HAL
open science

Evaluation et mise en oeuvre des systèmes de production cyclique

Malha Mabed

To cite this version:

Malha Mabed. Evaluation et mise en oeuvre des systèmes de production cyclique. Modélisation et simulation. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2005. Français. NNT : 2005EMSE0004 . tel-00850443

HAL Id: tel-00850443

https://theses.hal.science/tel-00850443v1

Submitted on 12 Aug 2013

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

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

ECOLE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT ETIENNE

N° d'ordre : 361 GI

THESE

Présentée par Malha MABED

pour obtenir le titre de

Docteur

DE L'ECOLE DES MINES DE SAINT ETIENNE ET DE L'UNIVERSITE JEAN MONNET DE SAINT ETIENNE.

Spécialité : Génie Industriel

Evaluation et mise en œuvre des systèmes de production cyclique

Soutenue publiquement le 28 février 2005

Composition du jury :

Pierre BAPTISTE	Rapporteur
Gérard BEL	Rapporteur
Fayez Fouad BOCTOR	Directeur de thèse
Jean Pierre CAMPAGNE	Directeur de thèse
Alexandre DOLGUI	Président de jury

THESE PREPAREE EN COLLABORATION AVEC LE CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TECHNOLOGIES DE L'ORGANISATION RESEAU, DE L'UNIVERSITE LAVAL, QUEBEC, CANADA

ECOLE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT ETIENNE

N° d'ordre : 361 GI

THESE

Présentée par Malha MABED

pour obtenir le titre de

Docteur

DE L'ECOLE DES MINES DE SAINT ETIENNE ET DE L'UNIVERSITE JEAN MONNET DE SAINT ETIENNE.

Spécialité : Génie Industriel

Evaluation et mise en œuvre des systèmes de production cyclique

Soutenue publiquement le 28 février 2005

Composition du jury :

Pierre BAPTISTE	Rapporteur
Gérard BEL	Rapporteur
Fayez Fouad BOCTOR	Directeur de thèse
Jean Pierre CAMPAGNE	Directeur de thèse
Alexandre DOLGUI	Président de jury

THESE PREPAREE EN COLLABORATION AVEC LE CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TECHNOLOGIES DE L'ORGANISATION RESEAU, DE L'UNIVERSITE LAVAL, QUEBEC, CANADA

B.R.I.S.E.
3 4200 01051135 6

Résumé

L'évolution de l'environnement des entreprises a transformé la nature des relations entre elles, qui de simple relations d'achat entre clients et fournisseurs se sont transformées en des rapports plus contractualisés et plus durables. Ces derniers imposent à ces entreprises de revoir leurs méthodes de gestion et de production pour une meilleure synchronisation de leurs flux.

Nous nous intéressons dans ce mémoire à une relation particulière entre clients et fournisseurs, celle fondée sur le principe de livraisons cycliques, selon lequel le fournisseur s'engage à livrer des quantités de produits à des intervalles de temps fixes et de façon répétitive. L'intérêt de ce mode de livraison et qu'il permet, aux donneurs d'ordres, une gestion extrêmement simple des approvisionnements et facilite l'organisation des activités.

Comme réponse à ce type de livraisons et afin de synchroniser leurs flux de production à ceux de livraisons, les entreprises adoptent la production cyclique. L'avantage de cette dernière est qu'elle permet entre autres de réduire les coûts engendrés par la fabrication, et de simplifier l'organisation du travail.

Notre travail consiste alors en l'évaluation et la mise en œuvre d'un plan de production cyclique, pour un atelier de type Flow Shop pur fabricant plusieurs produits, lorsque les appels de livraisons sont cycliques. Nous proposons une nouvelle méthode déterminant un plan de production cyclique minimisant des coûts de lancements, coûts de stockage et des coûts de fabrication.

Nous introduisons dans un premier temps le contexte de notre travail en précisant les différentes hypothèses que l'on pose. Nous proposons par la suite une revue de la littérature sur les différents travaux réalisés, et proposons une classification des problèmes traitant de la production cyclique étudiés par la communauté scientifique. Nous exposons également la méthode que l'on propose pour la détermination d'un plan de production cyclique minimisant les différents coûts que l'on considère.

Nous présentons une analyse des résultats issus de l'application de notre approche ainsi que ses variantes sur un ensemble de benchmarks générés aléatoirement et respectant les traits caractéristiques des problèmes réels. Nous réalisons une étude comparative des approches que l'on propose à l'une de celles proposées dans la littérature. Nous terminons ce mémoire par une conclusion et un ensemble de voies de recherches futures.

Mots- clés *: Livraison cyclique, Production cyclique, Lot sizing, Ordonnancement, Flow Shop.*

Remerciements

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse Messieurs les professeurs, Fayez Fouad BOCTOR -Université Laval, Québec, CANADA- et Jean Pierre CAMPAGNE - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon- pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en acceptant de diriger ma thèse. Je les remercie également pour leurs précieux conseils et leurs critiques constructives.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Fayez Fouad BOCTOR, qui a eu la grande amabilité de m'accueillir au sein de son laboratoire et qui par sa grande expérience a su me faire profiter de ses compétences, sa rigueur et sa générosité, son exigence et son énergie pour le travail et surtout sa disponibilité permanente.

Je remercie par ailleurs :
-Monsieur Pierre BAPTISTE, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Montréal, CANADA et Monsieur Gérard BEL, Maître de recherche à l'Office National d'Etudes et de Recherche Aérospatiales de Toulouse pour l'intérêt et toute l'attention qu'ils ont portés à mes travaux et de m'avoir fait l'honneur de rapporter ma thèse. Leurs précieux conseils me seront sans doutes d'une grande utilité pour mes travaux de recherche futurs.

-Monsieur Alexandre DOLGUI, Professeur à l'Ecole des Mines de Saint Etienne pour sa disponibilité et son accueil au sein du centre G2I après mon retour du Canada et de m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury de ma thèse.

Mes remerciements vont également à mon cher papa qui a participé entre autres à la relecture de ce mémoire et qui m'a toujours fort bien encouragée.

Je termine en remerciant toute personne m'ayant aidée de près ou de loin dans l'aboutissement de ce travail. Je pense notamment à tous les membres du Département des Opérations et Systèmes de Décision (OSD) ainsi que tous les membres du Centre de Recherche sur les Technologies de l'Organisation Réseau (CENTOR) de l'université Laval pour leur accueil et la grande sympathie dont ils m'ont toujours fait preuve.
Je salue également tous les membres du département Méthodes Scientifiques pour la Gestion Industrielle (MSGI) ainsi que tous les membres du centre (G2I) de l'école des mines de Saint Etienne.

Dédicaces

Aux deux êtres qui me sont les plus chers Maman et Papa.

A toute ma famille.

A tous mes amis(es).

A tous ceux qui me sont chers.

Table des matières

Glossaire 13
Introduction 17
Chapitre 1 : Contexte général et problématique 21
1.1. La production cyclique dans l'industrie 22
1.1.1. Dans l'industrie du bois 22
1.1.2. Dans l'industrie de la pharmacie 22
1.1.3. Dans l'industrie de l'automobile 23
1.2. Le problème objet de la recherche 23
1.3. Objectifs de la recherche 26
Chapitre 2 : Revue de la littérature 27
2.1. Introduction 28
2.2. Classification des problèmes traités dans la littérature 31
2.3. Analyse de la littérature 33
2.3.1. Cas d'une demande déterministe statique 33
2.3.2. Cas d'une demande dynamique 39
2.3.3. Le cas d'une demande cyclique et déterministe 40
2.4. Conclusion 44
Chapitre 3 : Approches proposées 45
3.1. Cadre général de l'approche proposée 47
3.2. Détermination de la durée maximale du cycle de production 50
3.3. Calcul des quantités à fabriquer 50
3.3.1. Cas où le cycle de production est un multiple entier des cycles de livraison 50
3.3.2. Cas où le cycle de production n'est pas un multiple entier de tous les cycles de livraison 51
3.4. Condition nécessaire et suffisante de réalisabilité 54
3.5. Détermination des séquences de passage des lots sur les machines 57
3.5.1. Utilisation de la méthode de Campbell, Dudek et Smith (la méthode CDS) 58
3.5.2. Utilisation de la méthode de Nawez,Enscore et Ham (la méthode NEH) 59
3.6. Construction d'un calendrier d'opérations réalisable 60
3.7. Méthode pour améliorer la solution obtenue 65
3.7.1. Actions réduisant le coût d'une solution 65
3.7.2. Actions susceptibles de réduire le coût d'une solution 71
3.7.3. La méthode d'amélioration proposée 73
3.8. Variantes de l'approche proposée 75
3.9. Conclusion 78
Chapitre 4 : Evaluation de l'approche proposée et résultats numériques 79
4.1. Récapitulatifs des méthodes proposées 80
4.2. Rappel de la méthode de Hacid (Hacid, 2000) 81
4.2.1. Hypothèses de travail de la méthode Hacid 81
4.2.2. Résumé des étapes de la méthode Hacid 82
4.3. Similitudes et différences avec l'approche proposée 88
4.3.1. Comparaison des contextes 88
4.3.2. Comparaisons des hypothèses 88
4.3.3. Comparaisons des deux approches 90
4.4. Adaptation proposée de la méthode de (Hacid, 2000) 90

4.5. Générateur de problèmes aléatoires 92
4.6. Résultats numériques 96
4.7. Analyse des résultats 99
4.8. Conclusion 130
Chapitre 5 : Conclusions et perspectives 133
5.1. Conclusions générale 134
5.2. Voies de recherches futures 136
Bibliographie 137
Annexes 145
Annexe A : Exemple de problèmes générés aléatoirement 146
Annexe B : Synthèse des résultats issus de l'application des différentes approches sur les problèmes générés 158

Table des figures

Figure 2. 1. Classification des problèmes de production cyclique 32
Figure 2. 2. Grands axes de la méthode de détermination des cycles de production 43
Figure 3. 1. Organigramme de l'approche globale déterminant le calendrier des opérations . 49
Figure 3. 2. Exemple de deux cycles de livraison consécutifs d'un produit *P* 52
Figure 3. 3. Détermination de l'horizon de calcul des quantités à fabriquer 52
Figure 3. 4. Quantités à fabriquer sur l'horizon de calcul 54
Figure 3. 5. Exemple de calendrier d'opérations réalisable 56
Figure 3. 6. Exemple illustrant l'existence d'un calendrier d'opération réalisable 57
Figure 3. 7. Algorithme de Campbell, Dudek et Smith 59
Figure 3. 8. Algorithme de Nawaz, Enscore et Ham 60
Figure 3. 9. Algorithme de Construction d'un calendrier d'opérations réalisable 64
Figure 3. 10. Exemple illustrant l'application de l'action réduisant les coûts de fabrication d'une manière certaine 66
Figure 3. 11. Exemple illustrant l'application de l'action réduisant les coûts de stockage d'une manière certaine 68
Figure 3. 12. Exemple illustrant l'application de l'action améliorant une solution d'une manière certaine en exploitant les secondes plages horaires pour les réglages 70
Figure 3. 13. Les différentes variantes de l'approche proposée 76
Figure 4. 1. Stock induit par un groupage de trois ordres de livraisons 84
Figure 4. 2. Les différentes classes d'ateliers à traiter 93
Figure 4. 3. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de problèmes identifiés par -nombre de machines-nombre de produits-taux d'utilisation de l'atelier 103
Figure 4. 4. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de trois machines 106
Figure 4. 5. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de six machines 109
Figure 4. 6. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de douze machines 112
Figure 4. 7. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de cinq produits 115
Figure 4. 8. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de dix produits 118

Figure 4. 9. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de vingt produits 121
Figure 4. 10. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes d'ateliers à faible charge 124
Figure 4. 11. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes d'ateliers à forte charge 127

Table des tableaux

TAB.3. 1. Exemple de cycles de livraison de deux produits P_1 et P_2 51
TAB.3. 2. Cycle de production des deux produits P_1 et P_2 51
TAB.4. 1. Coûts des solutions et moyennes de déviations obtenus par l'application des cinq méthodes sur les deux premiers groupes de problèmes 98
TAB.4. 2. Déviations moyennes pour les groupes identifiés par -nombre de machines-nombre de produits-taux d'utilisation de l'atelier- pour toutes les méthodes 100
TAB.4. 3. Déviations moyennes pour les groupes de trois machines 105
TAB.4. 4. Déviations moyennes pour les groupes de six machines 107
TAB.4. 5. Déviations moyennes pour les groupes de douze machines 110
TAB.4. 6. Déviations moyennes pour les groupes de cinq produits 113
TAB.4. 7. Déviations moyennes pour les groupes de dix produits 116
TAB.4. 8. Déviations moyennes pour les groupes de vingt produits 119
TAB.4. 9. Déviations moyennes pour les groupes d'ateliers à faible charge 122
TAB.4. 10. Déviations moyennes pour les groupes d'ateliers à forte charge 125
TAB.4. 11. Moyennes des temps d'obtention des solutions pour les groupes identifiés par -nombre de machines-nombre de produits-taux d'utilisation de l'atelier- pour les cinq méthodes. 129

Glossaire

Capacité

Débit de sortie maximum d'une unité de production (poste de travail) sur une période donnée. Par nature, la capacité doit donc être mesurée par un nombre d'unités de produits par unité de temps.

Charge

Quantité de travail à effectuer sur un poste de travail (poste de charge) pendant une période déterminée. La charge est habituellement exprimée en heures de travail ou en unités de produit.

Coûts de fabrication

Ensemble des coûts directs de fabrication (coûts de main d'œuvre directe), des frais généraux de fabrication, et des coûts directs divers. Ils entrent dans le calcul des coûts de production.

Coût de lancement

Ensemble des coûts engendrés par le lancement de fabrication d'un lot d'un produit.

Coût de stockage

Ensemble des coûts engendrés par le stockage d'un produit pour une durée de temps.

Cycle de livraison

Est une suite ordonnée de livraisons cycliques, se répétant à fréquence fixe. Il est défini par sa durée, les dates et les quantités pour chaque livraison et pour chaque produit.

Cycle de production

Est défini par une suite ordonnée de productions cycliques. Il lui est associé une durée, les dates et les quantités de chaque lancement, et la séquence de réalisation de ces lancements.

Délai de livraison

Temps s'écoulant entre la réception d'une commande client et sa livraison.

Groupage

C'est le procédé consistant à grouper la fabrication de deux ou plusieurs livraisons d'un même produit. Le groupage, entrant dans la définition des ordres de fabrication, influe sur le coût de stockage, le coût de lancement et le coût de fabrication.

Horizon de planification

Période de temps comprise entre la date actuelle et une date future, pour laquelle on élabore des plans de production.

Juste à temps (JAT)

Le juste à temps consiste à mettre en place un système de production permettant de fabriquer des articles avec une efficacité optimale (zéro-stock, zéro-panne, etc). Il consiste à approvisionner les articles nécessaires, au bon endroit, au bon moment (ni trop tôt, ni trop tard) et dans les quantités requises.

Livraison cyclique

C'est une livraison réalisée à fréquence fixe.

Lot

Quantité de produit fabriqué, dans un même passage. Les produits d'un lot présentent les mêmes caractéristiques (spécifications techniques).

Lot pour lot

Technique de lotissement selon laquelle l'ordre planifié pour une période est égal au besoin net de cette même période.

Lotissement

Technique ou procédure utilisée pour déterminer la taille des lots (quantités à commander ou à fabriquer.

Opération

Processus de fabrication élémentaire à exécuter d'une façon indivisible. L'opération correspond à l'action subie par la matière ou le produit et mettant en œuvre un équipement donné du poste de travail. Elle constitue un élément d'une gamme ou d'un ordre d'atelier.

Ordonnancement

Calcul et positionnement dans le temps des dates de début et /ou des fins d'opérations ou des ordres (groupes d'opérations), afin de tenir les délais fixes.

Production cyclique

C'est une production réalisée à fréquence fixe.

Stock de sécurité

Quantité de stock prévue pour se protéger contre les erreurs de prévision et des perturbations dues au retard d'approvisionnement pouvant entraîner des ruptures de stocks.

Temps de lancement

Temps nécessaire pour passer de la fabrication d'un produit à un autre, sur une machine, une ligne ou une unité de production données.

Temps de stockage

C'est le temps correspondant au stockage d'une quantité d'un produit.

Introduction

L'évolution de l'environnement des entreprises et l'avènement de la philosophie de production en juste à temps ont transformé la nature des relations entre ces entreprises, qui de simples relations d'achat entre clients et fournisseurs se sont transformées en des rapports plus contractualisés et plus durables. Ces derniers imposent à ces entreprises de revoir leurs méthodes de gestion et de production pour une meilleure synchronisation de leurs flux : physiques, informationnels et décisionnels.

Nous nous intéressons dans ce travail de recherche à une relation particulière entre clients et fournisseurs, celle fondée sur le principe de livraison cyclique. Selon ce principe, le fournisseur s'engage, sur le long terme, à livrer des quantités de produits fixes à des intervalles de temps fixes et de façon répétitive.
L'intérêt de ce mode de livraisons est qu'il permet aux donneurs d'ordres, une gestion extrêmement simple des approvisionnements et facilite l'organisation des activités de réception et des autres services de ces approvisionnements.

