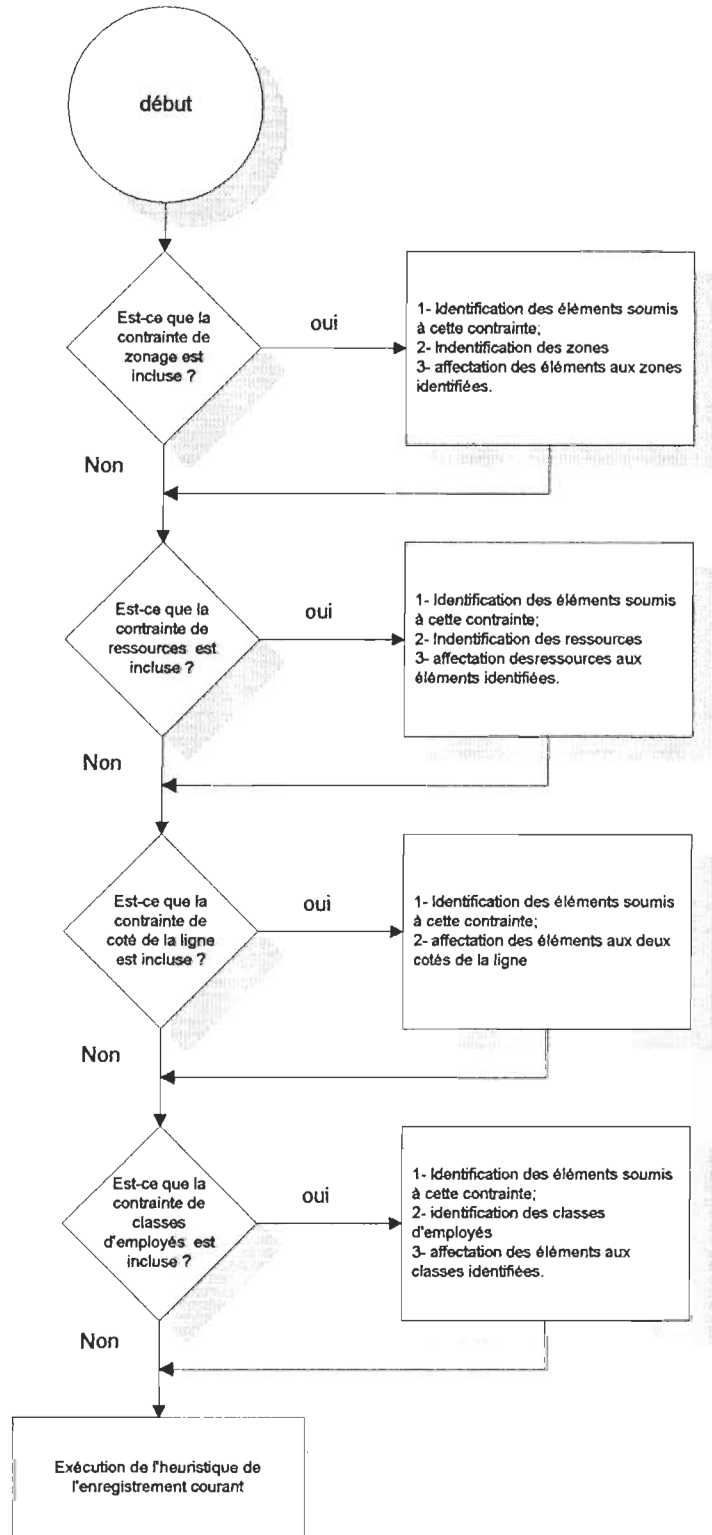


Figure 5.1. Fonctionnement du programme d'expérimentation

5.3 Résultats et interprétation

Pour tester les hypothèses posées, nous avons réalisé une analyse de variance (ANOVA) en se servant du logiciel SAS comme outil de traitement. Le programme écrit à cette fin se trouve dans les annexes. Les résultats de cette analyse se trouvent dans le tableau 5.2

Pour mieux comprendre l'analyse ANOVA, voici une définition des termes du tableau 5.2

Source : chaque terme du modèle défini plus haut, représente une source qui peut influencer l'efficacité de la ligne d'assemblage

df : le degré de liberté de chaque terme défini plus haut

SS : la somme des carrés de la source de variation

MS : c'est la somme des carrés de la source de variation sur ses degrés de liberté

EMS : «Expected mean square»

F critique : un test de comparaison des covariances.

F théorique : une valeur extraite de la table de distribution de Fisher.

Les $F_{critique}$ des variables indépendantes se calculent de la façon suivante :

$$F_{critique}(X) = MS(X) / MS(erreur) \text{ avec } X \text{ la variable indépendante}$$

Par exemple : $F_{critique}(\text{heuristique}) = 0.942 / 0.00792 = 118.93$

Avant de passer à l'interprétation des résultats, on note que le coefficient de corrélation est inférieur à 0.75, il est égal à 0.6339. Cela est dû probablement à la longueur du temps des éléments de travail par rapport au temps de cycle.

Chaque variable significative est analysée en détails dans le tableau qui suit :

Tableau 5.2. Analyse Anova

Source	df	SS	MS	EMS	Fcritique	Fthéorique
H	4	3,766	0,942	$\sigma^2_\epsilon + 972 \phi_H$	118,93	2,37*
P	2	0,313	0,156	$\sigma^2_\epsilon + 1620\phi_P$	19,75	3*
H*P	8	1,279	0,16	$\sigma^2_\epsilon + 324 \phi_{HP}$	20,19	1,94*
T(P)	3	0,636	0,212	$\sigma^2_\epsilon + 810 \phi_T$	26,77	2,60*
Z	2	27,49	13,745	$\sigma^2_\epsilon + 1620 \phi_Z$	1736,12	3*
H*Z	8	2,401	0,3	$\sigma^2_\epsilon + 324 \phi_{HZ}$	37,89	1,94*
P*Z	4	0,713	0,178	$\sigma^2_\epsilon + 540 \phi_{PZ}$	22,52	2,37*
Z*T(P)	6	0,131	0,022	$\sigma^2_\epsilon + 270 \phi_{ZT}$	2,74	2,1*
R	2	12,255	6,128	$\sigma^2_\epsilon + 1620 \phi_R$	773,94	3*
H*R	8	2,702	0,338	$\sigma^2_\epsilon + 324 \phi_{HR}$	42,66	1,94*
P*R	4	2,024	0,506	$\sigma^2_\epsilon + 540 \phi_{PR}$	63,89	2,37*
R*T(P)	6	0,407	0,068	$\sigma^2_\epsilon + 270 \phi_{RT}$	8,58	2,10*
C	2	4,597	2,298	$\sigma^2_\epsilon + 1620 \phi_C$	290,32	3*

Les termes dont le Fthéorique est marqué par une étoile sont significatifs pour un risque de 5%.

Tableau 5.2. Analyse Anova

H*C	8	0,048	0,006	$\sigma^2_{\varepsilon} + 324 \phi_{HC}$	0,75	1,94
P*C	4	0,987	0,247	$\sigma^2_{\varepsilon} + 540 \phi_{PC}$	31,18	2,37*
C*T(P)	6	0,271	0,045	$\sigma^2_{\varepsilon} + 270 \phi_{CT}$	5,68	2,10*
E	2	0,019	0,009	$\sigma^2_{\varepsilon} + 1620 \phi_E$	1,18	3
H*E	8	0,019	0,0023	$\sigma^2_{\varepsilon} + 324 \phi_{HE}$	0,29	1,94
P*E	4	0,078	0,019	$\sigma^2_{\varepsilon} + 540 \phi_{PE}$	2,45	2,37*
E*T(P)	6	0,071	0,012	$\sigma^2_{\varepsilon} + 270 \phi_{ET}$	1,52	2,1
Z*R	4	4,664	1,166	$\sigma^2_{\varepsilon} + 540 \phi_{ZR}$	147,27	2,37*
Z*C	4	0,031	0,0077	$\sigma^2_{\varepsilon} + 540 \phi_{ZC}$	0,97	2,37
Z*E	4	0,007	0,0017	$\sigma^2_{\varepsilon} + 540 \phi_{ZE}$	0,21	2,37
R*C	4	0,04	0,01	$\sigma^2_{\varepsilon} + 540 \phi_{RC}$	1,27	2,37
R*E	4	0,024	0,006	$\sigma^2_{\varepsilon} + 540 \phi_{RE}$	0,76	2,37
C*E	4	0,0035	0,0008	$\sigma^2_{\varepsilon} + 540 \phi_{CE}$	0,11	2,37
Erreur	4738	37,511	0,00792	σ^2_{ε}		

Les termes dont le Fthéorique est marqué par une étoile sont significatifs pour un risque de 5%.