La production cyclique constitue alors une réponse naturelle pour faire face à ce type de demande. Fondée sur le principe de synchronisation des flux de production et de livraison, elle s'inscrit totalement dans les principes du juste à temps. Par son caractère répétitif, elle simplifie très fortement la gestion des unités de production et favorise les processus d'acquisition d'expérience et d'apprentissage.

Le recours à ce mode de production dans les systèmes manufacturiers est encouragé par plusieurs facteurs. (Castro *et al.*, 2003) soulignent l'intérêt que représente l'établissement d'un ordonnancement cyclique, pour les entreprises évoluant dans un environnement concurrentiel et pour lesquelles les demandes concernent un seul produit - ou un petit ensemble non diversifié- pour des périodes relativement longues.

(Hall, 1988) quant à lui indique que l'intérêt de la mise en place d'un système de production cyclique réside dans la répétitivité du schéma de travail, lequel contribue considérablement à la qualité, la productivité ainsi qu'à l'amélioration de chaque aspect de la production.

L'étude de (Campbell *et al.*, 1996) montre les avantages entraînés par la mise en place d'un ordonnancement cyclique en terme de simplicité de planification, de facilité de description, de compréhension et de gestion.

Par ailleurs, (Campagne *et al.*, 2001a) exposent une application de la production cyclique dans le domaine automobile, tant chez les constructeurs automobiles que chez les équipementiers de premier rang, lorsqu'il s'agit d'approvisionner des composants à faible variété et faisant l'objet d'une demande régulière.

Nous nous intéressons dans ce présent travail, à la mise en œuvre des systèmes de production cyclique, lorsque les demandes de livraison des produits sont de nature cyclique. Ce travail portera sur un atelier de type Flow Shop pur fabricant plusieurs produits.

Notre travail consiste à déterminer un plan de production cyclique, répondant à ces demandes de livraisons cycliques et minimisant les coûts de stockage, de lancement et de fabrication. Nous supposons dans cette étude que les coûts de stockage des produits finis sont valorisés à leurs coûts des matières premières, les coûts de lancement des lots de fabrication sont fixes par machine. Les coûts de fabrication, quant à eux, sont calculés par machine et sont fonction des plages horaires de travail sur lesquelles la fabrication est réalisée. Notons que nous considérons trois différentes plages horaires : heures régulières (journée), heures de soirs et heures de fin de semaine.

Dans cette optique, nous soulevons une hypothèse simplificatrice posée habituellement dans les travaux de recherche recensés dans la littérature et développons une nouvelle méthode (avec plusieurs variantes) pour la préparation d'un plan de production cyclique en réponse à ce type de demandes. Nous menons par la suite une analyse détaillée des performances de la méthode proposée ainsi que ses variantes et les comparons à l'une des méthodes existantes (Hacid, 2000).

Nous décomposons ce mémoire en cinq chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous exposons plus en détails le contexte de la production cyclique en citant quelques exemples d'application, définissons davantage notre problématique,

énumérons les différentes hypothèses que l'on considère et les grands objectifs que l'on se fixe.

- Dans le second chapitre, nous proposons une classification des différents problèmes traitant de la mise en œuvre des plans de production cyclique et exposons un état de l'art des travaux recensés dans la littérature.

- Nous consacrons le troisième chapitre à l'exposé, dans sa globalité, de l'approche que l'on propose ainsi que ses variantes pour la détermination d'un plan de production cyclique minimisant les coûts de stockage, de lancement et de fabrication. Nous enchaînons par le détail des différentes étapes composant notre approche.

- Nous évaluons, dans le quatrième chapitre, l'approche que l'on propose, ainsi que ses variantes, en les testant sur un ensemble de trois cents soixante problèmes fictifs reproduits de façon aléatoire et respectant les traits caractéristiques des problèmes réels. Nous procédons par la suite à une comparaison de ces approches à l'une des méthodes recensées dans la littérature. Les résultats numériques issus de l'application des méthodes citées précédemment sur l'ensemble des problèmes générés ainsi que leur analyse sont également donnés.

- Nous concluons ce mémoire et présentons quelques perspectives quant aux voies de recherche futures.

Chapitre 1 : Contexte général et problématique

1.1. La production cyclique dans l'industrie

Parmi les nouvelles formes d'échange entre donneurs d'ordres et fournisseurs est apparue depuis quelques années la notion de contrat de partenariat, laquelle repose sur le principe des livraisons cycliques et permet aux fournisseurs d'avoir des informations extrêmement précises, à long terme, sur les calendriers de livraison.

La production cyclique constitue dès lors une réponse naturelle pour faire face à ce type de livraisons cycliques. L'importance d'une telle production réside dans la simplification des communications dans l'atelier et de la coordination des activités de gestion des ressources humaines, de maintenance et d'approvisionnement des plans cycliques ainsi que leur cohérence en regard des principes juste à temps (Leorch et *al.*, 1994).

Nous recensons dans la réalité plusieurs industries fonctionnant en mode cyclique. Nous exposons ci- dessous quelques industries où le mode de production cyclique est de plus en plus répandu, vu les avantages qu'il représente.

1.1.1. Dans l'industrie du bois

L'industrie du bois représente un secteur où la compétition est féroce. Elle est également considérée comme l'une des industries exploitant le mode de production cyclique pour atteindre ses objectifs et réaliser des gains en terme de délais de livraison et de respect des contrats. Nous pouvons citer comme exemple la *Société Okaply Industries, Québec.* [1]

1.1.2. Dans l'industrie de la pharmacie

L'industrie pharmaceutique est l'un des contextes d'application des systèmes de production cyclique. Ceci est justifié par la nature répétitive et plus ou moins stable de la demande, ce qui favorise le recours au mode cyclique.

[1] http://www.reedexpo.ca/industribois

Nous pouvons citer comme exemple, la compagnie Schering AG (Allemagne), qu'est une société pharmaceutique multinationale employant 2000 personnes et réalisant des bénéfices annuels nets de 327 millions d'euros. La compagnie exécute pour le compte des sociétés pharmaceutiques toutes les fonctions ayant pour objectifs la recherche, le développement et la production (produits chimiques, pharmaceutiques), leurs ventes et distributions.

1.1.3. Dans l'industrie de l'automobile

L'industrie de l'automobile utilise fréquemment le principe des livraisons cycliques, lequel est en voie de généralisation chez les constructeurs automobiles et les équipementiers de premier rang lorsqu'il s'agit d'approvisionner des composants à faible variété et faisant l'objet d'une demande régulière. Notons aussi, que le domaine automobile est également l'un des contextes où l'on observe, de jour en jour, le degré de compétition s'élever. Et le fait d'utiliser les techniques de production cyclique a apporté d'énormes gains tant au niveau qualité, que respect des délais et contrats.[2]

D'autres industries mettant en œuvre des programmes cycliques (répétitifs) existent et se situent tant dans un contexte d'automatisation de traitements informatiques que de production manufacturière. La mise en place de tels programmes nécessite des méthodes adéquates et bien adaptées.

Ce présent travail de recherche consiste à proposer une méthode permettant d'établir de bons plans de production cyclique. Nous consacrons la section suivante aux détails de l'objet de notre recherche.

1.2. Le problème objet de la recherche

Nous nous intéressons, dans ce travail, à une relation particulière entre clients et fournisseurs, celle fondée sur le principe des livraisons cycliques. Selon ce principe, et dans un contexte de juste à temps, le fournisseur s'engage à livrer des quantités des produits à des intervalles de temps fixes et de façon répétitive.

---

[2] *Programme Thématique de recherche Région Rhône Alpe. Rapport final* 2000 (Campagne, 2000).

Les méthodes traditionnelles de gestion d'approvisionnement, qu'il s'agisse de méthode de gestion sur consommation (gestion sur stock, Kanban) ou de gestion sur besoin (MRP), s'avèrent inadaptées dans ce contexte particulier car elles n'intègrent pas les spécificités de cette demande et n'exploite pas cette connaissance précise des fréquences de livraisons. Pour synchroniser les flux de production et de livraison, il est préférable de mettre en œuvre les systèmes de production cyclique. Ces derniers sont caractérisés par un cycle de production défini par une suite ordonnée de productions cycliques (Hacid, 2000). Il lui est associé une durée de cycle, les quantités et les dates de chaque lancement ainsi que la séquence de réalisation de ces lancements (Hacid, 2000).

De nombreux travaux ont été conduits depuis quelques années pour la mise en œuvre de systèmes de production cyclique, et l'on dispose aujourd'hui de nombreuses contributions permettant de construire, voire d'optimiser des cycles de production. Cependant, ces travaux ont été conduits dans des contextes spécifiques et reposent sur des hypothèses simplificatrices ou particulières en utilisant des critères d'optimisation différents. De plus, dans de nombreux cas, ces hypothèses simplificatrices ne permettent pas l'application de ces méthodes dans des contextes réels autres que ceux à l'origine de leur développement.

Nous nous intéressons essentiellement, dans cette étude, aux problèmes de détermination de la meilleure durée de cycle de production ainsi qu'à l'élaboration du meilleur ordonnancement (calendrier des opérations) de la production en cours de cycle minimisant les coûts de fabrication, de lancement et de stockage des différents lots de fabrication, de chacun des produit, composant le cycle de production.

Nous identifions, dans la suite de cette section le contexte de travail ainsi que les hypothèses retenues dans notre recherche. Nous considérons donc, pour la détermination de la meilleure durée de cycle de production ainsi que l'élaboration de l'ordonnancement adéquat, le cas d'un atelier de type Flow Shop pur constitué de M machines et fabricant N produits différents en quantités fixes et connues durant l'horizon de planification.
Nous énumérons dans ce qui suit l'ensemble des hypothèses que nous adoptons ici:

- Les demandes concernent seulement les produits finis;

- Le cycle de livraison de chaque produit est connu;
- Les matières premières sont fournies en temps voulu;
- Les stocks en cours de fabrication sont autorisés;
- Les stocks des produits finis et des en cours sont valorisés à leurs coûts matières premières ;
- Le coût de lancement est indépendant des plages horaires et est fixe par machine.
- Les coûts de fabrication sont connus par unité de temps et différent d'une plage horaire à une autre;
- La durée du cycle de production pour toutes les machines est identique;
- Aucune machine ne peut traiter plus d'un produit à la fois;
- Pas de préemption, autrement dit, sur une machine donnée, dès que la fabrication d'un lot commence, elle doit être terminée;
- Pas de chevauchement (un lot ne peut pas être transféré à la machine suivante jusqu'à ce qu'il soit entièrement traité);
- La même séquence est utilisée à chaque cycle;
- La fabrication est répartie sur différentes plages horaires connues;
- Un produit peut être lancé, dans un cycle de production, en plusieurs lots de quantités différentes ;
- Sur une même machine, la durée de lancement de chaque lot est considérée comme constante.

Nous supposons aussi tout au long de notre étude que :

- La capacité de production est suffisante pour répondre à la demande (ce qui assure l'existence d'au moins un plan de production faisable);
- La durée du cycle de production ne peut dépasser une valeur donnée (borne maximale);
- La durée du cycle de production de chaque produit est exprimée en nombre de semaine (multiple de la semaine);

1.3. Objectifs de la recherche

Comme cité précédemment, nous traitons dans ce présent projet de recherche, le problème de détermination de la meilleure durée de cycle de production ainsi que le meilleur ordonnancement (calendrier des opérations) lui correspondant, pour le cas d'un atelier de type Flow Shop pur. Nous résumons l'ensemble des objectifs à réaliser dans ce travail de recherche comme suit:

- Montrer que l'on peut considérer, contrairement à ce qui a été réalisé dans les travaux de recherches antérieurs, une durée de cycle de production *non multiple entier* du cycle de livraison. Rappelons que tous les travaux recensés dans la littérature considèrent uniquement le cas d'une durée de cycle de production *multiple entier* du cycle de livraison.
- Développer une nouvelle méthode pour la préparation d'un plan de production cyclique en réponse à une demande cyclique. Celle-ci doit être suffisamment rapide afin de permettre de réagir rapidement si la demande réelle diffère de la demande contractuelle. Nous visons également à en proposer des variantes;
- Démontrer l'efficacité de la méthode proposée, ainsi que ses variantes, en menant une analyse de leur performance, et les comparer à l'une des méthodes proposées dans la littérature.
- Tester ces méthodes et effectuer cette analyse en partant d'un ensemble de problèmes fictifs reproduits de façon aléatoire tout en respectant les traits caractéristiques des problèmes réels.

Chapitre 2 : Revue de la littérature

2.1. Introduction

La généralisation de l'application des principes juste à temps a entraîné une augmentation des fréquences de livraisons, et pour certains fournisseurs (en particulier équipementiers automobile), l'instauration de contrats, avec certains de leurs donneurs d'ordres, fondés sur un principe de livraison cyclique.

Cette connaissance précise des fréquences de livraisons, ainsi que des clauses contractuelles fixant les engagements réciproques des deux partenaires, ne sont pas prises en compte dans les méthodes traditionnelles de gestion des approvisionnements. L'application de ces mêmes principes de juste à temps, poussant à l'alignement des productions sur les consommations, aboutit à la mise en œuvre de système de production cyclique prenant en compte l'ensemble des engagements réciproques inscrits dans les contrats régissant ces relations.

(Campagne *et al.*, 2001a) définissent un système de production cyclique comme étant un système dans lequel la production se réalise à fréquence fixe sur une durée de cycle se répétant tout au long d'un horizon de planification. (Chauvet et *al.*, 2003) le définit comme étant un système fabricant un ensemble de produits à une fréquence constante, et dans lequel chaque ressource exécute de manière répétitive un certain nombre de tâches. De leur coté, (Hanen *et al.*, 1995) définissent un ordonnancement cyclique comme étant un ensemble fini de tâches génériques devant être exécutées de manière répétitive.

Le recours à une production cyclique dans les systèmes de production est encouragé par plusieurs facteurs. (Castro *et al.*, 2003) soulignent qu'il est profitable pour les entreprises, évoluant dans un environnement concurrentiel, pour lesquelles les demandes concernent un seul produit - ou un petit ensemble non diversifié- pour des périodes relativement longues, d'établir un ordonnancement cyclique. (Campagne *et al.*, 2001a) exposent une application de la production cyclique dans le domaine automobile, tant chez les constructeurs automobiles que chez les équipementiers de premier rang, lorsqu'il s'agit d'approvisionner des composants à faible variété et faisant l'objet d'une demande régulière.

L'objectif de la mise en place d'un ordonnancement cyclique est l'optimisation de l'utilisation des ressources. (Chauvet *et al.*, 2003) rappellent l'exigence de mettre en place un ordonnancement cyclique pour coordonner les ressources de sorte que le système fabrique des produits à une fréquence aussi élevée que possible et avec une quantité minimale des en-cours. Le problème est alors de déterminer la durée de cycle optimale et les dates de début de chaque tâche dans le cycle.

Par ailleurs, De nombreux auteurs ont mis en évidence les avantages des ordonnancements cycliques. (Loerch et *al.*, 1994) notent leur facilité de description et de compréhension, la simplification des communications dans l'atelier et de la coordination des activités de gestion des ressources humaines, de maintenance et d'approvisionnement, leur cohérence en regard des principes juste à temps lorsque la demande est cyclique.

L'étude de (Zipkin, 1991) sur plusieurs problèmes générés aléatoirement montre que le plan de production optimal est dans la majorité des cas *cyclique*. En effet, un grand nombre de travaux a été traité dans cette optique, dont l'intérêt principal réside dans le fait qu'ils abordent le problème de la réduction de complexité par le biais d'une production organisée en cycles répétitifs de production due à des appels de livraison cycliques (Hillon et *al.*, 1989 ; Korbaa et *al.*,2000).

De plus, de nombreux auteurs ont mis en évidence les points forts des plans cycliques par rapport aux plans non cycliques *(appelés aussi acycliques)*; Contrairement aux ordonnancements non cycliques, l'ordonnancement cyclique engendre un coût élevé alors que son utilisation reste justifiée par sa facilité de planification et de contrôle (Hall, 1988).

Il indique que l'intérêt de la mise en place d'un système de production cyclique réside dans la répétitivité du schéma de travail qui contribue considérablement à la qualité, à la productivité et à l'amélioration de chaque aspect des opérations de la production. L'étude de (Campbell *et al.*, 1991) montre les avantages entraînés par la mise en place d'un ordonnancement cyclique en termes de simplicité de planification, de facilité de description, de compréhension et de gestion.

Toutefois, les différents travaux de recherche dans le domaine de production cyclique ont porté sur plusieurs aspects. L'aspect représentation graphique a été étudié dans (Loos, 2001), où l'auteur souligne la simplicité de représenter un système de production cyclique avec les graphes gozinto.

Le second aspect est relatif à l'étude de la stabilité des ordonnancements cycliques, dans laquelle les chercheurs utilisent des méthodes basées sur la modélisation mathématique et la simulation. La plupart de ces travaux se sont intéressés à étudier plus particulièrement l'impact d'un aléa ou d'une perturbation de la demande sur la stabilité d'un ordonnancement cyclique. Ils visent à déterminer sous quelles conditions l'ordonnancement peut revenir assez rapidement à un état stationnaire. (McCormick et *al.*, 1994) ont étudié la stabilité des ordonnancements cycliques par rapports aux aléas et ont conclu que tant que les perturbations restent mineurs le système revient rapidement à un état stable.

D'autres recherches, dans le domaine de la production cyclique, ont porté sur l'étude de l'opportunité de la mise en œuvre d'un ordonnancement cyclique lorsque la demande est variable. Dans (Campbell, 1996), où l'auteur étudie la pertinence de mettre en œuvre un ordonnancement cyclique lorsque la demande est variable, l'auteur calcule les coûts supplémentaires résultant de la mise en œuvre d'un tel ordonnancement (coûts supplémentaires de stockage) par rapport à un ordonnancement optimal non cyclique. Les contraintes de capacités ne sont pas prises en compte. Il présente une formulation mathématique du problème et propose un algorithme pour le résoudre. Il teste par la suite les résultats et déduit que le facteur clé est le coefficient de variabilité de la demande. Il conclut que les coûts supplémentaires de stockage peuvent être modérés tant que ce facteur est modéré. En d'autres termes, ce surcoût en stockage pourrait être compensé par les multiples bénéfices qui résultent de la mise en œuvre d'un ordonnancement cyclique (stabilité du séquencement, apprentissage élevé, diminution des temps de réglages).

Cependant l'aspect le plus étudié en production cyclique, par la communauté scientifique, est le problème de détermination d'un plan de production cyclique optimal. Il consiste en la détermination d'une durée de cycle optimale et d'un ordonnancement des opérations dans ce cycle, minimisant les coûts de lancement, de stockage et de fabrication.

Dans (McCormick et *al.*, 1994) les auteurs ont étudié la complexité des problèmes d'ordonnancements cycliques, et ont montré que le problème de mise en place d'un ordonnancement cyclique optimal est NP-difficile pour le cas d'atelier Flow Shop. (Hanen, 1994) a étudié, quant à elle, la complexité de la mise en place d'un plan de production cyclique dans un atelier de type Job Shop et a démontré que ce problème est NP-difficile. D'où l'intérêt accru des heuristiques pour résoudre ce type de problèmes.

Néanmoins, les différentes recherches, dans le domaine de la production cyclique ont été menées pour divers contextes. Parmi les paramètres définissant ces contextes, nous citons le type d'ateliers considéré (mono machine, machines parallèles, Flow Shop, Job Shop,..) ou encore le nombre de produits à fabriquer.

Nous proposons dans la section suivante une classification des différents problèmes traités dans cette optique par la communauté scientifique.

2.2. Classification des problèmes traités dans la littérature

Avant de présenter les différents travaux, recensés dans la littérature, nous insistons sur les avantages, mis en évidence par plusieurs auteurs, de la production cyclique tel que leur facilité de description et de compréhension, la simplification des communications dans l'atelier et de la coordination des activités de gestion des ressources humaines, de maintenance et d'approvisionnement.

En effet de nombreux travaux ont été réalisés pour la mise en place d'une production cyclique dans différents systèmes de production. Nous proposons de décomposer l'ensemble des problèmes traités dans ce domaine en deux grandes classes et cela selon la nature de la demande, laquelle pourrait être stochastique ou déterministe (statique, dynamique ou cyclique) (voir Figure 2.1).

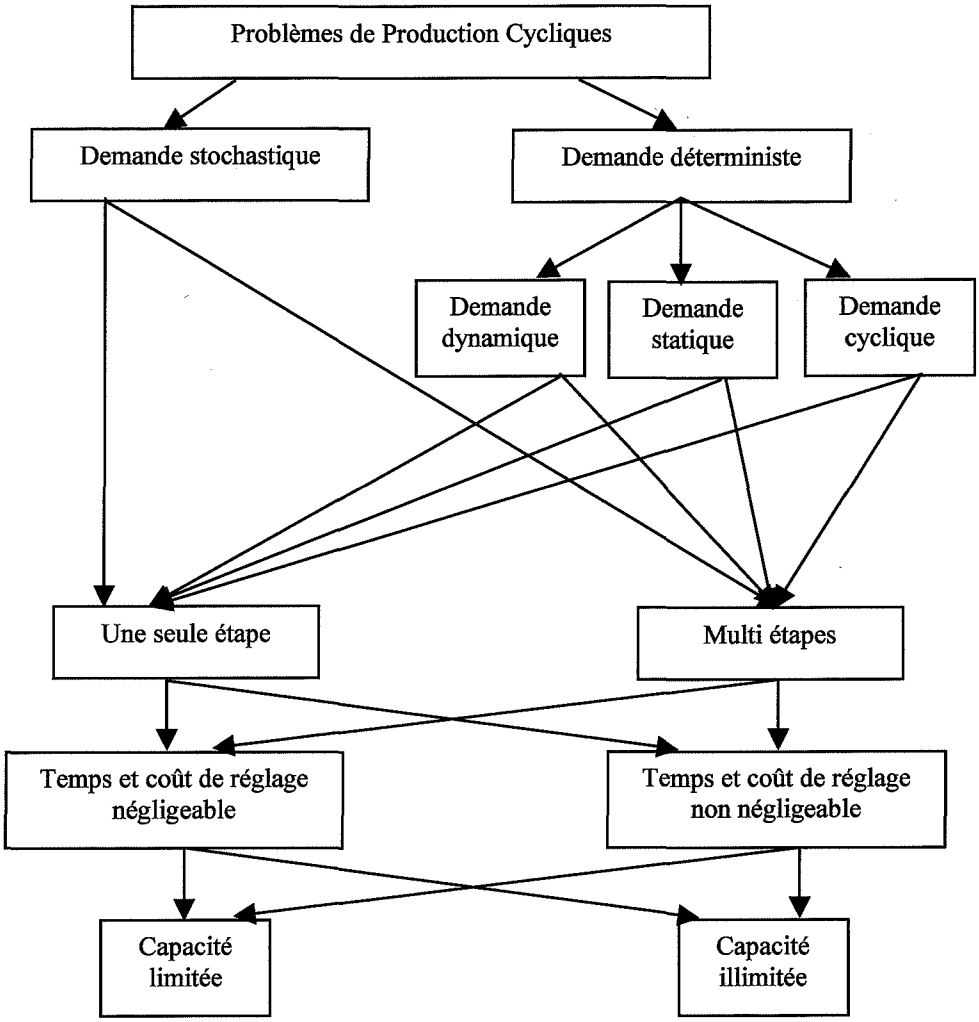


Figure 2. 1. Classification des problèmes de production cyclique

En effet, comme illustré dans Figure 2.1, de nombreux travaux traitent des problèmes où la demande est déterministe (statique ou dynamique) ou encore le cas de demande stochastique (dont on ne connaît pas la valeur au préalable).

Nous soulignons que des sous-classes peuvent bien dériver de celles-ci pour construire un second niveau de hiérarchie et exprimer le cas d'une fabrication mono ou multi-étapes, pour localiser les processus faisant appel à plusieurs ressources, chose qui rend l'étude de tels systèmes encore plus difficile. Les deux derniers niveaux de cette hiérarchie incluent la considération de la durée et le coût de lancement, soumise ou non à une limitation de capacité. Nous faisons également mention d'autres paramètres caractérisant les travaux traitant les problèmes de production cyclique, tels que la fabrication d'un seul ou de plusieurs produits.

L'étude menée par (Sarker et *al.*, 1991) a porté sur les systèmes de production, se basant sur les principes du juste à temps, en réponse à des appels de livraisons stochastiques pour un atelier fabricant plusieurs produits.
Cette étude, visant à examiner l'effet de la variance dans les systèmes de production, a montré que la réduction des lancements n'implique pas toujours la réduction des stocks et qu'en présence de variabilité dans le temps de lancement, une augmentation de l'utilisation de la machine pourrait augmenter les en-cours.

Afin de mieux cerner notre problématique, portant sur les systèmes de production cyclique et laquelle se situe dans le cadre de demandes déterministes, nous présentons dans la section suivante une analyse de la littérature, synthétisant les différents travaux de recherche recensés.

2.3. Analyse de la littérature

Comme cité précédemment, nous consacrons cette section à l'analyse des différents travaux, réalisés dans la littérature, traitant des problèmes de production cyclique dont les appels de livraisons sont déterministes. Nous commençons d'abord par les différents travaux traitant d'une demande déterministe statique, et exposons par la suite ceux concernant une demande déterministe dynamique pour terminer, cette analyse de la littérature, par les différents travaux étudiant le cas de demande déterministe cyclique.

2.3.1. Cas d'une demande déterministe statique

Plusieurs travaux ont été réalisés, dans le cadre d'une consommation constante et continue, pour différentes structures de systèmes de production, à compter du niveau mono-étape, utilisant une ou plusieurs ressources, au niveau multi-étapes composé de plusieurs ressources.

Bhaba et autres (Bhaba et al., 1996) ont abordé, pour le cas de fabrication d'un seul produit, le problème de détermination d'une politique d'approvisionnement en matières premières, optimale tout en déterminant la fréquence de commande ainsi que la grandeur du lot optimal du produit fini. Ceci en s'assurant que la production soit suffisante pour répondre et satisfaire exactement la demande d'un cycle donné. Cette étude, et dans l'optique de diminuer le coût

de stockage, encourage à commander plusieurs fois durant un cycle. Afin de démontrer l'effet du coût de lancement (réglage) sur le coût total d'un système de stock, les auteurs de cette contribution présentent un scénario de pire cas ainsi que son analyse.

Par ailleurs, les auteurs de (Aldakhilallah et *al.*, 2001) se sont intéressés, dans le cas de fabrication d'un seul produit, à la détermination d'un cycle réalisable tout en minimisant sa durée et la durée totale écoulée dans le système pour une unité de produit jusqu'à l'accomplissement de sa production.
Deux heuristiques ont été proposées, pour résoudre ce problème, dont chacune considère une production répétitive en Job Shop avec des séquences de production prédéterminées pour un seul produit, en ayant une connaissance préalable des durées de lancement ainsi que des durées de fabrication. Ces heuristiques ont été testées et leurs performances ont été évaluées.

Cependant, le cas de fabrication de plusieurs produits, fabricant des familles de produits de types différents en une ou plusieurs étapes, est le plus étudié dans la littérature vu le nombre de problèmes traités dans l'industrie. On constatera que plusieurs chercheurs se sont intéressés à cette catégorie de problèmes.

En effet, plusieurs travaux ont été réalisés pour la détermination de la durée du cycle et de la séquence de production optimale dans le cadre de consommation constante et continue, sur un horizon infini, pour différentes structures de systèmes de production, allant du cas de systèmes mono-niveau composés d'une ou plusieurs ressources au cas de systèmes multi-niveaux composés de plusieurs ressources avec une organisation plus ou moins complexe: ateliers mono-gamme, ateliers multi-gammes (Flow Shop, Job Shop). Nous recensons ci-après quelques uns de ces travaux.

Le problème de détermination du cycle de production dans le cas d'un système mono-étape, fabricant plusieurs produits, soumis à une demande statique est connu sous le nom Commun Cycle Scheduling Problem. Il consiste à déterminer le cycle de production pour chaque produit permettant de minimiser le coût composé des coûts de lancement et de stockage.

Plusieurs variantes de modèles de ce problème, avec des hypothèses bien définies, ont été proposées dans la littérature. (Boctor, 1988) et (El-maghraby, 1978) ont proposé des modèles imposant que le cycle de production de chaque produit soit multiple entier d'une période de base et les lots associés à chaque produit sont fixes et identiques.
La formulation adoptée par (Karmarkar et *al.*, 1989 ; Zipkin, 1991) consiste à choisir un temps de cycle T durant lequel les produits peuvent être fabriqués plusieurs fois et dans différentes quantités.

Le problème d'ordonnancement des lots pour un nombre de produits fabriqués en plusieurs étapes a attiré l'attention d'un grand nombre de chercheurs. En effet, les auteurs dans (Havale et *al.*, 1978) considèrent cette problématique dans le but de minimiser les coûts de stocks, les coûts relatifs aux heures supplémentaires de travail et les coûts associés aux ressources. Le modèle développé dans cette contribution pénalise les heures supplémentaires ou le temps mort des machines.

Les auteurs précisent que le fait de limiter la durée de production et interdire les ruptures des stocks représente en quelques sortes des restrictions qui pourraient rendre une solution optimale obtenue à partir d'un coût minimisé non réalisable. La solution optimale est alors celle qui non seulement réduit les coûts mais aussi donne des tailles de lots réalisables.

Sous l'hypothèse d'une demande constante, la solution du problème d'ordonnancement est cyclique. En utilisant l'approche par "cycle commun", ce problème a été formulé comme un problème d'optimisation conjointe des dates de fabrication et des quantités à fabriquer pour les différents produits.

Notons que les auteurs dans (Hsu et *al.*, 1990) ont proposé une extension du modèle de (Szendrovits, 1975), ils ont aussi étudié la généralisation du CCSP (cyclic commun scheduling problem), le problème de planification en cycle commun au cas d'un système multi-étapes (Hsu et *al.*, 90), le problème du CCSP consiste en la détermination des tailles des lots, de production, optimaux et un cycle de production commun pour un ensemble de produits partageant une ressource unique.

De plus, en supposant le cycle commun pour tous les produits (El-Najdawi et *al.*, 1993) ont proposé une formulation mathématique, laquelle permet la détermination de la taille des lots et l'ordonnancement pour une séquence de production donnée.

Enfin (El-Najdawi, 1994) a supposé que les durées de cycles sont des multiples de nombre entiers d'une période de base et a proposé une procédure de résolution appelée *«The Job Splitting Heuristic»*, basée sur la transformation du problème du niveau multi-étapes au niveau mono-étape. Une application réussie de cette approche est présentée dans (El-Najdawi, 1997).

(Hennet, 2001) introduit le problème d'organisation de la production des systèmes manufacturiers fabricant des familles de produits, à travers des traitements et des étapes d'assemblage, et reprend les techniques de l'approche du cycle commun traitées dans la littérature afin de minimiser la somme des coûts de lancements (réglages), et des coûts de fabrication sous les contraintes de satisfaction du taux de demande.

(Hennet, 2001) prouve que le problème connu sous le nom CELSP *« Cyclic Economic lot Scheduling Problem »* peut être résolu en le décomposant en plusieurs étapes, le problème d'ordonnancement normalisé est premièrement résolu, par la suite, la valeur optimale pour la période est calculée par une formule explicite. La solution peut être facilement implémentée et ajustée par des variations aléatoires liées aux demandes.

Notons aussi que quelques considérations de conditions suffisantes d'optimalité du CC « cycle commun » ont été établies dans (Gallego, 1990).

Une autre heuristique pour résoudre le problème d'ordonnancement des lots pour un nombre de produits fabriqués en plusieurs étapes dans un Flow Shop, dont le but est de réduire au minimum la somme des coûts de lancement et de stockage (produits en-cours et finis), a été développée par (Ouenniche et *al.*, 2001a).

Les auteurs supposent que la capacité de production est suffisante pour répondre à la demande totale (ce qui assure l'existence d'au moins un ordonnancement faisable) et que les produits sont fabriqués d'une manière répétitive de façon à ce que les mêmes quantités du même produit soient fabriquées à des intervalles de temps fixes.

Cette heuristique appelée *« G-groupes »*, considère explicitement des conditions de capacité et garantit la faisabilité des plans de productions obtenus. L'heuristique *« G-Groupes »* procède comme suit:

- Divise l'ensemble des produits en G groupes
- Pour chaque groupe, donne le cycle (la durée de cycle de chaque groupe est limitée pour être un multiple entier d'une période de base, les produits à fabriquer ainsi que leur ordre de fabrication, pour chaque période de base du cycle global sont choisis)
- Un programme non linéaire est résolu pour déterminer la taille des lots et construire un plan de production faisable.

Concernant l'évaluation de la performance de cette méthode proposée *«G-Groupes»* laquelle constitue une généralisation de la méthode des deux groupes (Ouenniche et *al.*, 1999), elle a été approuvée dans (Ouenniche et *al.*, 2001a) après avoir été comparée à quatre autres méthodes:

- Méthode de cycle commun (El-Najdawi, 1993).
- Une version renforcée de la méthode *« Job Splitting Heuristic »* (El-Najdawi, 1994)
- Méthode des deux groupes (l'ensemble des produits est divisé seulement en deux groupes) (Ouenniche et *al.*, 1999).
- Power of Two Method, cette méthode exige que les différentes durées de cycles soient des multiples entiers d'une période de base et limite ces multiples à une puissance de deux.

Des résultats numériques ont été donnés dans cette étude et ont prouvé que la méthode *« G-Groupes »* surpasse les quatre méthodes auxquelles elle a été comparée.