1- La variable heuristique (H)

En consultant le tableau, nous voyons que le $F_{\text{critique}} > F_{\text{théorique}}$, ce qui signifie que la variable heuristique a un effet significatif sur l'efficacité de la ligne pour un niveau de signification de 5%. Pour voir l'effet de chaque heuristique, nous avons utilisé un test de **DUNCAN** qui permet de différencier entre les niveaux de chaque variable et de regrouper ceux qui ont un effet similaire sur la variable dépendante. Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour cette variable.

Groupement de Duncan	Efficacité moyenne	Heuristique
A	0.838141	Temps / limite supérieure
B	0.802088	Comsoal
C	0.771683	Multiple rules
C	0.766902	Limite supérieure
C	0.766626	Poids Pondéré

Tableau 5.3. Performance des heuristiques

D'après cette expérience, l'heuristique basée sur le quotient (temps de l'élément sur sa limite supérieure) donne une efficacité plus élevée que les autres. Comsoal se trouve dans la deuxième place alors que pour les heuristiques restantes (règles multiples, limite supérieure et poids pondéré), il n'y a pas une différence significative dans leur effet sur l'efficacité de la ligne. Toutes les trois se trouvent dans la dernière place.

2- Produit (P)

L'analyse a montré que cette variable a un effet significatif sur l'efficacité de la ligne ($F_{\text{critique}} > F_{\text{théorique}}$) à un seuil de confiance de 5%. En plus, le test de Duncan semble indiquer que l'efficacité de la ligne d'assemblage est inversement proportionnelle à la taille du réseau considéré mais on ne peut généraliser cette constatation car le nombre de produits utilisés est petit (3 produits). Le tableau suivant résume ces conclusions.

Groupement de Duncan	Efficacité moyenne	Produit (Nbre de nœuds)
A	0.797722	45
B	0.791142	70
C	0.778400	90

Tableau 5.4 Effet de la taille du produit sur l'efficacité des lignes d'assemblage

3- L'interaction entre les variables heuristique et produit (H*P)

En consultant le tableau ANOVA, cette interaction a un effet significatif ($p < 0.05$) sur l'efficacité de la ligne.

La figure 5.2 illustre cette interaction. Graphiquement, cela veut dire qu'un changement de niveau de la variable heuristique pour deux niveaux différents de la deuxième variable (produit) conduit à une variation différente de l'efficacité si on change l'heuristique.

Par exemple, si on considère les produits 45 et 90. Pour la méthode de règles multiples, la variation des valeurs moyennes de l'efficacité est égale à 2% alors que pour la méthode basée sur la limite supérieure des éléments de travail, cette variation monte à 12.3%.

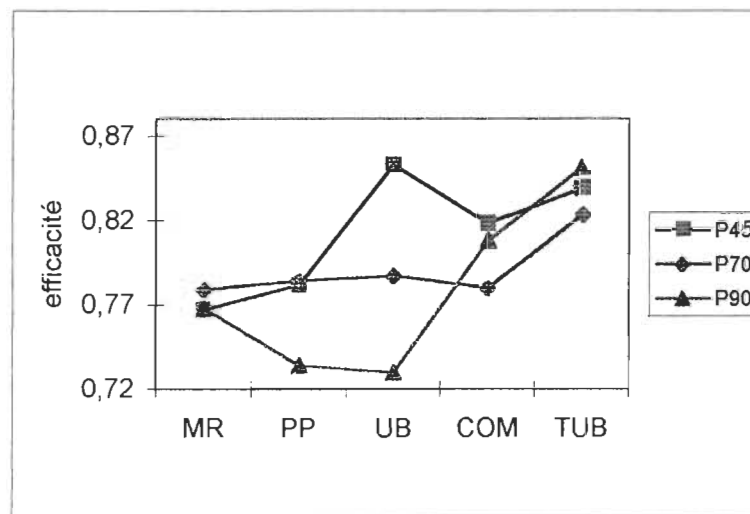


Figure 5.2. Interaction (Heuristique* Produit)

Dans cette figure, on observe plusieurs points :

- Quand le nombre de nœuds dans le produit est petit, la méthode basée sur la limite supérieure produit une efficacité plus élevée.
- Il semble que la taille du produit n'influence pas l'efficacité si on utilise la méthode basée sur le rapport (temps sur la limite supérieure) pour équilibrer la ligne d'assemblage. Le graphique indique que cette méthode donne de meilleurs résultats peu importe la taille du réseau.
- L'efficacité est inversement proportionnelle avec le nombre de nœuds dans le produit quand on équilibre la ligne d'assemblage avec l'une des deux méthodes suivantes : la méthode de poids pondéré ou la méthode basée sur la limite supérieure.

4- Le temps de cycle T(P)

Dans notre expérimentation, cette variable dépend directement de la variable produit puisque nous calculons le temps de cycle à partir de l'élément qui a le temps le plus long. Pour cette raison, le modèle développé est un modèle hiérarchique. D'après l'analyse ANOVA, cette variable a aussi un effet significatif sur la variable dépendante ($26.77 > 2.60$) pour un niveau de signification de 5%. Le graphique suivant illustre cet effet.

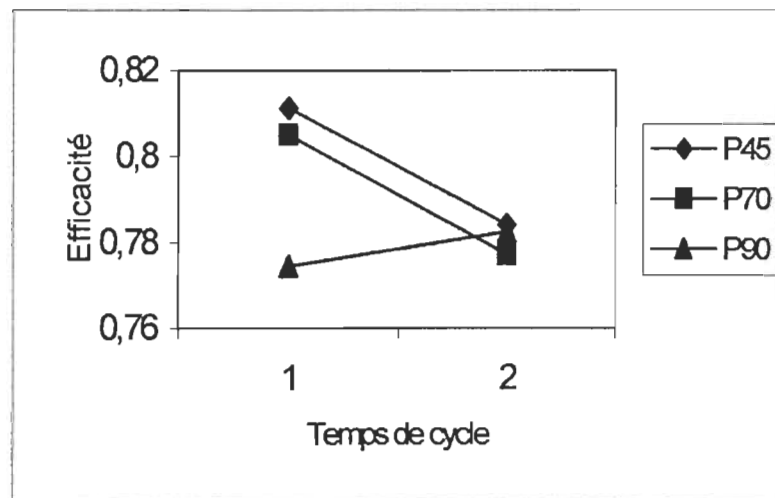


Figure 5.3. Effet du temps de cycle sur l'efficacité de la ligne d'assemblage

D'après la figure, pour les deux produits 45 et 70, quand le temps de cycle augmente, l'efficacité baisse. Tandis que pour le produit 90, c'est le contraire. L'efficacité de la ligne d'assemblage a une tendance vers la hausse. On peut conclure de la façon suivante : Quand le nombre de nœuds dans le produit est très grand, un temps de cycle long permet d'avoir une efficacité élevée.

5- La Variable contrainte de zonage (Z)

La contrainte de zonage a un effet significatif sur l'efficacité de la ligne d'assemblage pour un niveau de signification de 5% ($F_{\text{critique}} = 736.12 > 3$). Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour cette variable.

En observant les résultats de ce tableau, on peut conclure que l'efficacité moyenne de la ligne d'assemblage baisse de 18% avec une augmentation de 20% du pourcentage d'éléments de travail soumis à cette contrainte. Par conséquent, il est important d'éviter ce type de contrainte lors de la conception d'une nouvelle ligne d'assemblage.

Groupement de Duncan	Efficacité Moyenne	Contrainte de zonage (%)
A	0.888446	0
B	0.772282	10
C	0.706536	20

Tableau 5.5 Effet de la contrainte de zonage sur l'efficacité

6-L'interaction entre les heuristiques et la contrainte de zonage (H*Z)

Cette interaction a un effet significatif sur l'efficacité de la ligne d'après l'analyse ANOVA avec un $F_{\text{critique}} = 37.9 > F_{\text{théorique}} = 1.94$ pour un risque $\alpha = 5\%$. Cette interaction est illustrée graphiquement dans la figure 5.4. D'après la figure, les lignes ne sont pas parallèles, ce qui confirme l'effet significatif de cette interaction sur l'efficacité des lignes d'assemblage.

Prenons l'exemple suivant : Pour un premier niveau de la variable heuristique (exemple: MR) et pour deux niveaux différents de la variable produit (Z(0) et Z(20)), la variation de l'efficacité est de 27% alors en changeant l'heuristique (exemple: Comsoal); cette variation

chute jusqu'à 13%. Cette différence de la variation de l'efficacité confirme l'effet significatif de cette interaction sur l'efficacité des lignes d'assemblage.

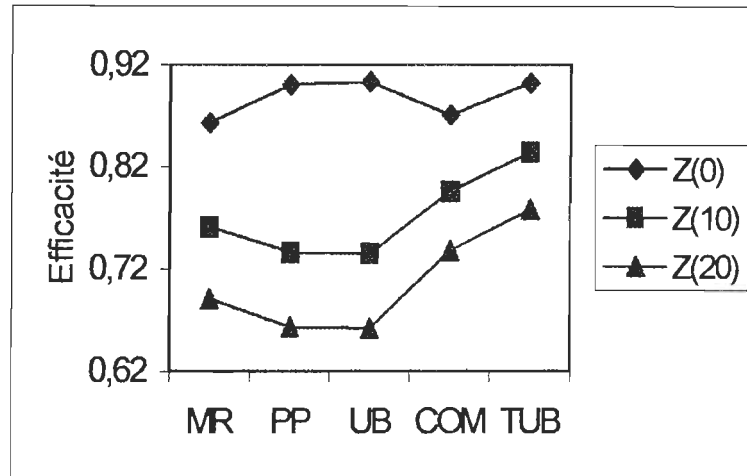


Figure 5.4. Interaction (Heuristique* Zonage)

Dans une ligne d'assemblage où la contrainte de zonage est importante, il est recommandé d'utiliser la méthode basée sur le quotient (temps/limite supérieure) et d'éviter d'utiliser la méthode de poids pondéré ou celle basée sur la limite supérieure.

Pour les lignes d'assemblage où la contrainte de zonage est absente, la méthode de poids pondéré, celle basée sur la limite supérieure et celle basée sur le rapport entre le temps de l'élément et sa limite supérieure donnent les meilleurs résultats.

7- L'interaction entre les variables produit et la contrainte de zonage (P*Z)

L'hypothèse nulle h_{06} est rejetée, l'interaction entre le produit et la contrainte de zonage a un effet significatif sur l'efficacité d'après l'analyse ANOVA.

La figure 5.5 illustre mieux cette interaction.

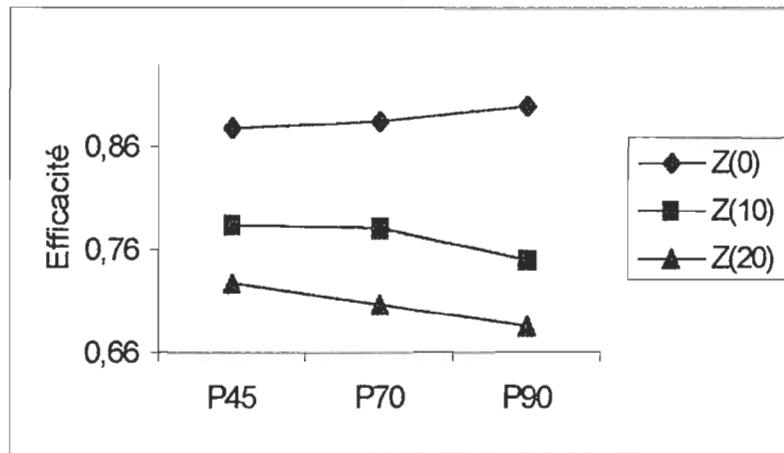


Figure 5.5. L'interaction Produit* Zonage

D'après le graphique, on observe que l'efficacité tend vers la baisse quand la contrainte de zonage est présente et que le nombre de nœuds dans le réseau augmente. On note aussi que l'efficacité a une tendance vers la hausse quand la contrainte de zonage est absente et que le nombre de nœuds dans le réseau augmente.

8- L'interaction entre la contrainte de zonage et le temps de cycle (Z*T(P))

Cette interaction est aussi significative d'après l'analyse ANOVA. La figure suivante illustre ces résultats.

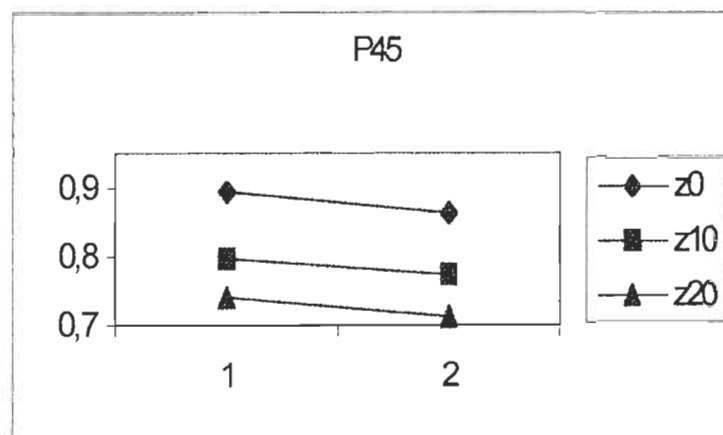


Figure 5.6. Interaction Z*T dans le cas du produit 45

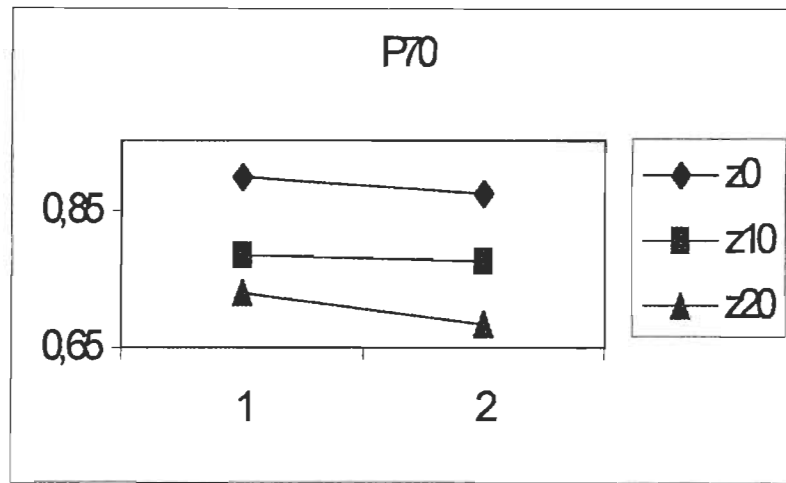


Figure 5.7. Interaction Z*T dans le cas du produit 70

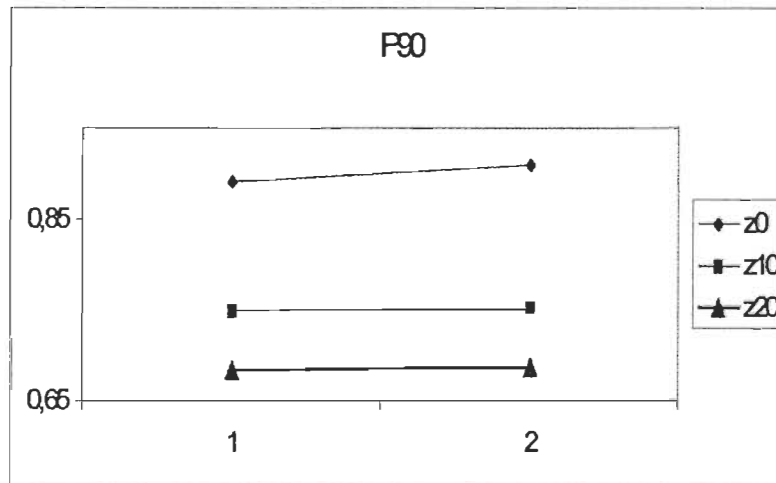


Figure 5.8. Interaction Z*T dans le cas du produit 90

Les trois figures précédentes (5.6, 5.7, 5.8) montrent les points suivants :

- Pour les produits 45 et 70, l'efficacité a une légère tendance à la baisse pour un temps de cycle plus long et pour un pourcentage élevé des éléments de travail soumis à la contrainte de zonage.

- Pour le produit 90, l'efficacité de la ligne d'assemblage est à la hausse lorsque le temps de cycle est plus long.

Dans ce cas, on peut dire qu'un temps de cycle plus long n'a pas d'effet important sur l'efficacité dans le cas où la contrainte de zonage serait «présente».

9- Contrainte de ressource (R)

Avec un F_{critique} de 773.94, cette contrainte a un effet très significatif sur l'efficacité de la ligne d'assemblage pour un niveau de signification de 5%. L'analyse a montré qu'avec une augmentation de 20% du pourcentage des éléments de travail soumis à cette contrainte, l'efficacité de la ligne baisse de 12%.

Groupement de duncan	Efficacité moyenne	La contrainte de ressource (%)
A	0.859	0
B	0.761	10
C	0.746	20

Tableau 5.6. Effet de la contrainte de ressources sur l'efficacité des lignes d'assemblage

10- L'interaction entre les heuristiques et la contrainte de ressources (H*R)

D'après l'analyse ANOVA, cette interaction a un effet significatif sur l'efficacité de la ligne. Le F_{critique} est supérieur au $F_{\text{théorique}}$ ($42.66 > 1.94$). Pour mieux illustrer cette interaction et son effet sur l'efficacité, nous présentons le graphique de la figure 5.9.