Les auteurs dans (Pinto et *al.*, 1994) considèrent simultanément le problème de dimensionnement des installations de production continues et de détermination du cycle et de

la séquence de production optimaux des produits réalisés dans un contexte de demande constante et continue sur un horizon infini.

Par ailleurs, de nombreux travaux traitent de la construction de cycles de production effectuée à moyen terme sur la base de demandes moyennes, ils visent à proposer une réponse simultanée, à des fins d'optimisation, aux trois questions suivantes :

- Quelle politique de lotissement pour chaque produit?
- Quelle durée de cycle de production retenir pour une unité de production réalisant plusieurs produits?
- Quel ordonnancement à capacité finie (après ou non ajustement de cette capacité)?

En outre, (Tunasar et *al.*, 2001) abordent le problème ELSP *« Economic lot Scheduling Problem »* lequel vise à trouver des durées de cycles admissibles T_1, T_2,...T_N pour que le coût moyen de la production des N produits par unité de temps soit minimisé sur un horizon infini.
Cette étude repose sur une demande statique et déterministe et des taux de lancements, de production, et taux de demande différents pour chaque produit. Les coûts associés aux lancements et aux stocks pour chaque produit sont aussi supposés être différents.

Ce problème classique de planification a été étudié intensivement et diverses heuristiques ont été proposées dont la plupart sont basées sur le concept de période de base.
L'inconvénient commun de la majorité de ces heuristiques réside dans le manque de mécanisme algorithmique pour développer des solutions réalisables.

Ils proposent alors une nouvelle technique efficace de calcul pour ce problème, nommée *« Local Expansion Search (LES) »*, basée sur un algorithme de programmation évolutionnaire de recherches dirigées.

Cette approche autorise, dans un premier temps, des solutions irréalisables dans toute la recherche sous réserve de les expulser par la suite de l'espace de recherche en adoptant un mécanisme standard de pénalité. Cette technique combine les deux objectifs du coût minimum et de la faisabilité. Elle parcourt en partant d'une population initiale le domaine des

solutions tout en permettant les solutions irréalisables de toute la recherche. Cette approche converge rapidement à une solution réalisable de coût minimum à l'aide d'une fonction qui pénalise les solutions irréalisables.

2.3.2. Cas d'une demande dynamique

Étant donné les avantages d'une production cyclique, les auteurs ont élargi son champ d'application aux cas de systèmes à demande dynamique.

(Campbell, 1996) a montré que le coefficient de la variation de la demande est le facteur clé affectant la somme des coûts de l'ordonnancement cyclique (*l'accroissement de la variabilité de la demande implique une augmentation des coûts en ordonnancement cyclique).* Il compare ainsi dans sa contribution, sans prendre en compte les contraintes de capacité, les systèmes de production cycliques et non cycliques et montre qu'en présence d'une demande dynamique, même si les ordonnancements cycliques conduisent à un coût total plus élevé par rapport aux ordonnancements non cycliques, ils restent toujours préférés dans la pratique.

(Hall, 1988) note que, contrairement aux ordonnancements non cycliques, permettant d'avoir des intervalles de commandes de différentes longueurs à l'intérieur de l'horizon de planification (chose qui les rend plus flexibles et de plus bas coût par rapport aux ordonnancements cycliques), l'ordonnancement cyclique est caractérisé par un nombre fixe de périodes entre les demandes de chaque produit. Il cause un coût élevé mais son utilisation est justifiée par sa facilité de planification et de contrôle.

(Harish et *al.*, 1984) traitent le problème d'ordonnancement cyclique, pour le cas de demande déterministe dynamique, minimisant les temps de lancements, les stocks, les coûts relatifs aux heures supplémentaires et les coûts de changement du personnel, tout en introduisant des contraintes de capacités sur plusieurs machines. Ils proposent une heuristique qui résout le problème et qui est capable de satisfaire des contraintes de capacité lors de la sélection des grandeurs des lots.

Dans (Kim et *al.*, 1995), les auteurs considèrent, pour un atelier fabricant plusieurs produits en réponse à des demandes dynamiques, le problème de détermination des tailles des lots et

leur sequencement à capacité limitée par une ressource goulet. En prenant en compte les temps de lancements et de stockage, ils se sont fixés comme objectif celui de minimiser le coût total de stockage sur un horizon infini de planification, tout en satisfaisant une demande variable au cours du temps.

2.3.3. Le cas d'une demande cyclique et déterministe

Les travaux réalisés dans ce contexte sont peu nombreux et visent la recherche du cycle de production pour satisfaire une demande s'exprimant sous la forme d'une livraison cyclique.

Dans (Bahroun, 2000) l'auteur étudie le problème de détermination d'un cycle de production pour une unité de production réalisant plusieurs produits soumis à une livraison cyclique. L'auteur propose une architecture de trois niveaux pour la supervision de tels systèmes de production cycliques : le long, le moyen et le court terme. Il définit ces différents niveaux comme suit :

a. Long terme

Les décisions prises à ce niveau traduisent la politique générale de l'entreprise sur un horizon relativement important, généralement l'année. Celle-ci doit s'assurer, avant la signature d'un contrat, de sa capacité à répondre aux engagements pris, en terme de quantités et de délais, ainsi que la rentabilité économique de ce contrat. Elle doit également être capable d'évaluer les conséquences des différentes clauses et disposer des bases nécessaires pour conduire la négociation dudit contrat.

(Bahroun, 2000) propose, en conséquence, que la méthode de gestion de production puisse s'appuyer, à ce niveau, sur un ensemble d'outils d'aide à la négociation. En effet, en fonction d'un état de charge, l'on doit être capable d'étudier l'opportunité d'un nouveau contrat et les conditions favorables à son exécution.

b. Moyen terme

L'entreprise se situe, à ce niveau, dans le cadre d'engagements contractuels pris, et doit assurer la livraison des quantités moyennes de produits à fréquences fixes. Il s'agit de dégager les réponses aux questions : que produire ? Quand produire ? Combien produire ? Comment produire ?

Ainsi la méthode de gestion de production requise doit pouvoir aider à déterminer sur la base des demandes prévisionnelles moyennes, et pour le moindre coût, un cycle de production ainsi que les fréquences de fabrication pour chaque produit dans ce cycle. Un ordonnancement cyclique doit être construit à partir de ces fréquences de fabrication de façon à garantir la continuité des livraisons de chaque produit. De là, l'atelier dispose de l'enchaînement détaillé de l'ensemble des produits sur les différentes machines, lequel sera stable et répété définitivement jusqu'à ce que l'évolution de la demande nécessite le re-calcul d'un nouvel enchaînement.
Dans le cas où l'entreprise doit répondre en parallèle à des appels de livraison externes pour quelques produits, la méthode de gestion de production devra réserver la capacité nécessaire dans la séquence de production.

c. Court terme

Les décisions prises à ce niveau régissent en détail la fabrication proprement dite pour les jours et les semaines à venir. La méthode de gestion de production doit adapter, à ce niveau, l'ordonnancement construit au niveau moyen terme afin de prendre en compte les variations autour de la demande moyenne et de prévoir des stocks de sécurité à mettre en place pour pallier ces variations de la demande. Elle doit aussi ajuster les quantités définitives lancées en production en fonction des quantités définitives de livraison, de même qu'elle doit ajuster les capacités disponibles en fonction de la charge effective et ceci au moindre coût. Le cas échéant la capacité réservée au niveau moyen terme sera exploitée pour fabriquer des produits faisant l'objet d'un appel de livraison externe.

Par ailleurs, (Bahroun, 2000) a considéré dans son travail de recherche, le cas d'une installation de production réalisant plusieurs produits soumis à une livraison cyclique avec un cycle de livraison et des quantités de livraison variables au cours du cycle. Il identifie deux cas prenant en compte le rapport entre les coûts de stockage et les coûts de lancements.

Dans le premier cas, il suppose que les produits fabriqués ont des coûts de stockage faibles par rapport aux coûts de lancements, chose qui l'incite à stocker et à effectuer un faible nombre de lancements. Le second cas porte sur des produits qui possèdent des coûts de

stockage élevés par rapport aux coûts de lancements, chose qui incite à ne pas stocker et de lancer un nombre plus important d'ordres de fabrication en atelier.

(Hacid, 2000) a traité le problème de détermination des cycles de production à capacité finie sur un ensemble de chaîne d'approvisionnement fabricant des produits soumis à des demandes cycliques. La particularité de cette étude par rapport à d'autres est qu'elle impose au cycle de production d'être un multiple entier du cycle de livraison, et qu'elle limite sa durée en regard de la durée des cycles de livraison.

L'approche proposée procède, comme le montre Figure 2.2, en trois étapes :

- La première étape consiste à calculer pour chaque produit les groupages optimaux pour chaque cycle de production admissible en minimisant le coût de gestion total de ce cycle;
- La seconde étape consiste à déterminer un cycle de production unique pour l'ensemble des produits;
- La dernière étape consiste à synchroniser ce cycle de production en regard du cycle de livraison.

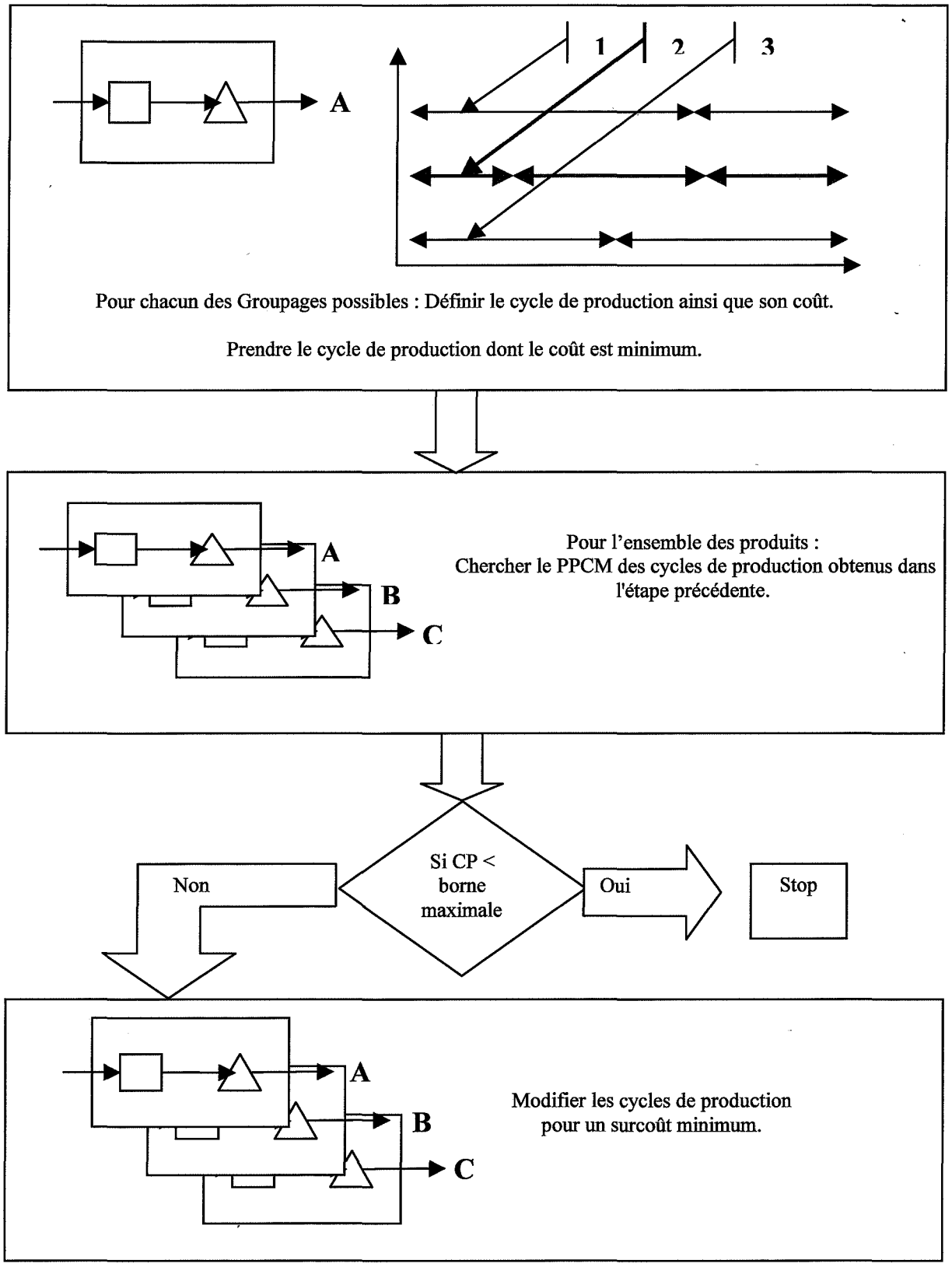


Figure 2. 2.Grands axes de la méthode de détermination des cycles de production

2.4. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à l'exposé d'une synthèse des travaux, recensés dans la littérature, et traitant des problèmes de production cyclique. Nous avons proposé une classification des différents problèmes existants selon plusieurs critères. Nous avons également présenté une analyse de la littérature pour les problèmes traitant de la production cyclique pour le cas où les demandes sont déterministes.

De plus, nous avons montré, en se basant sur diverses contributions, que plusieurs heuristiques ont été conçues afin de trouver des solutions faisables aux problèmes associés à ce type de production. Certaines d'entre elles sont plus performantes que d'autres. Cependant, il est clair qu'il est encore possible de développer des méthodes plus performantes. Ce que nous proposons de faire.

Rappelons que notre problématique de recherche concerne la détermination des plans de production cycliques, pour un atelier de type Flow shop pur, fabricant plusieurs produits pour lesquels les appels de livraisons sont de nature déterministe cyclique.

Nous consacrons le chapitre suivant à l'exposé des approches que l'on propose.

Chapitre 3 : Approches proposées

Introduction

Notre travail consiste en l'évaluation et la mise en œuvre d'un plan de production cyclique, pour un atelier de type Flow Shop pur fabricant plusieurs produits, lorsque les appels de livraisons sont cycliques. Nous supposons connus les cycles de livraison des produits et proposons une nouvelle méthode déterminant, à base de ces derniers, un plan de production cyclique minimisant les coûts de lancements, de stockage et les coûts de fabrication.

Avant d'exposer les approches que l'on propose pour la résolution de ce problème de détermination d'un plan de production cyclique à moindre coût, nous rappelons les hypothèses que l'on pose :

- Les demandes concernent seulement les produits finis;
- Le cycle de livraison de chaque produit est connu;
- Les matières premières sont fournies en temps voulu;
- Les stocks en cours de fabrication sont autorisés;
- Les stocks des produits finis et des en cours sont valorisés à leurs coûts matières premières ;
- Le coût de lancement est indépendant des plages horaires et est fixe par machine.
- Les coûts de fabrication sont connus par unité de temps et différents d'une plage horaire à une autre;
- La durée du cycle de production pour toutes les machines est identique;
- La quantité produite est égale à la quantité requise par chaque cycle;
- Aucune machine ne peut traiter plus d'un produit à la fois;
- Pas de préemption, autrement dit, sur une machine donnée, dès que la fabrication d'un lot commence, elle doit être terminée;
- Pas de chevauchement (un lot ne peut pas être transféré à la machine suivante jusqu'à ce qu'il soit entièrement traité);
- La même séquence est utilisée à chaque cycle;
- La fabrication est répartie sur différentes plages horaires connues;
- Le lancement des produits se fait par lots de quantités différentes;
- Sur une même machine, la durée de lancement de chaque lot est considérée comme constante.

Nous supposons aussi tout au long de notre étude que :

- La capacité de production est suffisante pour répondre à la demande (ce qui assure l'existence d'au moins un plan de production faisable);
- La durée du cycle de production ne peut dépasser une valeur donnée (borne maximale);
- La durée du cycle de production de chaque produit est multiple de la semaine.

En considérant ces différentes hypothèses nous proposons, dans ce qui suit, une approche, composée de différentes étapes, dont l'objectif est la détermination d'un bon plan de production. Nous proposons également quatre variantes dérivant de cette approche. Nous exposons dans un premier temps le cadre général de cette approche ainsi que ses variantes, pour détailler par la suite ses différentes étapes.

3.1. Cadre général de l'approche proposée

Afin de résoudre notre problème nous proposons, dans ce qui suit, une approche procédant en plusieurs étapes. Nous exposons, dans un premier temps le procédé général de cette approche, pour détailler par la suite chacune de ses étapes.

La première étape consiste à déterminer la durée maximale réalisable du cycle de production. Celle-ci est le minimum du plus petit commun multiple des durées des cycles de livraisons des produits et la durée maximale imposée par le planificateur.
La seconde étape consiste en la détermination des quantités à fabriquer de chaque produit. Lorsque la durée du cycle de production est un multiple entier de la durée du cycle de livraison du produit, les quantités à lancer pour chaque période seront égales aux quantités à livrer. Dans le cas où la durée du cycle de production n'est pas un multiple entier de la durée de cycle de livraison du produit, les quantités à fabriquer par période seront déterminées par la résolution d'un modèle mathématique linéaire visant à minimiser les stocks.