Comme la figure le montre, si la contrainte de ressource est inexistante, la méthode de poids pondéré, celle basée sur la limite supérieure (UB) et celle basée sur le rapport entre le temps de l'élément de travail sur sa limite supérieure (TUB) donnent une efficacité plus élevée.

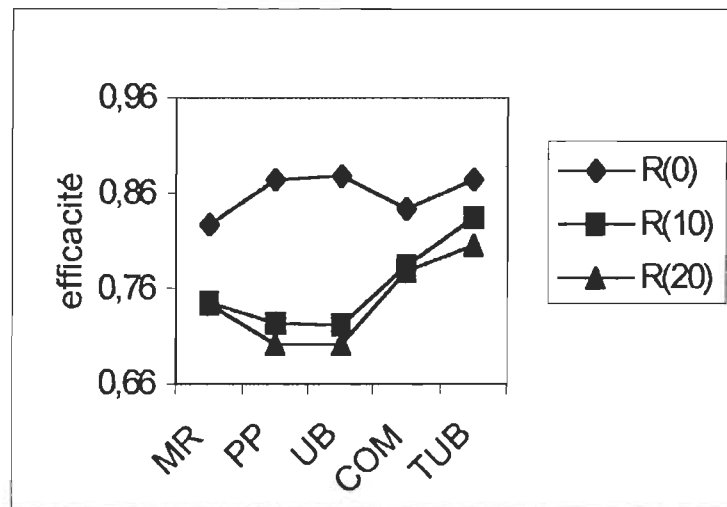


Figure 5.9. L'interaction entre les heuristiques et la contrainte de ressources

Si le pourcentage des éléments de travail soumis à cette contrainte augmente (10 et 20%), la méthode TUB donne les meilleurs résultats. Par contre l'efficacité est plus basse avec les méthodes de poids pondéré et UB.

On remarque aussi que l'efficacité a une tendance vers la baisse quand le pourcentage des éléments de travail soumis à cette contrainte augmente peu importe la méthode utilisée.

11- L'interaction entre le produit et la contrainte de ressources (P*R)

Cette interaction est aussi significative que les précédentes. Avec un $F_{critique} = 63.9$, elle affecte significativement l'efficacité des lignes d'assemblage. Pour illustrer cette interaction, on présente la figure 5.10.

D'après le graphique, en présence de la contrainte de ressource, l'efficacité baisse quand le nombre de nœuds dans le réseau augmente. Par contre, dans le cas où la contrainte de ressource est inexistante, l'efficacité a une tendance à la baisse puis à la hausse quand le nombre de nœuds dans le réseau augmente. On remarque aussi que la variation de l'efficacité entre les niveaux (10%, 20%) de la contrainte de ressource est négligeable peu importe la taille du produit.

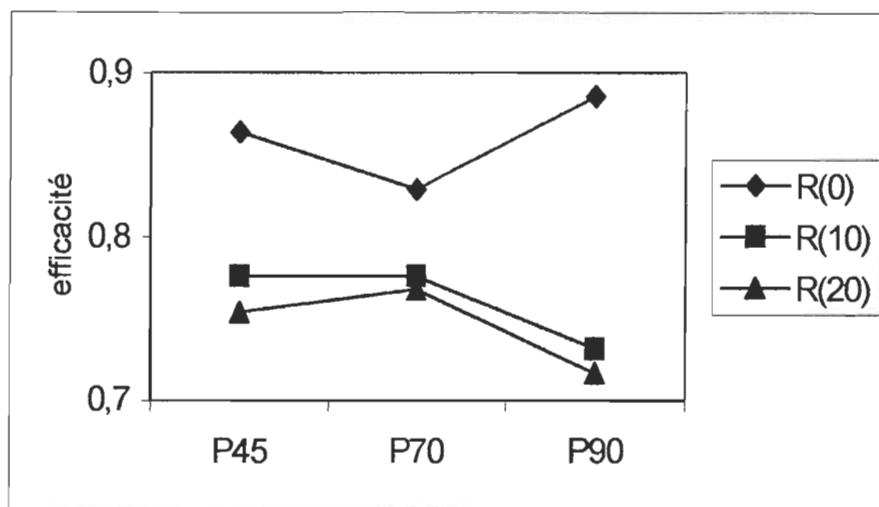


Figure 5.10. Effet de l'interaction P*R sur l'efficacité

12- La contrainte de côté de la ligne (C)

D'après l'analyse ANOVA, on rejette l'hypothèse nulle et on accepte l'hypothèse alternative, cela veut dire que la contrainte de côté de la ligne a un effet significatif sur l'efficacité des lignes d'assemblage. Cette efficacité est inversement proportionnelle au pourcentage d'éléments de travail soumis à cette contrainte. Le tableau suivant résume ces résultats.

Groupement de duncan	Efficacité moyenne	Contrainte de côté (%)
A	0.823	0
B	0.796	10
C	0.749	20

Tableau 5.7 Effet de la contrainte de côté de la ligne sur l'efficacité

13- L'interaction entre le produit et la contrainte de côté de la ligne (P*C)

Cette interaction a aussi un effet significatif sur l'efficacité de la ligne avec un F_{critique} égal à 31.18 supérieur à $F_{\text{théorique}}$ (2.37) pour un niveau de signification de 5%. Le graphique

suivant (figure 5.11) illustre cette interaction. Une analyse de cette figure décèle plusieurs points qui sont :

- La présence de la contrainte de côté de la ligne sur une ligne d'assemblage conduit à une baisse de l'efficacité de la ligne d'assemblage, peu importe le nombre de nœuds dans le réseau.
- Quand la contrainte de côté de la ligne est relâchée, l'efficacité est à la hausse entre les premiers niveaux de la variable produit (45 et 70) puis à la baisse entre les niveaux 70 et 90 de la variable produit.
- Pour un pourcentage des éléments de travail soumis à la contrainte de côté de la ligne de 10%, l'efficacité croît quand le nombre de nœuds dans le produit diminue.
- Pour le niveau le plus élevé de la contrainte de côté de la ligne, l'efficacité est à la baisse puis à la hausse entre les produits (45, 70) et (70, 90) respectivement.
- On remarque que l'efficacité est pratiquement la même pour les niveaux (0, 10%) de la contrainte de côté de la ligne et pour les deux produits 45 et 90.

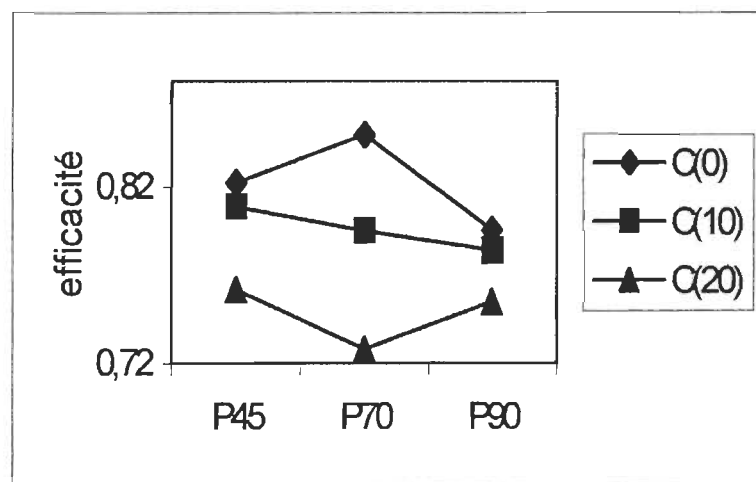


Figure 5.11. Effet de l'interaction P*C sur l'efficacité

14- L'interaction entre le produit et la contrainte de classes d'employés. (P*E)

D'après l'analyse ANOVA, cette interaction a un effet significatif sur l'efficacité de la ligne d'assemblage car le F_{critique} est supérieur au $F_{\text{théorique}}$ ($2.45 > 2.37$). La figure suivante montre cette interaction et son effet significatif sur l'efficacité.

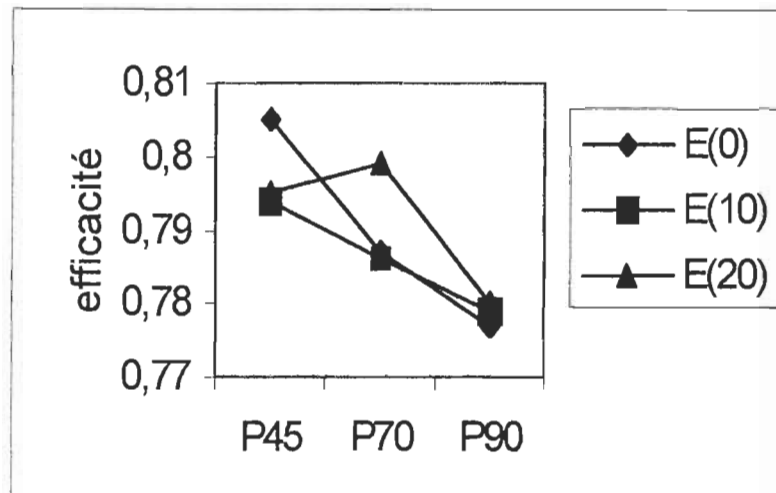


Figure 5.12. Effet de l'interaction P*E. sur l'efficacité

L'analyse de la figure 5.12, montre les points suivants :

- Pour les deux premiers niveaux de la contrainte de classes d'employés, l'efficacité a une tendance à la baisse quand le nombre de nœuds dans le réseau considéré augmente.
- Pour un pourcentage de 20% des éléments de travail soumis à la contrainte de classes d'employés, l'efficacité a une légère tendance à la hausse puis à la baisse.