La troisième étape consiste à vérifier une condition nécessaire et suffisante pour l'existence d'un plan de production réalisable. Si la condition nécessaire et suffisante est vérifiée, nous

procédons dans la quatrième étape à la détermination des séquences de lancement des quantités à fabriquer minimisant le temps des séjours des produits sur les machines.

Nous procédons dans la cinquième étape à l'ordonnancement des quantités à fabriquer selon les séquences déterminées. La sixième étape quant à elle consiste en l'amélioration du plan de production en effectuant plusieurs actions d'améliorations.

Avant de présenter plus en détails les différentes étapes composant notre approche, nous considérons les natations suivantes :

- M : nombre de machines ;
- j : indice machine ;
- N : nombre de produits ;
- i : indice produit ;
- t : indice période (journée) ;
- T : durée du cycle de production ;
- $B_{\max}$: borne maximale autorisée de la durée du cycle de production (exprimée en nombre de semaines) ;
- $T_{\max}$: durée maximale du cycle souhaitable (exprimée en nombre de semaines);
- L_i : durée du cycle de livraison du produit i (exprimée en nombre de semaines);
- d_{it} : quantités à livrer du produit i à la période t ;
- I_{it} : stock du produit i à la fin de la période t ;
- S_j : temps de réglage de la machine j (exprimé en minutes) ;
- CL_j : coûts de lancements de la machine j ;
- CS_i : coûts de stockage du produit i par unité de temps ;
- CF_{lj} : coûts de fabrication de la machine j à la l éme tranche horaire ;
- p_{ij} : temps opératoires du produit i sur la machine j (exprimé en minute).

L'organigramme illustré par la figure suivante synthétise ces principales étapes :

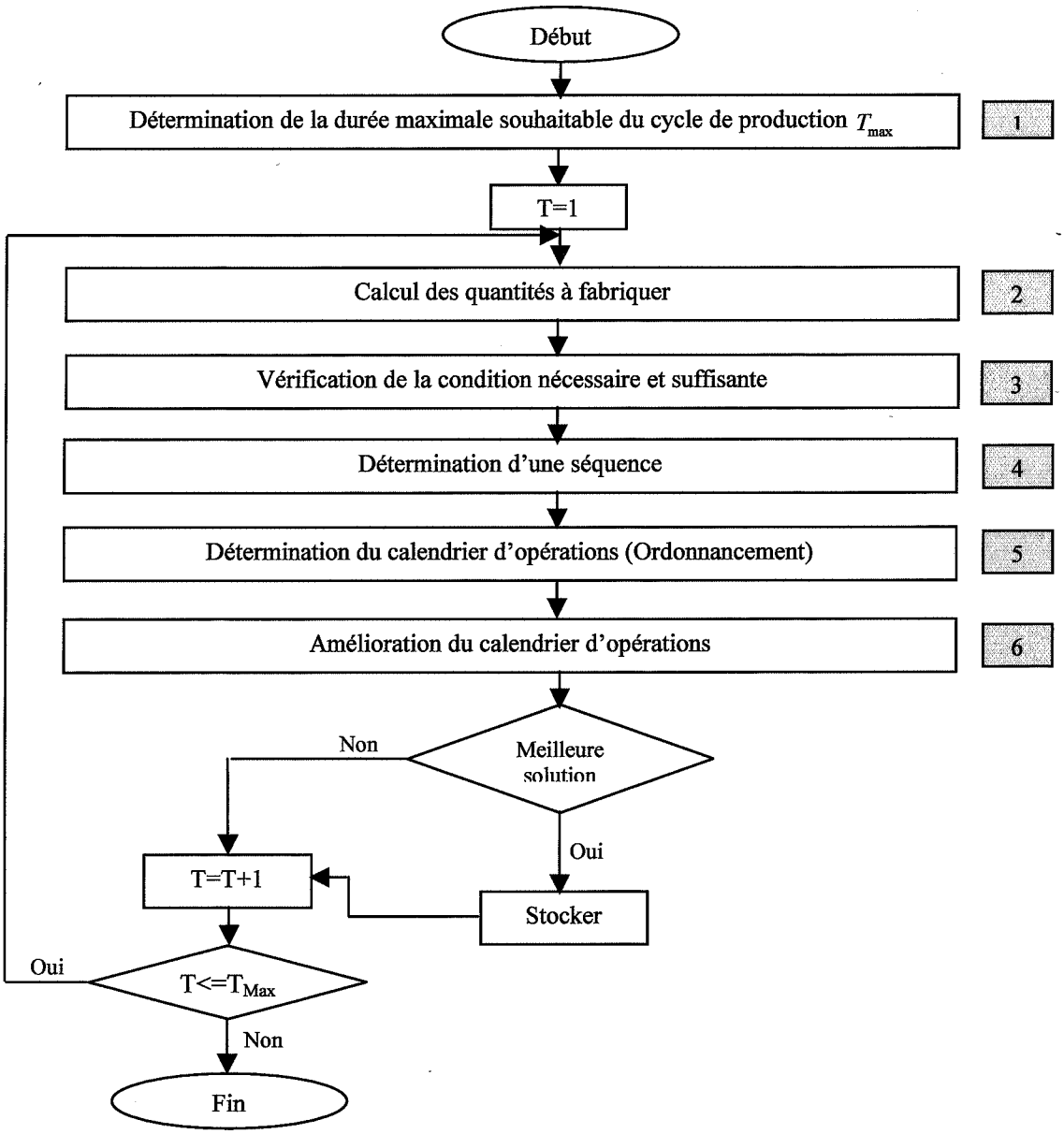


Figure 3. 1. Organigramme de l'approche globale déterminant le calendrier des opérations

3.2. Détermination de la durée maximale du cycle de production

Cette étape consiste à déterminer la durée maximale souhaitable du cycle de production exprimée en nombre de semaines. Celle-ci sera définie comme étant le minimum entre le Plus Petit Commun Multiple (PPCM) des durées des cycles de livraison des produits i et la borne $B_{\max}$ la limitant et laquelle est fixée au préalable par le planificateur. En effet, la durée du cycle de production doit être limitée en regard de la durée de cycle de livraison car l'intérêt du mode de production cyclique est lié à la répétitivité du cycle de production et l'allongement de sa durée supprime cet intérêt (Hacid, 2000).

Autrement dit :

$$T_{\max} = \min \{ B_{\max}, \text{PPCM}(L_i),\ i = 1...N, \text{ Où}$$

- $B_{\max}$: borne maximale de la durée du cycle de production fixée par le planificateur, exprimée en nombre de semaines;
- L_i : durée du cycle de livraison du produit i exprimée en nombre de semaines.

3.3. Calcul des quantités à fabriquer

Cette étape consiste à calculer les quantités de chaque produit i à fabriquer pour chaque période t constituant le cycle de production tout en respectant son calendrier de livraison. Dans le but de synchroniser les flux de production à ceux des livraisons et minimiser les stocks, les quantités lancées de chaque produit pour chaque période seront *égales, ou les plus proches possibles des quantités demandées.*

Nous distinguons deux cas différents quant au calcul de ces quantités à fabriquer des produits. Ces deux cas sont les suivants :

3.3.1. Cas où le cycle de production est un multiple entier des cycles de livraison

Dans ce cas, la quantité à fabriquer du produit i pour chacune des périodes t constituant le cycle de production sera *exactement égale* à sa quantité demandée pour cette même période (principe Juste à Temps). On aura seulement à répéter le cycle de livraison de ce produit autant de fois que nécessaire pour constituer la durée totale du cycle de production.

Exemple

Nous considérons dans cet exemple deux produits P_1 et P_2 dont les durées des cycles de livraison pour chacun des deux est d'une semaine. Ceci est donné par la table ci après:

	Lundi	*Mardi*	*Mercredi*	*Jeudi*	*Vendredi*	*Samedi*	*Dimanche*
P_1	*20*	*50*	*90*	*0*	*30*	*0*	*0*
P_2	*35*	*76*	*0*	*0*	*45*	*0*	*0*

TAB.3. 1. Exemple de cycles de livraison de deux produits P_1 et P_2

Pour une durée de cycle de production égale à deux semaines (cycle de production *multiple entier* du cycle de livraison), la quantité à lancer de chacun des produits pour chacune des périodes est exactement égale à la quantité demandée pour cette même période.

Ceci se traduit par la table ci-dessous :

	L	*M*	*Mer*	*J*	*V*	*S*	*D*	*L*	*M*	*Mer*	*J*	*V*	*S*	*D*
P_1	*20*	*50*	*90*	*0*	*30*	*0*	*0*	*20*	*50*	*90*	*0*	*30*	*0*	*0*
P_2	*35*	*76*	*0*	*0*	*45*	*0*	*0*	*35*	*76*	*0*	*0*	*45*	*0*	*0*

TAB.3. 2. Cycle de production des deux produits P_1 et P_2

3.3.2. Cas où le cycle de production n'est pas un multiple entier de tous les cycles de livraison

Dans ce cas, la quantité à fabriquer du produit i pour chacune des périodes t constituant le cycle de production sera *la plus proche possible* de sa quantité demandée pour cette même période.

Avant de procéder au calcul de ces quantités, nous commençons d'abord par un exemple traitant le cas d'un produit dont la durée du cycle de livraison est de deux semaines et la durée du cycle de production est de trois semaines.

	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
P	40	0	0	70	50	0	0	50	40	0	30	30	0	0	40	0	0	70	50	0	0	50	40	0	30	30	0	0

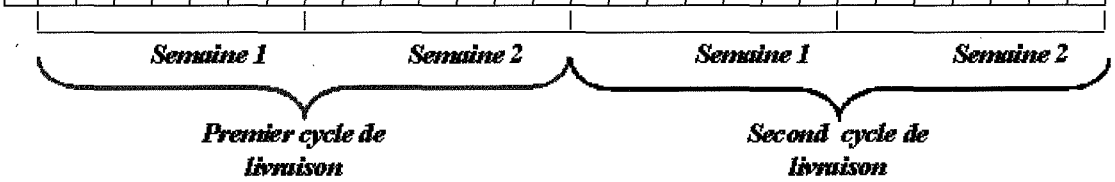
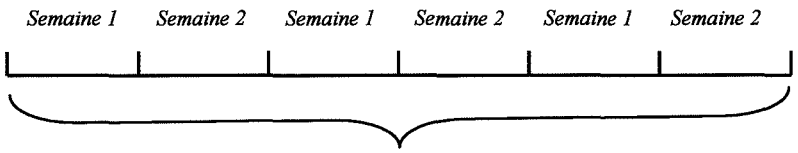


Figure 3. 2. Exemple de deux cycles de livraison consécutifs d'un produit *P*

Comme le montre la Figure 3.2. nous ne pouvons plus lancer les mêmes quantités que celles demandées. En effet, si l'on prend les deux cycles de production consécutifs (de trois semaines), le premier cycle va répondre dans l'ordre aux semaines *1,2 et semaine 1* du cycle de livraison alors que le second cycle de production va répondre dans l'ordre aux semaines *2,1 et semaine 2* du cycle de livraison. Autrement dit, les quantités à livrer peuvent différer d'un cycle de production à un autre.

Nous proposons alors de prendre un horizon de calcul *H* (exprimé en nombre de semaines) sur lequel se fera le calcul des quantités à lancer, celui-ci sera égal au plus petit commun multiple PPCM (Cycle de production, cycle de livraison du produit *i*)



H=PPCM(Cycle de production, Cycle de livraison)

Figure 3. 3. Détermination de l'horizon de calcul des quantités à fabriquer

Dans l'optique de minimiser les stocks, nous procédons au calcul des quantités à lancer de chaque produit, pour chaque période de sorte à ce qu'elles soient les plus proches possibles de celles demandées. Ce calcul des quantités à fabriquer se fera par la résolution d'un modèle mathématique linéaire.

Formulation mathématique

Avant d'énoncer le modèle, nous exposons ci dessous la notation que l'on utilise :

t : Période;

T : Durée du cycle de production (exprimé en nombre de semaines);

L : Durée du cycle de livraison (exprimé en nombre de semaines);

H : Horizon de calcul (exprimé en nombre de semaines) $= PPCM(T, L)$;

I_0 : Stock initial;

I_t : Stock en fin de période t (t :1,...7H)

d_t : Demande de la période t (t :1,...7L) ;

X_t : Quantité à fabriquer pour la période t (t :1,...7T);

Ainsi le modèle s'écrit comme suit :

$$Min \sum_{t=1}^{H*7} I_t \tag{3.1}$$

$$I_{H*7} = I_0 \tag{3.2}$$

$$I_{t-1+7kT} + X_t - I_{t+7kT} = d_{t+7kT \bmod (L)}, \; t = 1...T*7, k = 0...\frac{H}{T} - 1 \tag{3.3}$$

$$X_t \geq 0 \qquad , \; t = 1...T*7 \tag{3.4}$$

$$I_t \geq 0 \qquad , \; t = 1...H*7 \tag{3.5}$$

La fonction objectif (3.1) minimise les stocks sur tout l'horizon de calcul H. L'équation (3.2) impose au stock en début de l'horizon d'être égal au stock en fin de cet horizon. L'évolution des stocks en fonction des quantités à fabriquer est exprimée dans l'équation (3.3). Celle-ci garantit la cyclicité, car les quantités à fabriquer son calculées seulement sur le cycle de production T. Les contraintes (3.4) et (3.5) représentent respectivement les contraintes d'intégrité des quantités à fabriquer et des stocks.

La Figure 3.5 donne les quantités à fabriquer telles que déterminées par ce modèle pour un exemple numérique où L=2 et T=3.

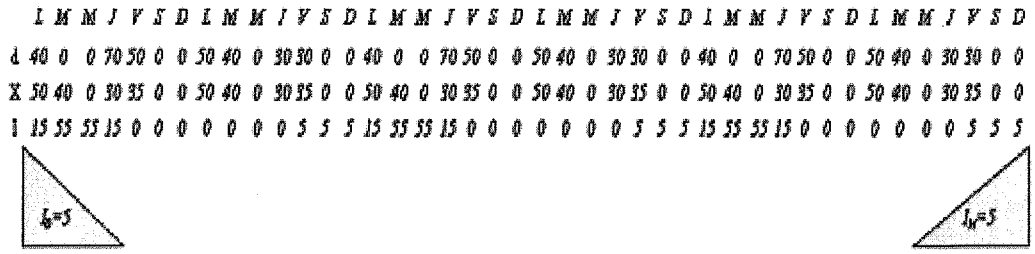


Figure 3. 4. Quantités à fabriquer sur l'horizon de calcul

3.4. Condition nécessaire et suffisante de réalisabilité

Une fois les quantités à fabriquer de chaque produit pour chacune des périodes calculée (étape 3.3), et afin d'éviter la construction d'un plan de production a priori non réalisable (durée totale de séjour des produits dans l'une des machines dépasse la durée de cycle de production considérée), il est nécessaire de considérer la condition nécessaire et suffisante que l'on propose.

Cette section énonce cette condition nécessaire et suffisante pour l'obtention d'une solution réalisable pour le problème de détermination d'un calendrier d'opérations cyclique pour un atelier de type Flow Shop pur. Pour en faire la démonstration, nous utilisons les notations suivantes:

k : Indice du lot;

j : Indice de la machine;

T : Durée du cycle de production;

K : Nombre total de lots d'un cycle, pour tous les produits réalisés lors de ce cycle;

D_k : Date de livraison du lot k ;

S_j : Temps de réglage (lancement) de la machine j ;

p_{kj} : Temps opératoire du lot k sur la machine j ;

d_{kj} : Date de début de fabrication du lot k sur la machine j ;

f_{kj} : Date de fin de fabrication du lot k sur la machine j ;

Proposition

Il est toujours possible d'établir un calendrier d'opération cyclique réalisable pour la fabrication de K lots dans un atelier de type Flow Shop pur dont les temps opératoires sont p_{kj} ***si et seulement si*** $\forall j, \sum_{k=1}^{K} p_{kj} + K * s_j \leq T$

Démonstration

Nous présentons dans cette section la preuve de la condition nécessaire et suffisante de réalisabilité du calendrier d'opérations.

- **Condition nécessaire** : Pour qu'un plan d'opérations soit réalisable, il faut que la somme des durées des opérations de tous les lots et de leurs durées de lancements sur chacune des machines soit inférieure ou égale à la durée du cycle de production, c'est-à-dire : si $\forall j, \sum_{k=1}^{K} p_{kj} + K * s_j \leq T$.

- **Condition suffisante :** car si la condition est satisfaite, on peut toujours établir un calendrier réalisable qui consiste à assimiler la date de fin du dernier lot sur la dernière machine à la date zéro (voir Figure 3.6). Cela nous garantit le respect de toutes les dates de livraisons.

Pour le reste des machines nous procédons comme suit: nous assimilons la date de fin du dernier lot sur la machine j avec la date de début du premier lot sur la machine $j+1$.