En général, on peut dire que l'efficacité diminue en présence de la contrainte de classes d'employés pour des produits de grandes tailles.

15- L'interaction entre les contraintes de zonage et de ressources (Z*R)

Cette interaction a aussi un effet significatif sur la variation de l'efficacité des lignes d'assemblage. Illustrons cet effet à l'aide de la figure 5.13. La première observation est la baisse significative de l'efficacité de la ligne d'assemblage en présence des contraintes de zonage et de ressources. Deuxièmement, l'absence de la contrainte de ressources conduit à

une baisse moins importante de l'efficacité que dans le premier cas. En d'autres mots, l'effet combiné des contraintes de zonage et des contraintes de ressources est cumulatif, ce qui affecte d'autant le pourcentage d'efficacité de la ligne d'assemblage.

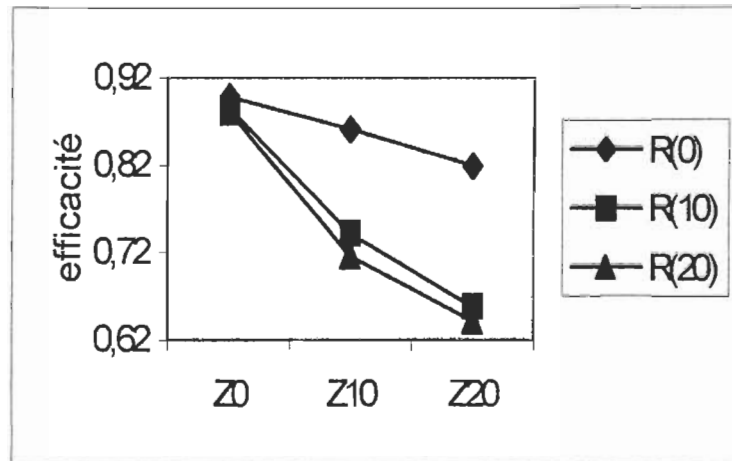


Figure 5.13. Effet de l'interaction Z*R sur l'efficacité.

16- Interaction entre les contraintes de ressources et le temps de cycle (T*R)

D'après l'analyse de la variance, cette interaction a un effet significatif sur l'efficacité de la ligne d'assemblage ($F_{\text{critique}} = 8.58 > F_{\text{théorique}} = 2.10$) pour un niveau de signification de 5%. Les figures suivantes illustrent mieux cette interaction.

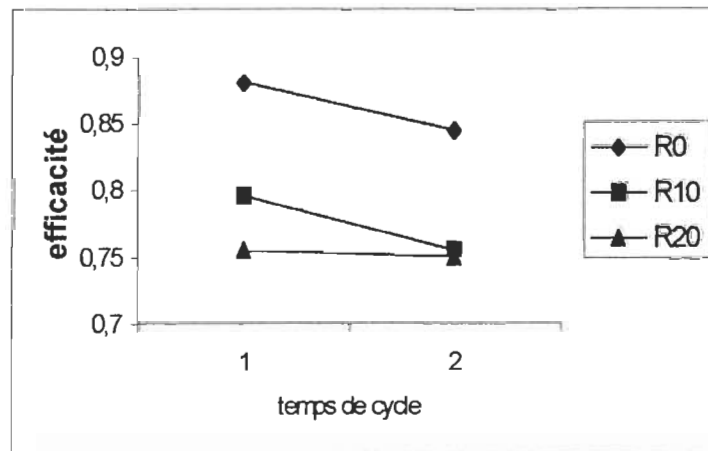


Figure 5.14. Interaction R*T dans le cas du produit 45

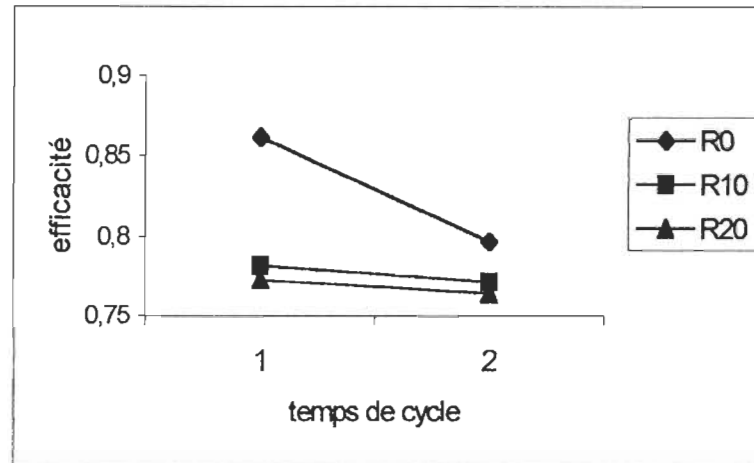


Figure 5.15. Interaction R*T dans le cas du produit 70

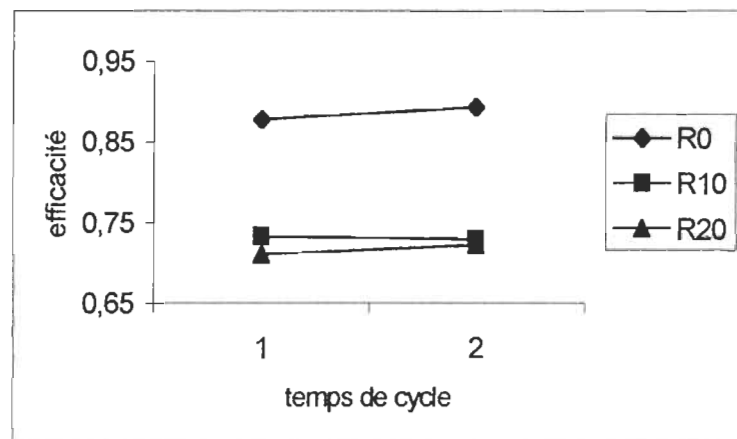


Figure 5.16. Interaction R*T dans le cas du produit 90

Une analyse des figures 5.14, 5.15 et 5.16 permet de déceler les points suivants :

- La présence de la contrainte de ressources conduit à une baisse de l'efficacité de la ligne d'assemblage dans tous les cas.
- Cas du produit 45 : Pour un temps de cycle plus long, on observe une baisse plus importante de l'efficacité pour les deux premiers niveaux de la contrainte de ressources (0, 10%) par rapport à son dernier niveau (20%).

- Cas du produit 70 : Pour un temps de cycle plus long, en présence de la contrainte de ressources, une légère baisse de l'ordre de 1% est observée. Quand la contrainte de ressources est absente, cette baisse est plus importante ($\approx 6\%$).
- Cas du produit 90 : L'absence de la contrainte de ressources conduit à une légère augmentation de l'efficacité de l'ordre de 3% quand le temps de cycle devient plus long. Quand la contrainte de ressources est présente, l'efficacité fluctue dans un intervalle de $\pm 1\%$. En d'autres mots, l'efficacité est stable.

17- Interaction entre la contrainte de côté de la ligne et le temps de cycle (C*T)

D'après l'analyse ANOVA ($F_{\text{critique}} = 5.68 > F_{\text{théorique}} = 2.10$), cette interaction a un effet significatif sur l'efficacité de la ligne d'assemblage. Les figures suivantes illustrent cette interaction.