1. Pour la dernière machine

<u>Pour le lot K</u>

$$f_{KM} = 0$$
$$d_{KM} = f_{KM} - p_{KM}$$

<u>Pour le lot k</u> ; k=1, ..., K-1

$$f_{kM} = d_{k+1M} - S_M$$
$$d_{kM} = f_{kM} - p_{kM}$$

2. Pour la machine j

<u>Pour le lot K</u>

$$f_{Kj} = d_{1j+1}$$
$$d_{Kj} = f_{Kj} - p_{Kj}$$

<u>Pour le lot k</u> ; k=1, ..., K-1

$$f_{kj} = d_{k+1j} - S_j$$
$$d_{kj} = f_{kj} - p_{kj}$$

Figure 3. 5. Exemple de calendrier d'opérations réalisable

Cette solution est illustrée par la figure ci-dessous

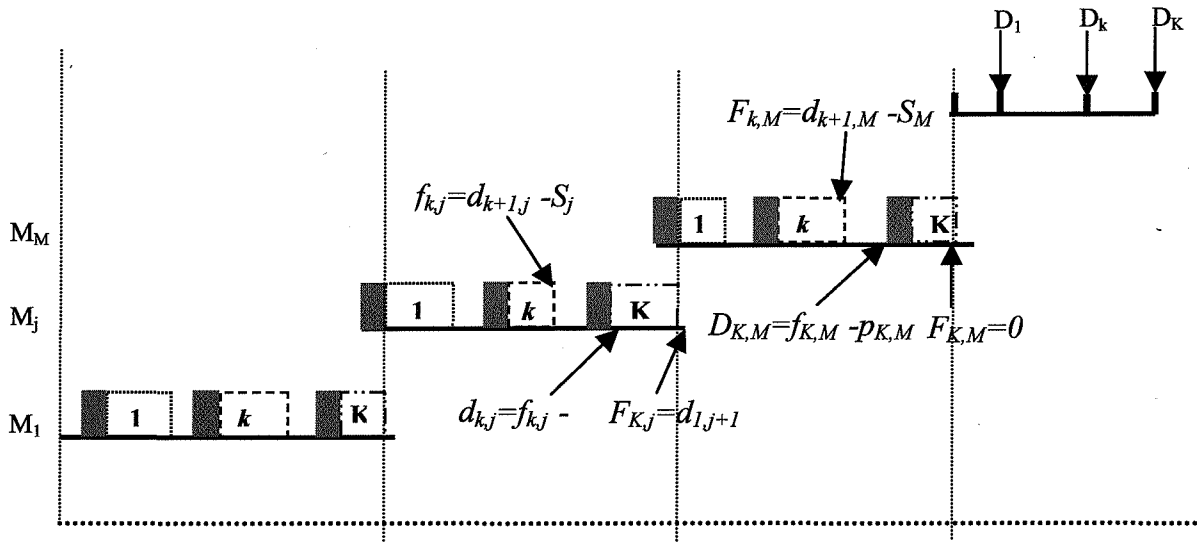


Figure 3. 6.Exemple illustrant l'existence d'un calendrier d'opération réalisable

Fin démonstration

Une fois les quantités à lancer de chaque produit pour chacune des périodes calculées, et la condition nécessaire et suffisante d'existence d'un calendrier d'opérations cyclique vérifiée, nous procédons à l'étape de détermination de l'ordre de passage des différents lots sur l'ensemble des machines constituant notre atelier.

3.5. Détermination des séquences de passage des lots sur les machines

La minimisation du temps de séjour des produits dans l'atelier est un facteur susceptible de réduire les coûts de stockage et de fabrication (les stocks étant calculés à partir du lancement du produit jusqu'à leur date de mise à disposition, les coûts de fabrication quant à eux sont calculés du début à la fin de fabrication).

Ainsi, nous proposons, pour la détermination des séquences de passage des produits sur les machines, l'utilisation, dans notre approche, de méthodes minimisant le temps de séjour des produits dans l'atelier.

Pour cela, nous proposons ci-dessous deux règles différentes pour la détermination de la séquence du passage des lots correspondant à chacun des produits sur chacune des périodes à savoir une version de la méthode CDS *(Campbell,Dudek et Smith)* (Campbell et *al.*,1970), et la méthode NEH *(Nawaz, Enscore et Ham)* (Nawaz et *al.*, 1983).

3.5.1. Utilisation de la méthode de Campbell, Dudek et Smith (la méthode CDS)

Cette méthode, mise au point en 1970, est une généralisation de la méthode de Johnson. Celle-ci consiste à résoudre *m-1* problèmes fictifs à deux machines (*m* étant le nombre de machines).

Nous définissons le $K^{ème}$ problème comme suit

Nous assimilons l'ensemble des ***k*** premières machines à une première machine fictive. La seconde représentera le reste des machines. Nous considérons donc un problème à deux machines avec :

- Le temps opératoire d'une tâche sur la première machine sera égal à la somme de ses temps opératoires sur les ***k*** premières machines ;
- Le temps opératoire d'une tâche sur la seconde machine sera égal à la somme de ses temps opératoires sur les ***m-k*** dernières machines.

$$a_{ik} = \sum_{j \le k} t_{ij} \qquad \text{et} \qquad b_{ik} = \sum_{m-k+1 \le j \le m} t_{ij}$$

Une fois les m-1 problèmes fictifs définis, nous procédons comme suit :

Début

Considérer le 1er problème P(1) ;

Appliquer la règle Johnson:

- Seq:=meilleure séquence de P(1) ,
- C_{max} :=Makespan (P(1)),

Tant Que k<>M Faire

- Considérer le k^{eme} problème P(k)
- Appliquer la règle Johnson
  - Seq1:=meilleure séquence de P(k)
  - C_{max1} :=Makespan (P(k))
- Si C_{max1}<C_{max} faire
  - C_{max} :=C_{max1} ,
  - Seq :=Seq1 ,

Fin tant que

Fin

Figure 3. 7. Algorithme de Campbell, Dudek et Smith

3.5.2. Utilisation de la méthode de Nawez,Enscore et Ham (la méthode NEH)

Cette méthode, mise au point en 1983, est basée sur l'hypothèse qu'une tâche est d'autant plus prioritaire qu'elle a un temps total d'exécution grand. Elle procède comme suit

Début

Classer, dans un ensemble ***E***, les lots par ordre décroissant des sommes de leurs temps opératoires.

Séquence := ϕ

Tant qu'il reste des lots dans ***E*** faire

- Prendre le premier lot ***k*** dans ***E***
- Tester toutes les positions possibles de ***k*** dans ***Séquence*** ;
- Insérer ***k*** dans ***Séquence*** à la place qui minimise ***Cmax***.

Fin de tant que

Fin

Figure 3. 8.Algorithme de Nawaz, Enscore et Ham

Cette méthode et contrairement à CDS ne transforme pas le problème original à *m* machines en un problème à deux machines. Elle détermine la séquence finale de manière constructive, en ajoutant à chaque étape une nouvelle tâche et en trouvant ainsi la meilleure solution partielle.

Nous énonçons dans ce qui suit la méthode que l'on propose pour la construction du calendrier d'opérations cyclique pour un atelier de type Flow Shop pur.

3.6. Construction d'un calendrier d'opérations réalisable

La méthode que l'on propose dans cette section permet, sous réserve que l'hypothèse de la condition nécessaire et suffisante donnée ci haut soit vérifiée, de toujours construire un calendrier d'opérations réalisable.

Cette méthode procède en deux étapes et consiste principalement à placer les lots, que l'on a déterminés au préalable, suivant leurs ordres de passage sur les différentes machines tels que obtenus par CDS ou NEH.

Dans la première étape, nous plaçons l'ensemble des lots de fabrication sur la dernière machine M en partant du dernier lot K jusqu'au lot numéro 1. La date de fin de fabrication f_{KM} ,du dernier lot K à lancer sur la dernière machine M, sera assimilée à sa date limite de livraison D_K. Nous déduisons par la suite, en fonction du temps opératoire p_{KM} du lot K sur la machine M, sa date de début sur cette dernière.

Nous plaçons par la suite le lot de fabrication k, k allant du lot $K-1$ jusqu' au lot numéro 1, en déterminant sa date de fin de fabrication f_{kM} en fonction de sa date limite de livraison D_k et de la date de début du lot $k+1$ déduite du temps de lancement de la machine M ($d_{k+1M} - S_M$). Tout comme pour le dernier lot de fabrication, nous déduisons, en fonction du temps opératoire p_{kM} du lot k sur la machine M, sa date de début sur cette dernière.

Nous calculons par la suite le temps de séjour $f_{KM} - d_{1M}$ de tous les lots de fabrication sur la machine M et nous le comparons au temps de cycle de production T. Si $f_{KM} - d_{1M}$ est supérieur à T alors nous procédons à la réduction du temps de séjour de ces lots en supprimant les temps d'attentes nécessaires sur cette machine M. Ceci se fait via un décalage d'autant de lots nécessaires en partant des derniers, vers le début du cycle de production en maintenant sa date de début (*voir Algorithme de placement.* Figure 3.10).

La seconde étape consiste à propager les actions de la première étape sur l'ensemble des machines restantes, partant de la machine $M-1$ à 1. Pour la machine j, cette étape consiste à placer l'ensemble des lots de fabrication de la même manière décrite pour la dernière machine. Autrement dit, ce placement se fera en commençant par les derniers lots à lancer, et en déterminant la date de fin f_{kj} d'un lot k sur cette machine j en fonction de sa date de début d_{kj+1} sur la machine suivante $j+1$, et la date de début d_{k+1j} du lot suivant $k+1$ sur cette machine déduite de temps de lancement de cette machine S_j. Nous déduisons, en fonction du temps opératoire p_{kj} du lot k sur la machine j, sa date de début sur cette dernière.

Une fois l'ensemble des lots de fabrication placé sur une machine j, nous calculons le temps de séjour $f_{Kj} - d_{1j}$ de tous les lots de fabrication sur la machine j et nous le comparons au temps de cycle de production T. Si $f_{Kj} - d_{1j}$ est supérieur à T alors nous procédons à la réduction du temps de séjour de ces lots en supprimant les temps d'attentes nécessaires sur cette machine j. Ceci se fait via un décalage d'autant de lots nécessaires en partant des derniers, vers le début du cycle de production en maintenant sa date de début. Ce décalage permet l'élimination des attentes entre les lots de fabrication sur la machine j sans autant influencer le travail des machines suivantes $(j+1,...,M)$.

A l'issue de l'exécution de la seconde étape sur la première machine, nous obtenons un plan de production cyclique réalisable avec un ordonnancement de l'ensemble des lots de fabrication sur l'ensemble des machines.

L'algorithme suivant synthétise les étapes de cette procédure constructive de l'ordonnancement des lots de fabrication sur l'ensemble des machines.

```
Début
  fKM=DK
  dKM= fKM-pKM

  Pour k= K-1 à 1 faire
    fkM=min ( dk+1,M-SM, Dk)
    dkM= fkM-pkM

  Si fKM-d1M> T alors
   Debut Si
    diff :=(fKM-d1M)-T;
    attente :=0;
    lot :=K;
    repeter
      attente :=attente+(dlot,M-SM)-flot-1M;
      lot:=lot-1;
    jusqu'à attente>=Diff

    lot :=lot+1 ;

    Si (attente=diff) alors
    Debut Si
      dlot,M := f lot-1,M+SM ;
      f lot,M := d lot,M + p lot,M ;
    Fin Si
    else
    Debut Si
      dlot,M := d lot,M – (attente-diff) ;
      f lot,M := d lot,M + p lot,M ;
    Fin Si

     lot:=lot+1;
    Pour k:=lot jusqu'à K faire
    Debut pour
      dlot,M :=flot-1,M+SM;
      flot,M :=dlot,M+ plot,M ;
    Fin pour
  Fin Si
```

```
j=M-1;
Tant que j>0 faire
Debut TQ2
    fKj=dK,j+1
    dKj= fKj-pKj

    Pour k:=K-1 lot jusqu'à 1 faire
     Debut pour
      fkj=min ( dk+1,j-Sj, dkj+1);
      dkj= fkj-pkj;
     Fin pour

   Si fKj-d1j> T alors
    Debut Si
      diff :=(fKj-d1j)-T;
      attente :=0;
      lot :=K;
     repeter
      attente :=attente+(dlot,j-Sj)-flot-1,j;
      lot:=lot-1;
     jusqu'à (attente>=Diff)

     lot :=lot+1 ;
    Si (attente=diff) alors
     Debut Si
      dlot,j := f lot-1,j+Sj
      f lot,j := d lot,j + p lot,j ;
     Fin Si
    else
     Debut Si
      dlot,j := d lot,j – (attente-diff) ;
      f lot,j := d lot,j + p lot,j ;
     Fin Si

    lot:=lot+1;
    Pour i:=lot jusqu'à N faire
     Debut pour
      dlot,j :=flot-1,j+Sj;
      flot,j :=dlot,j+ plot,j ;
     Fin pour
   Fin Si

Fin TQ2
Fin
```

Figure 3. 9.Algorithme de Construction d'un calendrier d'opérations réalisable

L'application des étapes précédentes nous permet d'avoir une solution réalisable (calendrier des opérations réalisable). A partir de cette solution et dans l'optique de trouver un meilleur plan de production, nous procédons à l'exécution d'un ensemble d'actions permettant de l'améliorer. Nous consacrons la section suivante à l'exposé des actions d'amélioration que l'on propose.

3.7. Méthode pour améliorer la solution obtenue

Nous proposons dans cette section une procédure d'amélioration que l'on utilise pour améliorer nos plans d'opérations. Pour cela nous distinguons deux catégories d'actions d'amélioration:

3.7.1. Actions réduisant le coût d'une solution

L'utilisation de ces actions permet de réduire, d'une manière certaine, les coûts d'une solution :

- ***Première action*:Réduction des coûts de fabrication sur les machines**

  Cette action exploite le fait que les coûts de fabrication dépendent des plages horaires définies et que les coûts de lancement soient fixes par machine quelque soit la plage horaire sur laquelle ils se font. Elle favorise donc, dans la mesure du possible, le travail dans les heures régulières pour l'ensemble des machines exceptées la première et la dernière. L'intérêt de cette action réside dans le fait qu'elle améliore d'une manière certaine les coûts de fabrication sans autant augmenter les coûts de stockage (nous ne touchons ni aux dates de début des lots sur la première machine, ni à leurs dates de fin sur la dernière machine).

  Cette action permet alors d'améliorer le coût de fabrication et par conséquent améliorer le coût global du calendrier des opérations. Cette action est illustrée par la figure ci-après :

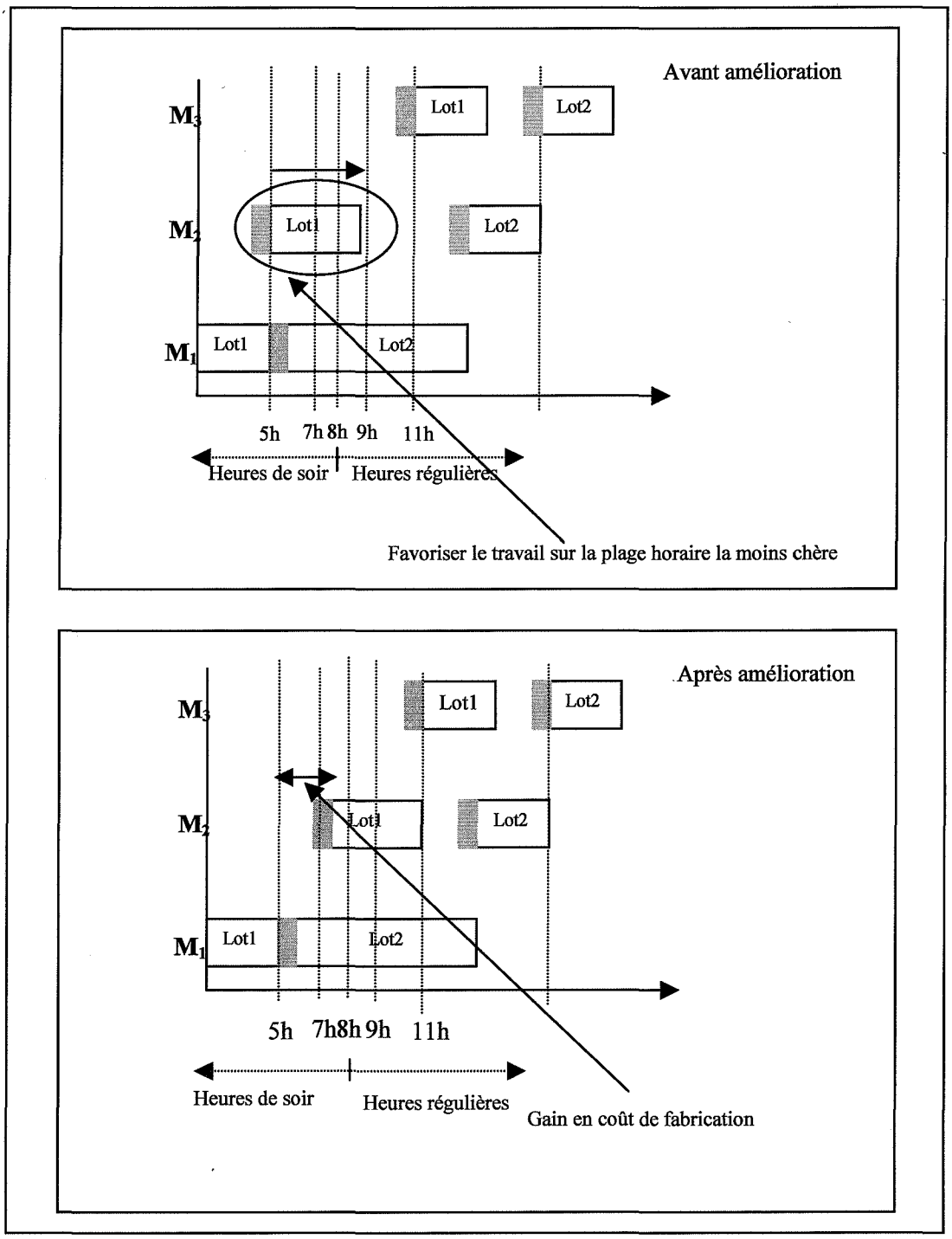


Figure 3. 3.Exemple illustrant l'application de l'action réduisant les coûts de fabrication d'une manière certaine

- ***<u>Seconde action</u>:Réduction du coût de stockage des produits***

  Cette action consiste à retarder, pour le travail en Week-end, la date de début de lancement des lots de fabrication sur la première machine si cela ne présente aucun impact sur les dates de leurs lancements sur le reste des machines. (Ceci a pour impact la réduction du coût de stockage sans autant toucher aux coûts de fabrication –coûts de fabrication identiques tout au long du week-end- et non plus aux coûts de lancements).

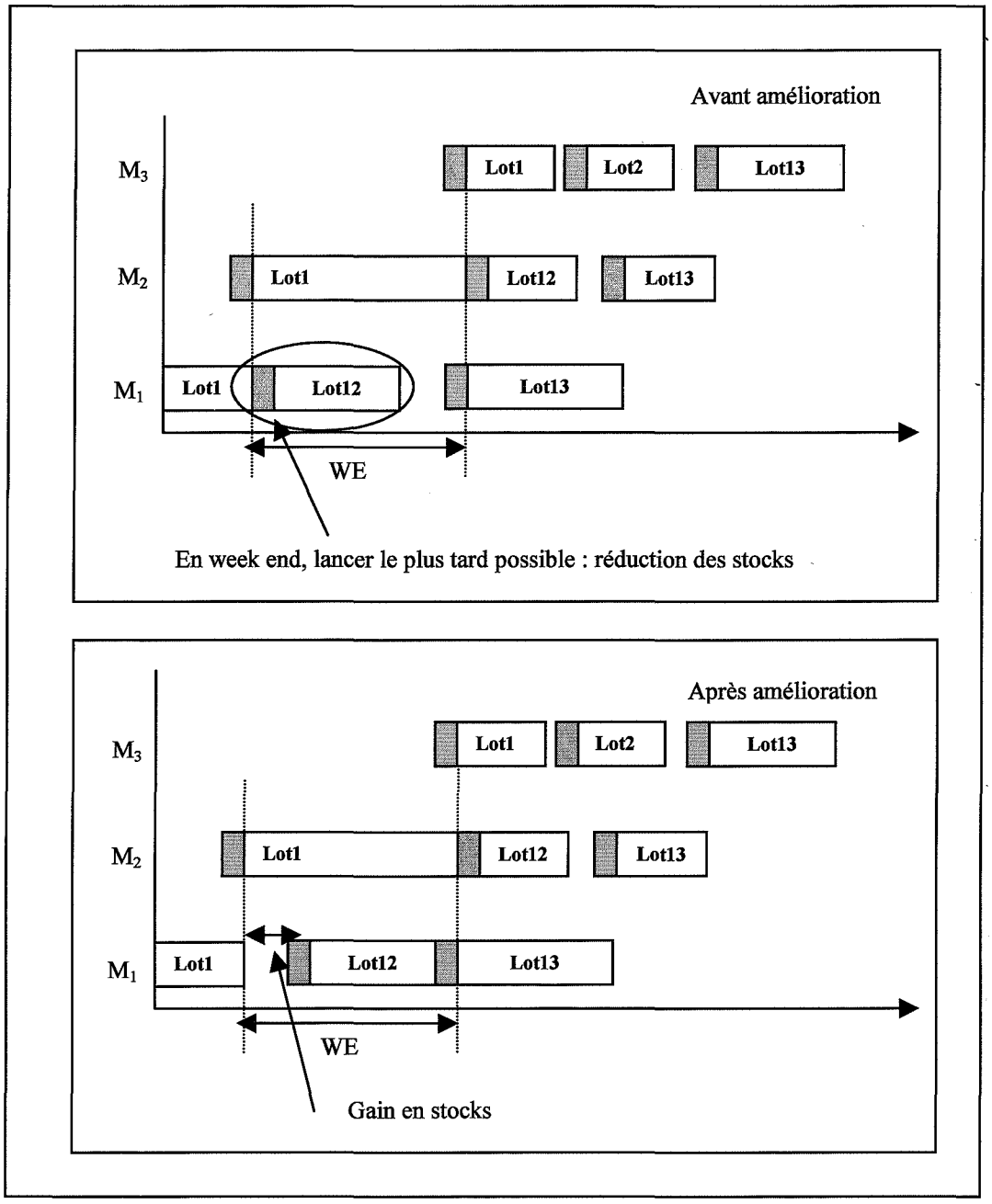


Figure 3. 4.Exemple illustrant l'application de l'action réduisant les coûts de stockage d'une manière certaine

- ***<u>Troisième action</u>:Réduction du temps de lancement sur la plage horaire la moins chère***

Cette action consiste à faire les réglages, si cela s'avère possible, des machines dans la seconde plage horaire (coût de lancement constant par machine quelque soit la plage horaire, ceci va libérer le plus de temps sur la première plage horaire lequel sera utilisé ultérieurement pour la fabrication).

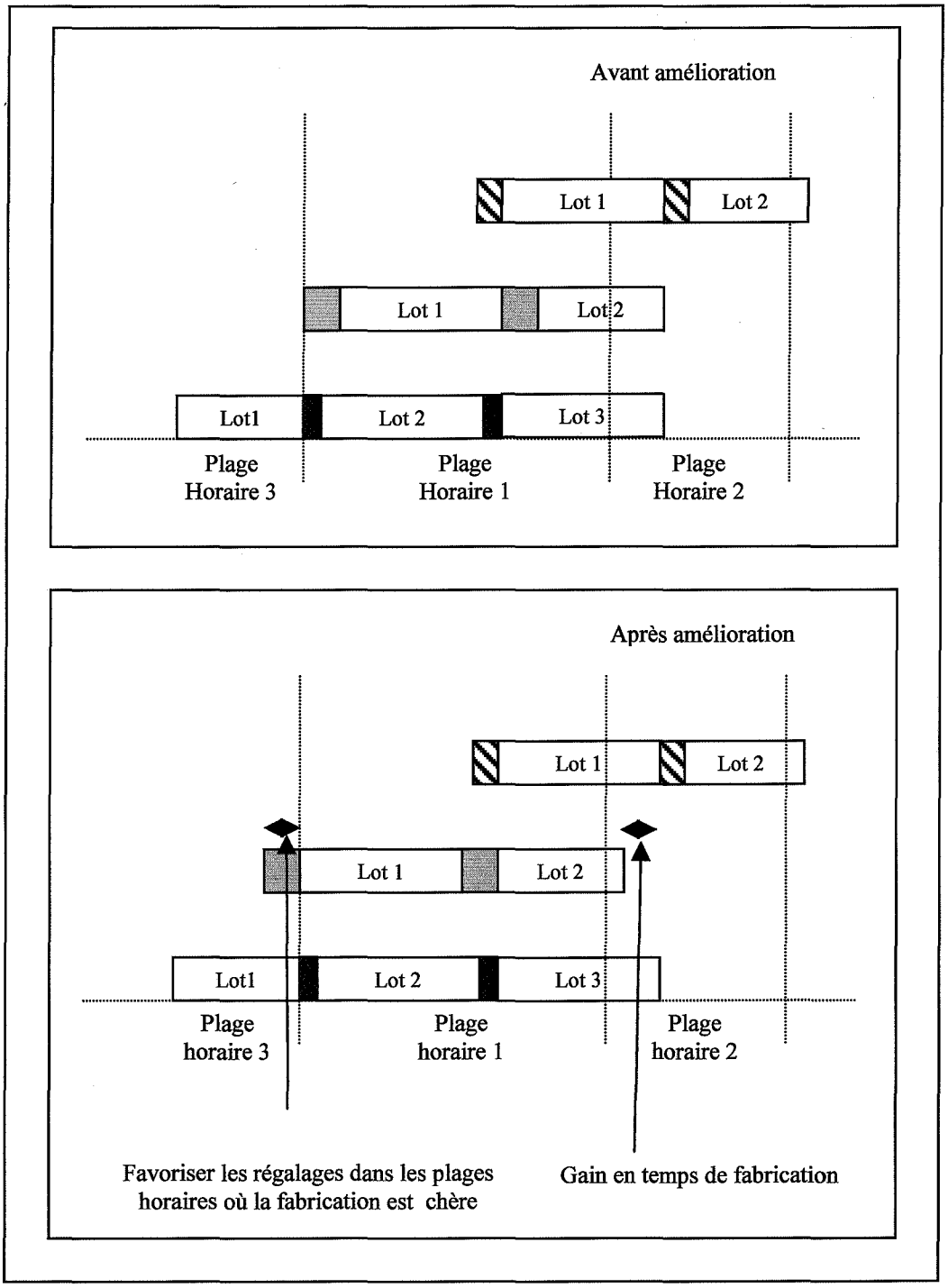


Figure 3. 5. Exemple illustrant l'application de l'action améliorant une solution d'une manière certaine en exploitant les secondes plages horaires pour les réglages

3.7.2. Actions susceptibles de réduire le coût d'une solution

L'utilisation de ces actions est susceptible de réduire les coûts d'une solution. Seuls les tests pourront confirmer ou infirmer cela. Nous énumérons ci-après l'ensemble de ces actions :

- ***Première action* : Groupage de lots successifs concernant un même produit**
  Cette action consiste à grouper tous les lots successifs concernant un même produit. Ceci va d'une part supprimer un coût de lancement sur chacune des machines et de l'autre assurer un gain en termes de temps de travail sur le cycle de production (à chaque groupage de deux lots du même produit, un temps de lancement est supprimé pour chacune des machines).

- ***Seconde action* : Groupage de lots, du même produit, non successifs**
  Nous proposons dans ce qui suit une règle nous permettant de décider d'autoriser ou non un groupage de lots. Cette règle consiste à tester si le gain résultant du groupage de deux lots en éliminant les coûts de lancements, sur chacune des machines, n'est pas absorbé par le coût de stockage engendré par l'anticipation de fabrication.
  Soient deux lots 1 et 2 d'un produit *i*, et soient

  d_{1i} : Date de début de fabrication du premier lot « 1 » du produit i ;

  q_{1i} : Quantité à lancer du premier lot « 1 » du produit i ;

  q_{1i}^{1} : Quantité 1 du premier lot « 1 » ;

  l_{1i}^{1} : Date de livraison de la quantité q_{1i}^{1} ;

  q_{1i}^{2} : Quantité 2 du premier lot « 1 » ;

  l_{1i}^{2} : Date de livraison de la quantité q_{1i}^{2} ;

  q_{1i}^{k1} : Quantité k_1 du premier lot « 1 » ;

  l_{1i}^{k1} : Date de livraison de la quantité q_{1i}^{k1} ;

  d_{2i} : Date de début de fabrication du second lot « 2 » du produit i ;

  q_{2i} : Quantité à lancer du second lot « 2 » du produit i ;

q_{2i}^{1} : Quantité 1 du second lot « 2 » ;

l_{2i}^{1} : Date de livraison de la quantité q_{2i}^{1} ;

q_{2i}^{2} : Quantité 2 du second lot « 2 »;

l_{2i}^{2} : Date de livraison de la quantité q_{2i}^{2} ;

q_{2i}^{k2} : Quantité k_2 du second lot « 2 » ;

l_{2i}^{k2} : Date de livraison de la quantité q_{2i}^{k2} ;

CL_j : Coût de lancement de la machine j ;

CS_i : Coût de stockage du produit i ;

Le coût de lancement et du stockage du lot *1i* et *2i* lancés séparément est :

$$(l_{1i}^{1}-d_{1i})q_{1i}^{1}CS_i+(l_{1i}^{2}-d_{1i})q_{1i}^{2}CS_i+\ldots+(l_{1i}^{k1}-d_{1i})q_{1i}^{k1}CS_i+(l_{2i}^{1}-d_{2i})q_{2i}^{1}CS_i$$
$$+(l_{2i}^{2}-d_{2i})q_{2i}^{2}CS_i+\ldots+(l_{2i}^{k2}-d_{2i})q_{2i}^{k2}CS_i+2\sum_{j=1}^{M}CL_j$$

De même, le coût de lancement et du stockage des deux lots *1i* et *2i* groupés est :

$$(l_{1i}^{1}-d_{1i})q_{1i}^{1}CS_i+(l_{1i}^{2}-d_{1i})q_{1i}^{2}CS_i+\ldots+(l_{1i}^{k1}-d_{1i})q_{1i}^{k1}CS_i+(l_{2i}^{1}-d_{1i})q_{2i}^{1}CS_i$$
$$+(l_{2i}^{2}-d_{1i})q_{2i}^{2}CS_i+\ldots+(l_{2i}^{k2}-d_{1i})q_{2i}^{k2}CS_i+\sum_{j=1}^{M}CL_j$$

Afin que le groupage des deux lots soit bénéfique, il faut que le coût engendré par le lancement des deux lots en une seule fois soit inférieur à leurs coûts lancés séparément. Ceci se traduit par l'inéquation ci-après :

$$(l_{1i}^{1}-d_{1i})q_{1i}^{1}CS_i+(l_{1i}^{2}-d_{1i})q_{1i}^{2}CS_i+...+(l_{1i}^{k1}-d_{1i})q_{1i}^{k1}CS_i+(l_{2i}^{1}-d_{1i})q_{2i}^{1}CS_i$$
$$+(l_{2i}^{2}-d_{1i})q_{2i}^{2}CS_i+...+(l_{2i}^{k2}-d_{1i})q_{2i}^{k2}CS_i+\sum_{j=1}^{M}CL_j<(l_{1i}^{1}-d_{1i})q_{1i}^{1}CS_i+(l_{1i}^{2}-d_{1i})q_{1i}^{2}CS_i+...+$$
$$(l_{1i}^{k1}-d_{1i})q_{1i}^{k1}CS_i+(l_{2i}^{1}-d_{2i})q_{2i}^{1}CS_i+(l_{2i}^{2}-d_{2i})q_{2i}^{2}CS_i+...+(l_{2i}^{k2}-d_{2i})q_{2i}^{k2}CS_i+2\sum_{j=1}^{M}CL_j$$

Ceci implique :

$$(d_{2i}-d_{1i})CS_iq_{2i}<\sum_{j=1}^{M}CL_j$$

Si cette inéquation n'est pas vérifiée alors nous n'autorisons pas le groupage car il ne sera pas bénéfique. Sinon, nous groupons les lots *1* et *2* et nous testons si cela améliore la solution ou pas.

Nous proposons dans ce qui suit la procédure complète d'amélioration pour notre cas d'étude:

3.7.3. La méthode d'amélioration proposée

Etape 1 : Partant du plan d'opérations réalisable en cours faire :

Pas 1: Réduire le coût de fabrication sur les différentes plages horaires sur toutes les machines exceptées la première et la dernière machine (ceci ne touchera ni au coût de stockage, ni au coût de réglage)

Pas 2 : Retarder, pour le travail en Week-end, la date de début de lancement des lots de fabrication sur la première machine, si cela ne présente aucun impact sur les dates de leurs lancements sur le reste des machines. (Ceci va certainement réduire le coût de stockage sans autant toucher aux coûts de fabrication –coûts de fabrication identiques tout au long du week-end- et non plus aux coûts de réglages).

Pas 3: effectuer les réglages des machines, quand cela s'avère possible, dans les plages horaires les plus chères (coûts de réglage constant par machine quelque soit la plage

horaire sur laquelle il est effectué). Ceci va supprimer les temps de réglages consommés inutilement dans les plages horaires les moins chères et par conséquent libérer le plus de temps sur la plage horaire la moins chère qui sera utilisé ultérieurement pour la fabrication).

Etape 2 :

Pas 1: Si deux lots du même produit se succèdent et si leur groupage est bénéfique alors les grouper (Ceci réduira le temps total de séjour des pièces sur chacune des machines).

Pas 2 :

- Avancer la fabrication des lots de fabrication se faisant dans la seconde plage horaire si le gain en coût de fabrication résultant n'est pas absorbé par le coût de stockage engendré par les décalages.
- Si la durée de travail résultante pour chacune des machines est supérieure à la durée du cycle de production alors procéder à sa correction et aller à **Etape 1**.