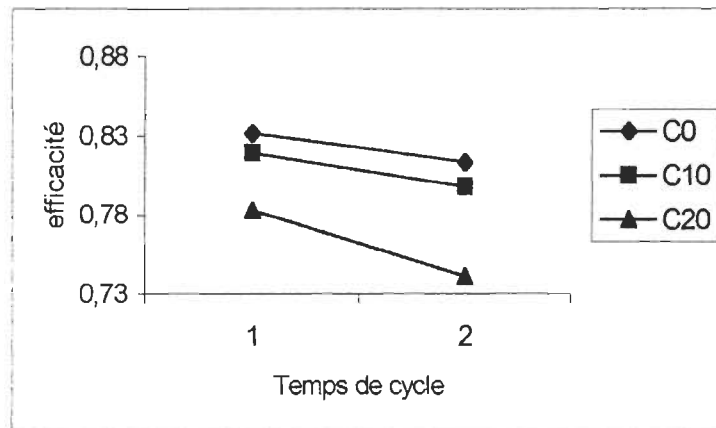


Figure 5.17. Interaction C*T dans le cas du produit 45

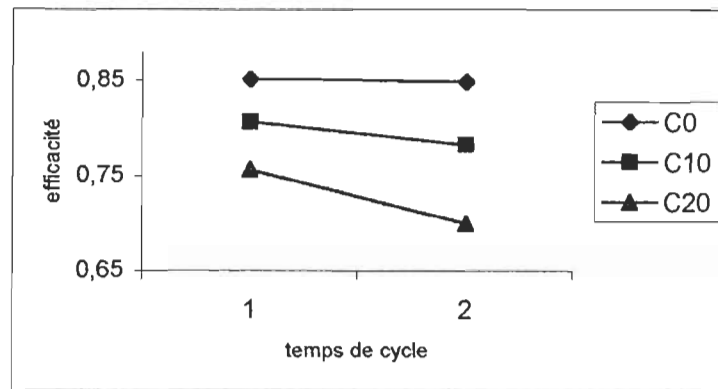


Figure 5.18. Interaction C*T dans le cas du produit 70

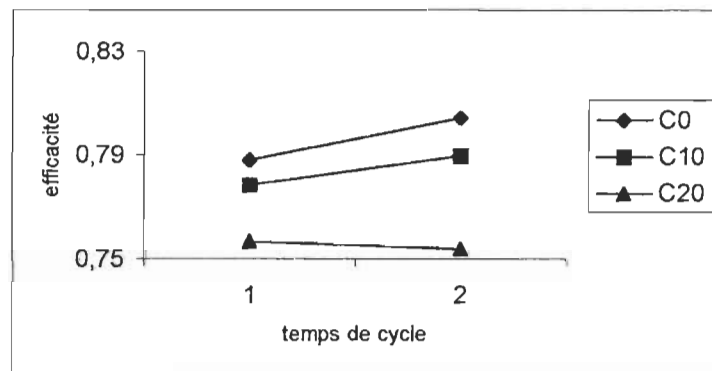


Figure 5.19. Interaction C*T dans le cas du produit 90

En examinant les trois figures précédentes, plusieurs points peuvent être tirés :

- Cas du produit 45 : Pour un temps de cycle plus long, l'efficacité a une tendance à la baisse. Cette baisse est significative en présence de la contrainte de côté de la ligne.
- Cas du produit 70 : La même observation s'applique pour ce cas. On remarque qu'au premier niveau de la contrainte de côté de la ligne (0%) une baisse d'efficacité de l'ordre de 0,2%. Pour le niveau le plus élevé (20%), cette baisse est égale à 5%.
- Cas du produit 90 : Pour un temps de cycle plus long, l'efficacité tend à croître de 1% et de 2,5% dans le cas où le pourcentage des éléments de travail soumis à la contrainte de côté de la ligne est égal à 0% et 10% respectivement. Pour le troisième niveau de la contrainte de côté de la ligne, l'efficacité baisse de 0,2%.

D'après l'expérience, on peut dire que l'efficacité est moins influencée par la contrainte de côté de la ligne quand la taille du produit est plus grande et que le temps de cycle est plus long. Mais, il y a peut être d'autres facteurs à considérer.

Un point important à signaler, celui de la généralisation des chiffres présentés dans ce chapitre. On note qu'en aucun cas, nous pouvons généraliser ces chiffres, toutefois ces résultats donnent une idée de l'effet important des contraintes sur l'efficacité des lignes d'assemblage. Pour ce qui est des autres variables, elles ne sont pas significatives.

5.4 Plan d'expérience basé sur l'indice de lissage

Le premier plan d'expérience est basé sur la variable dépendante dite efficacité de la ligne d'assemblage. Cette variable se limite à mesurer le taux d'utilisation des postes créés, en d'autres mots elle répond à la question suivante :

De combien a-t-on minimisé le temps d'inactivité ?

Cette mesure ne permet pas de connaître la distribution de la charge de travail sur les postes créés. Pour répondre à cette question on utilise une autre mesure, l'indice de lissage. Avec cette mesure, nous avons monté un autre plan d'expérience. Le modèle utilisé diffère du premier dans la variable dépendante. Dans ce cas, on utilise l'indice de lissage comme variable dépendante. Les hypothèses à tester sont les mêmes.

L'indice de lissage utilisé a été normalisé puisque les temps des éléments de travail entre les produits sont très différents. Cet indice est défini comme suit :

$$ILN = \left(\sqrt{(S_i - \bar{S})^2} \right) / N * C$$

ILN : Indice de lissage normalisé

(\bar{S}) : La charge de travail moyenne par poste de travail

C : Le temps de cycle

S_i : La charge de travail du poste i

N : Le nombre de postes créés

Les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus précédemment. Sauf pour les deux interactions suivantes : l'interaction entre la contrainte de zonage et celle du côté de la ligne et l'interaction entre la contrainte de ressources et celle du côté de la ligne. Ces deux interactions ont un effet significatif sur l'efficacité des lignes d'assemblage. Pour les interpréter, nous vous présentons les figures 5.20 et 5.21 :

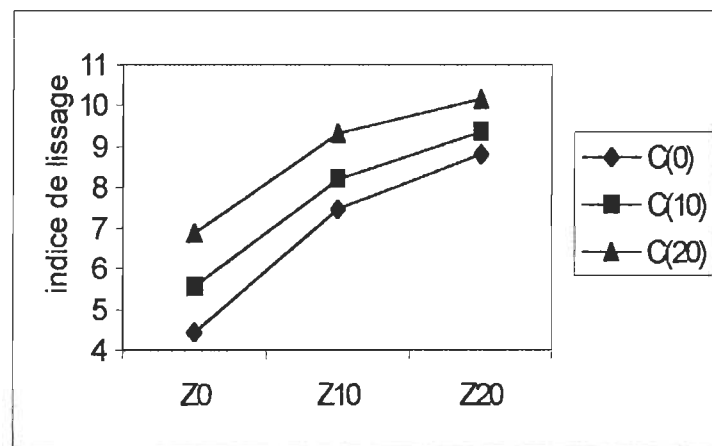


Figure 5.20. Interaction entre les contraintes de zonage et de côté de la ligne avec indice de lissage comme variable dépendante

La figure 5.20 illustre l'effet significatif de l'interaction entre les contraintes de zonage et de côté de la ligne sur l'indice de lissage. Les courbes ne sont pas parallèles. En plus, la variation de l'indice de lissage pour un niveau donné de la variable contrainte de zonage étant donnée les niveaux de la contrainte de côté de la ligne diffère si on change de niveau de la contrainte de zonage. Les mêmes constatations s'appliquent sur l'interaction entre les contraintes de ressources et de côté de la ligne illustrée par la figure 5.21.

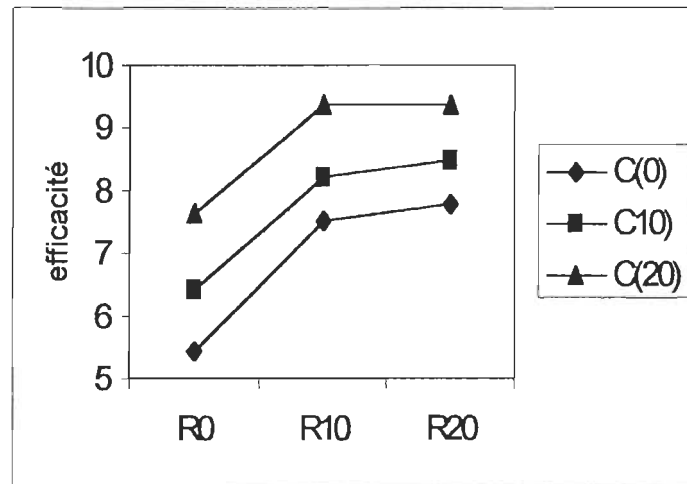


Figure 5.21. Interaction entre les contraintes de ressources et côté de la ligne

CONCLUSION

A travers cette étude, nous avons constaté que le domaine d'équilibrage des lignes d'assemblage a fait l'objet de beaucoup de recherche depuis les années cinquante. Cette recherche a été orientée vers l'élaboration des algorithmes ainsi que des heuristiques afin de solutionner ce problème. Mais malgré tout le progrès réalisé, nous avons remarqué que la plupart des méthodes développées ne tiennent pas compte des contraintes réelles du milieu industriel telles que les contraintes de zonage, les contraintes de ressources et d'autres. Par conséquent, leur application est très limitée.

Afin de répondre le plus possible aux exigences de l'industrie d'assemblage, nous avons décidé de développer une application que nous avons appelé OPTILIGNE. Cette application a été codée en Visual FoxPro sous l'environnement Windows. Le choix d'un tel logiciel de base de données (Visual FoxPro) était basé sur plusieurs caractéristiques telle que la puissance de sa base de données, etc.

Cette application tient compte des contraintes les plus connues dans les entreprises d'assemblage. Ce sont les contraintes de temps de cycle, les restrictions technologiques, les contraintes de zonage, de ressources, de côté de la ligne ainsi que les contraintes de classes d'employés. Elle offre aussi une très grande flexibilité. Nous pouvons déterminer le nombre de postes minimal requis sur la ligne d'assemblage pour un temps de cycle donné ainsi que le temps de cycle minimal pour un nombre d'employés fixe. Ces deux objectifs peuvent être atteints en sélectionnant une ou plusieurs contraintes.

Cinq heuristiques qui ont été jugées pertinentes ont été augmentées pour tenir compte des contraintes du milieu industriel et elles ont été incorporées dans l'application pour solutionner les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage avec un seul modèle de produit.

Après avoir réalisé cette application, nous avons testé via un plan d'expérience l'effet de plusieurs variables sur l'efficacité des lignes d'assemblage. Ces variables sont

principalement les heuristiques utilisées, le temps de cycle, les contraintes considérées ainsi que la taille du produit en question. Cette analyse expérimentale nous a permis d'identifier plusieurs points qui sont les suivants :

- 1- L'heuristique qui produit une efficacité très élevée est celle basée sur le rapport entre le temps de l'élément de travail sur sa limite supérieure (T/UB).
- 2- Plus le pourcentage des éléments soumis à l'une des contraintes considérées dans cette étude est élevé, plus l'efficacité baisse.
- 3- Quand la taille du produit est grande, la méthode basée sur le rapport (T/UB) donne une efficacité très élevée. Dans le cas inverse, la méthode de poids pondéré et celle basée sur la limite supérieure donnent aussi de bons résultats.
- 4- La méthode basée sur le rapport (T/UB) produit les meilleurs résultats quand les contraintes du milieu industriel sont présentes. Les pires résultats sont produits par les méthodes de poids pondéré et celle basée sur la limite supérieure.
- 5- Il semble pour les produits de grandes tailles, les contraintes industrielles affectent d'avantage l'efficacité des lignes d'assemblage.
- 6- Le plan d'expérience permet également de déceler l'effet cumulatif des contraintes sur l'efficacité de la ligne d'assemblage.

DISCUSSION

Suite à cette étude, plusieurs recommandations peuvent être proposées.

- 1- Dans les lignes d'assemblage où des produits de petite taille sont traités, il est recommandé d'utiliser la méthode de poids pondéré où la méthode basée sur le rapport entre le temps de l'élément et sa limite supérieure pour équilibrer la ligne d'assemblage.
- 2- Il est important de réduire ou d'éliminer les contraintes sur la ligne d'assemblage afin de maximiser l'efficacité.
- 3- Une présence simultanée de plusieurs contraintes sur une ligne d'assemblage a un effet cumulatif sur l'efficacité de la ligne d'assemblage.
- 4- S'il y a plusieurs contraintes sur la ligne d'assemblage, il est préférable d'utiliser la méthode basée sur le rapport (T/UB) afin d'assurer une efficacité maximale.

D'autres recommandations sont aussi possibles comme :

- 5- L'application développée solutionne seulement les problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage avec un seul modèle de produit. Une suite logique à ce travail est de développer un module qui traite les problèmes d'équilibrage avec modèles mixtes car la production mixte prend de plus en plus une place importante dans l'industrie d'assemblage. En plus, on recommande d'inclure des méthodes exactes qui prendraient en considération les mêmes contraintes car on pense qu'il y a des cas où le nombre d'éléments de travail est suffisamment petit pour trouver des solutions optimales.
- 6- Nous recommandons aussi de réaliser une étude auprès des entreprises d'assemblage afin de mesurer le potentiel d'amélioration réel de l'efficacité de leurs lignes d'assemblage.
- 7- Plusieurs autres études sont aussi possibles. Parmi elles, le développement d'un algorithme génétique pour la résolution des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage avec modèles mixtes, l'étude de l'effet de la complexité du réseau sur l'efficacité de la ligne d'assemblage.

- 8- Il est possible de poursuivre cette étude de manière à identifier les règles à suivre lors de la conception d'une ligne d'assemblage afin que la ligne permette une certaine flexibilité tout en maintenant une efficacité maximale. L'identification de ces règles pourrait représenter un secteur de recherche prometteur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Abdel-Shafi A.A, Elewa I.M. (1989), "Mixed-Model Balancing Procedure (Special solution)", *Modelling, Simulation & Control, C, AMSE*, 16(2).
- [2] Anderson E.J, Ferris, M.C. (1994), "Genetic Algorithms For Combinatorial Optimization : The Assembly Line Balancing Problem", *ORSA Journal On Computing*, 6(2).
- [3] Arcus A.L. (1966), "COMSOAL : A Computer Method Of Sequencing Operations For Assembly Lines", *International Journal Of Production Research*, 4(4).
- [4] Arizone B, Partovi F. (1990), " A Knowledge Based Method For Designing Precedence Networks And Performing Job Allocation In Line Balancing", *Computers Industrial Engineering*, 18(3).
- [5] Bard J.F. (1989), "Assembly Line Balancing With Parallel Workstation and Dead Time", *Int. J. Prod. Res*, 27(6).
- [6] Baybars I. (1986), "A Survey of Exact Algorithms For The Simple Assembly Line Balancing Problem", *Management Sci*, 32(8).
- [7] Baybars I. (1986), "An Efficient Heuristic Method For The Simple Assembly Line Balancing Problem", *International J.Prod. Res*, 24(1).
- [8] Berger I, Bourjolly, J.M, Laporte, G. (1992), "Branch & Bound Algorithms For The Multi-Product Assembly Line Balancing Problem", *European Journal Of Operational Research*", V 58.
- [9] Bettes J, Mohamed K.I. (1996), "Identifying Multiple Solutions For Assembly Line Balancing Having Stochastic Task Times", *Computers Ind. Engng*. 16(3).
- [10] Bettes J, Mohamed K.I. (1989), "A Method For Assembly Line Balancing", *Engineering Costs and Production Economics*, V 18.
- [11] Bhattacharjee T.K, Sahu S. (1990), "Complexity Of Single Model Assembly Line Balancing Problems", *Engineering Costs and Production Economics*, V 18.
- [12] Boctor F.F. (1995), "A Multiple-Rule Heuristic For Assembly Line Balancing", *Journal Of Operations Research Society*, V 46.
- [13] Chakravarty A.K, Shtub A. (1985), " Balancing Mixed Model Lines With In-Process Inventories", *Management Sci.*, 31(9).

- [14] Chase R.B. (1974), " Survey Of Paced Assembly Lines", *IE*, V 14.
- [15] Dar-El E.M, Rubinovitch Y. (1979), " MUST- A Multiple Solutions Technique For Balancing single Model Assembly Lines", *Management Sci.*, 25(11).
- [16] Dar-El E.M, (1973), " MALB- A Heuristic Technique For Balancing Large Single - Model Assembly Lines", *AIIE Transactions*.
- [17] Dar-El E.M, Cucuy S. (1977), " Optimal Mixed-Model Sequencing For Balanced Assembly Lines", *Omega, The Int. Journal Of Mgmt Sci*, 5(3).
- [18] Deckro R.F, (1989), "Balancing Cycle Time And Workstation", *IIE Transactions*, 21(2).
- [19] Faaland B.H, Klastorim T.D, Schmitt T.G, Shtub A, (1992), "Assembly Line Balancing With Ressource Dependent Task Times", *Decision Sciences*, 28(10).
- [20] Hackman S.T, Magazine M.J, Wee T.S. (1989) " Fast, Effective Algorithms For Simple Assembly Line Balancing Problems", *Operations Research*, 37(6).
- [21] Heing M.I. (1965), "Extension Of The Dynamic Programming Method In The Deterministic And Stochastic Assembly Line Balancing Problems", *Comput & Ops. Res*, 13(4).
- [22] Helgeson , Birnie D.P. (1961), "Assembly Line Balancing Using The Ranked Potional Weight Technique", *The Journal Of Industrial Engineering*, 12(6).
- [23] Hoffmann B.H. (1990), " Assembly Line Balancing : A Set Of Challenging Problems ", *Internaltional Journal Of Production Research*, 28(10).
- [24] Ignall E.J. (1965), "A Review Of Assembly Line Balancing", *The Journal Of Industrial Engineering*, 16(4).
- [25] Inman R.R, Bulfin R.L. (1991), " Sequencing JIT Mixed-Model Assembly Lines", *Management Sci*, 37(7).
- [26] Johnson R.V. (1983), "A Branch & Bound Algorithm For Assembly Line Balancing Problems With Formulation Irregularities", *Management Sci.*, 29(11).
- [27] Johnson R.V. (1988), "Optimally Balancing Large Assembly Lines With Fable", *Management Sci.*, 34(2).
- [28] Kabir M.A, Tabucanon M.T. (1995), " Batch-Model Assembly Line Balancing: A Multiattribute Decision Making Approach", *Int. J. Productions Economics*, V41.

- [29] Kilbridge M.D, Wester L. (1961), "A Heuristic Method Of Assembly Line Balancing", *The Journal Of Industrial Engineering*, 12(4).
- [30] Kim Y.K, Kim Y.J, Kim Yeongho. (1996), " Genetic Algorithms For Assembly Line Balancing With Various Objectives", *Computers Ind. Engng*, 30(3).
- [31] Malakooti B.B. (1991), " A Multiple Criteria Decision Making Approach For The Assembly Line Balancing Problem", *Int. J. Prod. Res.*, 29(10).
- [32] Malakooti B.B. (1994), " Assembly Line Balancing With Buffers By Multiple Criteria Optimization", *Int. J. Prod. Res.*, 32(9).
- [33] Moodie C.L, Young H.H. (1965), " A Heuristic Method Of Assembly Line Balancing For Assumptions Of Constant or Variable Work Elements Times", *The Journal Of Industrial Engineering*, 15(1).
- [34] Nkasu M.M, Leung K.H. (1995), " A Stochastic Approach To Line Balancing", *Int. J .Prod. Res*, 33(4).
- [35] Osaki F.A.H, Kikuchi S. (1983), "A Method For Assembly Line Balancing With More Than One Worker In Each Station", *Int. J. Prod. Res.*, 21(5).
- [36] Osman R, Shing O.N. (1986), " Assembly Line Balancing Using DBMS", *International Industrial Engineering Conference Proceedings*.
- [37] Pang C.C. (1968), "A Heuristic Method For Manufacturing Assembly Line Balancing", *The Journal Of Industrial Engineering*, 12(3).
- [38] Rachamadugu R, Talbot B. (1991), "Improving The Equality Of WorkLoad Assignments In Assembly Lines", *Int. J. Prod. Res*, 29(3).
- [39] Raouf A, Tsui C.L, El-Sayed E.A. (1980), "A Heuristic Approach To Assembly Line Balancing", *Comput & Ind. Engng*, V 4.
- [40] Raouf A, Lashkari R.S, Argun M. (1983), "A Task Grouping Approach To Mixed Model Assembly Line Balancing With Integer Programming", *J. Eng. King saud Univ*, 9(2).
- [41] Rubinovitz J, Levitin G. (1995), "Genetic Algorithm For Assembly Line Balancing", *Int. J. Productions Economics*, V 41.
- [42] Talbot F.B, Patterson J.H. (1989), "An Integer Programming Algorithm With Network Cuts or Solving The Assembly Line Balancing Problem", *Management Sci*, 30(1).

- [43] Talbot F.B, Patterson J.H, Gehrlein W.V. (1984), " A Comparative Evaluation Of Heuristic Line Balancing Techniques", *Management Sci*, 32(4).
- [44] Thomopoulos N.T. (1967), " Line Balancing-Sequencing For Mixed-Model assembly", *Management Sci*, 14(2).
- [45] Schofield N.A. (1979), "Assembly Line Balancing And The Application Of Computer Techniques", *Comput & Ind. Engng*, V3.
- [46] Shin D. (1990), "An Efficient Heuristic For Solving Stochastic Assembly Line Balancing Problems", *Computers Ind. Engng*, 18(3).
- [47] Shin D, Min H. (1991), " Flexible Line Balancing Practices In Just-in-Time Environment", *Production And Inventory Management Journal- 4th quarter*.
- [48] Shin D, Min H. (1991), " Uniform Assembly Line Balancing With Stochastic Task Times In Just-in-Time Manufacturing", *Int. J. Of Operations & Prod Management*, 11(8).
- [49] Shkurba V.V, Beletski S.A. (1962), "Numerical Methods For Assembly-Line Balancing «A survey»".
- [50] Suliman S.M.A, Al- Tamini A.M. (1983), " Computational Methods for the Mixed Model Assembly Line Problem : A Review", *Eng. Sci. King Saud Univ*, 11(2).
- [51] Wee T.S, Magazine M.J. (1982), "Assembly Line Balancing As Generalized Bin Packing", *Operations Research letters*, 1(2).
- [52] Wilson J.M. (1986), "Formulation Of A Problem Involving Assembly Lines With Multiple Manning Of Workstations", *Int. J. Prod. Res.*, 24(1).
- [53] Wester L, Kilbridge M. (1963), "The assembly line model-mix sequencing problem, The Proceedings of the third International Conference on Operations Research".
- [54] Macaskill J.L.C. (1972), "Production-line balances for mixed-model lines", *Management Science*, 19, No 4, Part 1, 423-434
- [55] Bonney M.C, Schofield N.A, Green A. (1976), "Assembly line balancing and mixed model line sequencing", *Proc, Fifth INTERNET World Congress, Birmingham, U.K.*
- [56] Lorenz J.D. (1982), "ALPACA Line balancing system", *Computers and Industrial Engineering*, 6, No 2, 115-123.
- [57] Ronald C.A, Charles R.S. (1993), "Modeling and Analysis of Manufacturing systems" , *John Wiley & Sons, New York*

GLOSSAIRE

Dans ce glossaire, nous présentons la définition des termes souvent utilisés dans les chapitres de cette étude. On note qu'une partie de ces définitions ont été extraites du manuel de référence de B.I.T (Bureau international du Travail).

1. Ligne d'assemblage

Consiste en un ensemble de postes de travail reliés entre eux par un mécanisme de transport (généralement un convoyeur) et une spécification détaillée sur la circulation du produit d'un poste à un autre.

2. Élément de travail

Selon le BIT, on entend par élément de travail toute partie distincte d'un travail donné, choisie parce qu'elle se prête à l'observation, à la mesure et à l'analyse (par exemple : coller une étiquette, visser une vis, souder un tube, etc.).

3. Poste de travail

Endroit sur la ligne d'assemblage où un ensemble d'éléments de travail sont réalisés. Il est souvent géré par un seul opérateur qui utilise des ressources matérielles pour l'accomplissement de la tâche.

4. Cycle de travail

La série des éléments de travail nécessaires à l'accomplissement d'une tâche ou à l'obtention d'une unité de production.

5. Temps de cycle

Le temps alloué à chaque poste de travail pour réaliser les éléments de travail qui lui ont été affectés.

6. Temps de cycle du poste

Somme des temps standards de tous les éléments de travail qui ont été affectés à un poste.

7. Contenu de travail

Selon le BIT, le contenu de travail d'une tâche est défini comme suit : temps de base + majoration de repos + toute autre majoration pour travail additionnel (par exemple la partie d'une majoration auxiliaire qui représente un travail). Pour comprendre cette définition, on présente ci-dessous des définitions du temps de base et de la majoration de repos extraite du BIT (figure 1.2).

8. Un temps de base

C'est le temps d'exécution d'un élément de travail à l'allure de référence.

9. Une majoration de repos

C'est un complément ajouté au temps de base afin de donner au travailleur la possibilité de se remettre des effets physiologiques et psychologiques de l'accomplissement d'une tâche déterminée dans des conditions données et afin de tenir compte de ses besoins personnels. L'ampleur de la majoration dépend de la nature du travail.

10. Temps d'inactivité

Le temps d'inactivité d'un poste est la différence entre le temps de cycle et la somme des temps des éléments de travail de ce poste. Autrement dit, c'est le temps non productif du poste.

11. Une ligne d'assemblage est dite équilibrée

Si la somme des temps d'inactivités dans tous les postes de travail est minimisée pour un temps de cycle donné. Si le temps d'inactivité est nul, la ligne est dite parfaitement équilibrée.

PROGRAMME DE SAS

```

Title 'Effet des contraintes sur l'efficacité des lignes d'assemblage';

data mydata;
options pagesize = 60 linesize = 80 ;
options nodate ;

infile 'data_eff';           {le fichier data_eff contient les données des expériences}
input h$ prod$ T z r c emp eff;
proc anova ;
class h prod T z r c emp ;

model eff= h prod h*prod T(prod) z z*h z*prod z*T(prod) r r*h r*prod
          r*T(prod) c c*h c*prod c*T(prod) emp emp*h emp*prod emp*T(prod)
          z*r z*c z*emp r*c r*emp c*emp ;

means h / duncan ;
means prod / duncan ;
means z r c h*prod z*h z*prod z*T(prod) r*h r*prod r*T(prod) / duncan ;
means c*h c*prod c*T(prod) emp*h emp*prod emp*T(prod) / duncan ;
means z*r z*c z*emp r*c r*emp c*emp / duncan ;

run ;

```