Pas 3 **:**

- Avancer la fabrication des lots de fabrication se faisant dans les fins de semaines si le gain en coût de fabrication résultant n'est pas absorbé par le coût de stockage engendré par les décalages.
- Si la durée de travail résultante pour chacune des machines est supérieure à la durée du cycle de production alors procéder à sa correction et aller à **(Etape 1)**.

Pas 4 **:** Changer la séquence d'une période de telle sorte que le travail dans la seconde plage horaire et/ou week-end soit réduit. Ceci se fera en permutant deux lots dont le premier se fait dans le week-end et le second se fait dans les jours de semaines (première ou seconde plage horaire), ou encore le premier lot se fait dans la seconde plage horaire et le second dans la première et aller à **(Etape 1)**

Etape 3 : Cette étape consiste à faire des groupages des lots du même produit :

Pas 1 : Choisir deux lots d'un même produit *i*

Pas 2 : Si $(d_{2i} - d_{1i})CS_i q_{2i} < \sum_{j=1}^{M} CL_j$ alors grouper le second lot avec le premier.

Pas 3 : Si la durée de travail résultante pour chacune des machines est supérieure à la durée du cycle de production alors procéder à sa correction.

Pas 4 : Si le coût global du plan d'opérations résultant est inférieur à celui de la solution de départ alors le garder sinon aller à ***(pas 1).***

Pas 5 : Aller à **(Etape 1)**

Nous proposons dans ce qui suit différentes variantes basées sur l'approche globale décrite tout au long de ce chapitre.

3.8. Variantes de l'approche proposée

Nous distinguons deux catégories de variantes, celle construisant la séquence de passage des produits sur les machines selon la méthode CDS, et celle le faisant selon la méthode NEH.
De chacune de ces deux catégories, nous considérons deux variantes exploitant différentes actions d'améliorations.

Afin d'introduire ces quatre différentes variantes, nous proposons l'organigramme suivant :

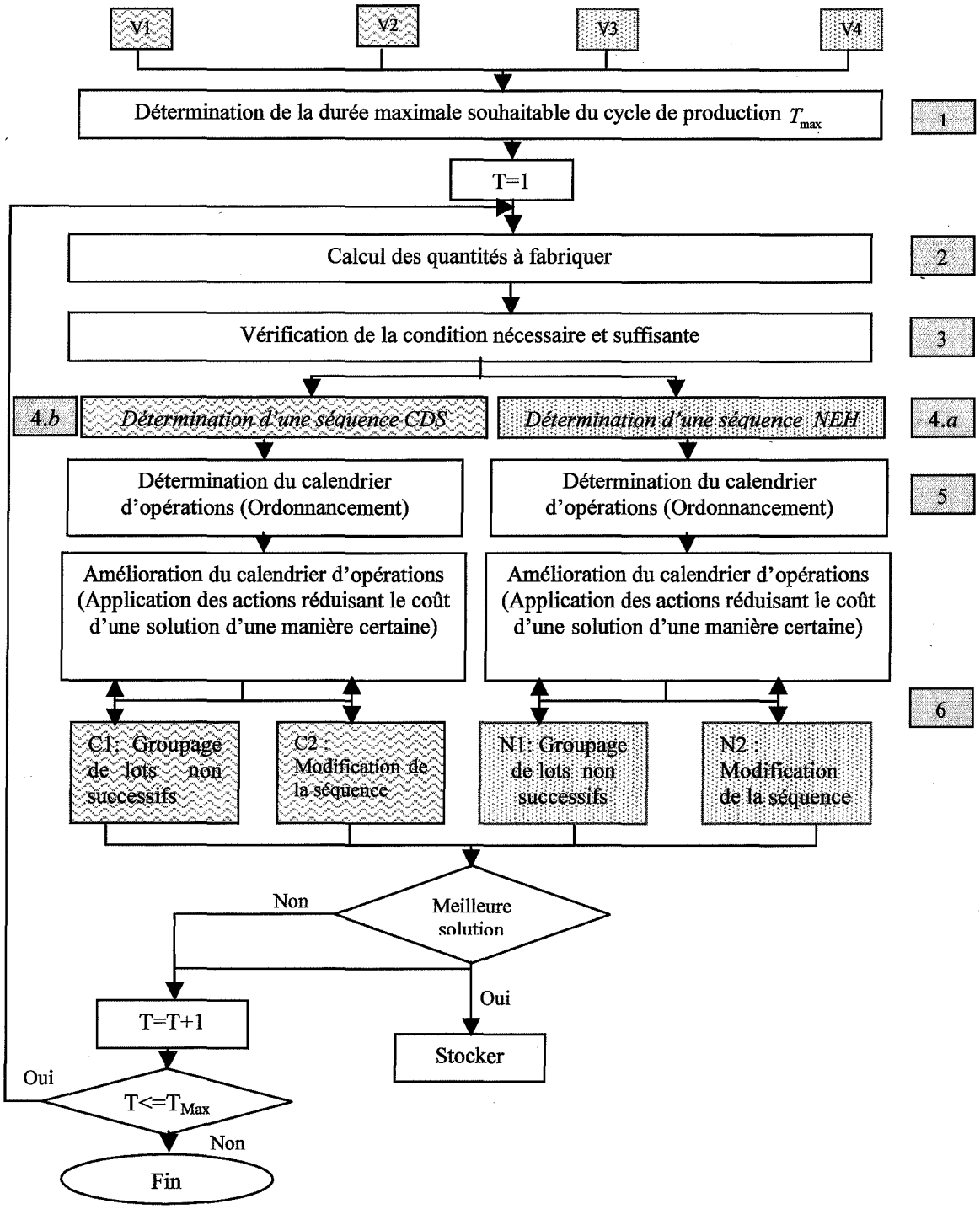


Figure 3. 6. Les différentes variantes de l'approche proposée

Comme illustré dans la Figure 3.13, la démarche de détermination de la durée maximale du cycle de production admissible, le calcul des quantités (initiales) à lancer ainsi que la vérification de la condition nécessaire et suffisante est la même pour les quatre variantes.

Nous synthétisons dans ce qui suit, les particularités de chacune de ces variantes :

Première variante C1

Cette première variante exécute les étapes (1à 3) (voir Figure 3.13). La détermination de la séquence de passage des ordres de fabrication sur les machines se fera selon la méthode CDS (étape 4.b). Celle-ci est déterminée dans le but de minimiser le temps de séjours de ces ordres de fabrication dans l'atelier.

La détermination du calendrier d'opérations (solution initiale) adéquat est faite selon l'approche proposée (étape 5) (voir Figure 3.13). L'amélioration de la solution quant à elle se fait en deux phases; la première exécute les actions réduisant le coût de la solution d'une manière certaine (voir section 3.7.1). La seconde phase, faisant la particularité de cette première variante, tente d'améliorer la solution issue de la première phase en testant des groupages des lots d'un même produit.

Seconde variante C2

Cette variante procède exactement de la même façon que la première, exceptée la seconde phase d'amélioration. Celle-ci est remplacée par une phase modifiant la séquence de passage des ordres de fabrication sur les machines en faisant des permutations des lots d'une même période.

Troisième variante N1

Cette troisième variante exécute les étapes (1à 3) (voir Figure 3.13). La détermination de la séquence de passage des ordres de fabrication sur les machines se fera selon la méthode NEH (étape 4.a). Celle-ci est déterminée dans le but de minimiser le temps de séjours de ces ordres de fabrication dans l'atelier.

La détermination du calendrier d'opérations (solution initiale) adéquat est faite selon l'approche proposée (étape 5) (voir Figure 3.13). L'amélioration de la solution quant à elle se fait en deux phases; la première exécute les actions réduisant le coût de la solution d'une

manière certaine (voir section 3.7.1). La seconde phase, faisant la particularité de cette première variante, tente d'améliorer la solution issue de la première phase en effectuant des groupages des lots d'un même produit.

Quatrième variante N2

Cette variante procède exactement de la même façon que la troisième, exceptée la seconde phase d'amélioration. Celle-ci est remplacée par une phase modifiant la séquence de passage des ordres de fabrication sur les machines en faisant des permutations des lots d'une même période.

3.9. Conclusion

Dans l'optique de déterminer le meilleur calendrier des opération cyclique- pour un atelier de type Flow Shop pur constitué de plusieurs machines et fabricant plusieurs produits en réponses à des appels de livraison cycliques- nous avons tout au long de ce chapitre, développé cette problématique, montré que l'on peut considérer, en plus de ce qui a été réalisé dans les travaux de recherches antérieures, une durée de cycle de production *non multiple entier* de la durée du cycle de livraison. Nous avons, également développé une nouvelle méthode répondant à cette problématique et avons proposé distinctes variantes de cette dernière.

Nous nous proposons, dans le chapitre suivant, de tester cette méthode ainsi que ses variantes sur un ensemble de problèmes fictifs reproduits de façon aléatoire tout en respectant les traits caractéristiques des problèmes réels.

Chapitre 4 : Evaluation de l'approche proposée et résultats numériques

4.1. Récapitulatifs des méthodes proposées

Afin d'évaluer les performances de notre approche ainsi que de ses variantes, nous procédons à leur comparaison à l'une des approches proposées dans la littérature laquelle vise aussi à déterminer un plan de production cyclique pour un atelier de type Flow Shop. Avant d'exposer les différentes étapes de cette approche (Hacid, 2000), nous donnons ci-après un récapitulatif de notre approche ainsi que de ses variantes.

L'approche que nous proposons pour la détermination d'un plan de production cyclique, pour un atelier de type Flow Shop pur, procède en plusieurs étapes. Il s'agit de déterminer, dans la première étape, la durée maximale autorisée pour le cycle de production. Cette durée est fonction d'une borne maximale, que le planificateur définit à l'avance, et des durées de cycles de livraisons des produits.
Afin de déterminer des plans de production cycliques, l'approche, calcule pour chaque durée de cycle de production admissible, les quantités à fabriquer de chaque produit. Si la durée de cycle de production est multiple entier de la durée du cycle de livraison du produit alors les quantités à fabriquer pour chaque période seront exactement égales aux quantités demandées. Sinon (la durée du cycle de production est n'est pas multiple entier de la durée du cycle de livraison du produit) les quantités à fabriquer pour chaque période seront déterminées en résolvant, d'une manière optimale, un modèle mathématique linéaire.

Une fois les quantités à fabriquer calculées, l'approche procède à la vérification d'une condition nécessaire et suffisante pour la réalisabilité de ces quantités sur le cycle de production. Si cette condition est vérifiée, l'approche procède à la détermination d'une séquence de lancement de ces lots. La détermination de cette séquence se fera en fonction de la variante retenue. Pour les variantes N1 et N2, l'approche utilise la méthode Nawez,Enscore et Ham (NEH), alors que pour les variantes C1 et C2 elle utilise la méthode Campbell, Dudek et Smith(CDS).

Le calendrier des opérations (ordonnancement) est obtenu par une méthode constructive, partant des séquences et des quantités déterminées aux étapes précédentes.

L'approche procède par la suite à une étape d'amélioration des solutions obtenues. Les actions d'améliorations diffèrent d'une variante à une autre. Dans les variantes N1 et C1,

l'approche procède, dans le but d'améliorer une solution, à des groupages de lots de fabrications, alors qu'elle effectue des changements de séquences dans les deux autres variantes N2 et C2.

Pour chacune des variantes, nous ne retenons, à la fin d'exécution de l'approche, que la meilleure durée du cycle de production avec le meilleur plan de production lui correspondant.

4.2. Rappel de la méthode de Hacid (Hacid, 2000)

Afin d'évaluer les performances de l'approche que l'on propose ainsi que ses variantes, nous procédons à une étude comparative de ces dernières à l'une de celles proposées dans la littérature.

La problématique étudiée dans (Hacid, 2000) considère un contexte de travail, plus ou moins, similaire au notre. Nous proposons donc, de construire notre étude comparative en nous référant à l'approche proposée dans (Hacid, 2000).

4.2.1. Hypothèses de travail de la méthode Hacid

Dans (Hacid, 2000), l'auteur traite le problème de détermination d'un plan de production cyclique, pour un atelier de production de type Flow Shop comprenant une machine goulet et fabricant plusieurs produits, minimisant la somme des coûts de stockage et des coûts de lancements. Nous énumérons dans ce qui suit les différentes hypothèses qu'il considère :

- Les demandes concernent seulement les produits finis;
- Le cycle de livraison de chaque produit est connu;
- Les matières premières sont fournies en temps voulu;
- Les stocks en cours de fabrication sont autorisés;
- Les stocks de produits finis et des en cours sont valorisés à leurs coûts matières premières ;
- La quantité produite est égale à la quantité requise par chaque cycle;
- Aucune machine ne peut traiter plus d'un produit à la fois;
- Pas de préemption;
- Pas de chevauchement;

- La même séquence est utilisée à chaque cycle;
- Le lancement des produits se fait par lots de quantités différentes;
- Il est associé à chaque produit un coût de lancement et un coût de stockage par unité de temps ;
- Le temps est découpé en périodes (journée) et les livraisons se font en fin de période ;
- Les livraisons se font en une seule fois à la fin de fabrication ;
- La capacité de production est suffisante pour répondre à la demande.
- Aucune considération des coûts de fabrication.

Nous exposons dans la section suivante, les étapes de l'approche proposée dans (Hacid, 2000) pour la détermination d'un cycle de production minimisant la somme des coûts de stockage et des coûts de lancements.

4.2.2. Résumé des étapes de la méthode Hacid

Dans le but de déterminer un plan de production cyclique minimisant la somme des coûts de stockage et de lancement, l'auteur propose une approche procédant en trois étapes. Il détermine, dans la première étape, pour chaque produit, pris séparément des autres, un cycle de production minimisant ses coûts de stockage et de lancement. Il calcule, dans une seconde étape, un cycle de production de l'ensemble des produits, et procède dans la dernière étape à la synchronisation du cycle de production en regard du cycle de livraison.

Etape 1: Détermination du cycle de production pour un produit

Il s'agit, dans cette étape, de déterminer pour chaque produit un cycle de production minimisant les coûts de stockage et de lancement. Ceci consiste à trouver la meilleure durée du cycle de production ainsi que les différentes quantités à lancer pour chacune des périodes constituant ce cycle de production.

Avant de présenter la démarche proposée, par l'auteur, nous rappelons les deux hypothèses qu'il considère:

1. la durée du cycle de production de chaque produit est *un multiple entier* de la durée de son cycle de livraison ;

2. La durée du cycle de production est bornée.

La démarche proposée dans (Hacid, 2000) consiste à parcourir toutes les durées de cycle de production admissibles (vérifiant les deux hypothèses citées précédemment) et déterminer pour chacune d'elles un groupage optimal des ordres de livraison, constituant les lots de fabrication, optimisant une fonction de coût. L'auteur ne considère que les groupages d'un nombre entier de livraisons successives. La fonction de coût à optimiser est la somme sur un cycle de production des coûts de lancement de tous les ordres de fabrication et des coûts de stockage (produits finis et en-cours).

La fonction de coût considère les coûts de stockage des produits encours et finis ainsi que les coûts de lancements résultants des groupages effectués. Nous rappelons dans ce qui suit la fonction de coût, proposée dans (Hacid, 2000), relatif au groupage de x livraisons successives d'un produit i, explicitant la fonction de stock relative à ce groupage.

Pour l'estimation de la fonction coût d'un groupage de x livraisons successives d'un produit i, l'auteur considère les notations suivantes :

- d_{it} : Quantité du produit i à livrer en fin de période t ;
- CS_i : Coût de stockage d'une unité de produit i par unité de temps;
- CL_i : Coût de lancement fixe d'un lot de fabrication du produit i ;
- tf_i : Temps fixe associé à la réalisation d'un lot de fabrication du produit i : somme des temps de réglage, de transfert, d'attente, associés à la réalisation d'un lot quelle qu'en soit la taille ;
- tv_i : Temps variable associé à la réalisation du produit i : temps à ajouter au temps fixe et proportionnel à la quantité lancée. Il s'agit de la somme des temps opératoires unitaires si la production s'effectue en série ;
- Q_i : Quantité lancée du produit i ;
- $TC(Q_i)$: Temps de fabrication associé à une quantité lancée Q_i. Il est égal à. $tf_i + tv_i.Q_i$.

Les fonctions de stock et de coût, relatives au groupage de x livraisons du produit i, que considère l'auteur sont :

Fonction de coût de stockage relative au groupage de x livraisons

Sous l'hypothèse que les stocks des produits finis et en-cours sont valorisés à leurs coûts matières premières, fournies en totalité en début de fabrication, l'auteur calcule leur cumul. Cependant, et comme le montre la Figure 4.1, ce cumul des stocks- produits finis et des en-cours- relatif au groupage de x livraisons d'un produit i reste inchangé entre la date du lancement et la date de la première livraison. Ceci est du au fait que les livraisons se font une fois la fabrication finie (hypothèse posée).

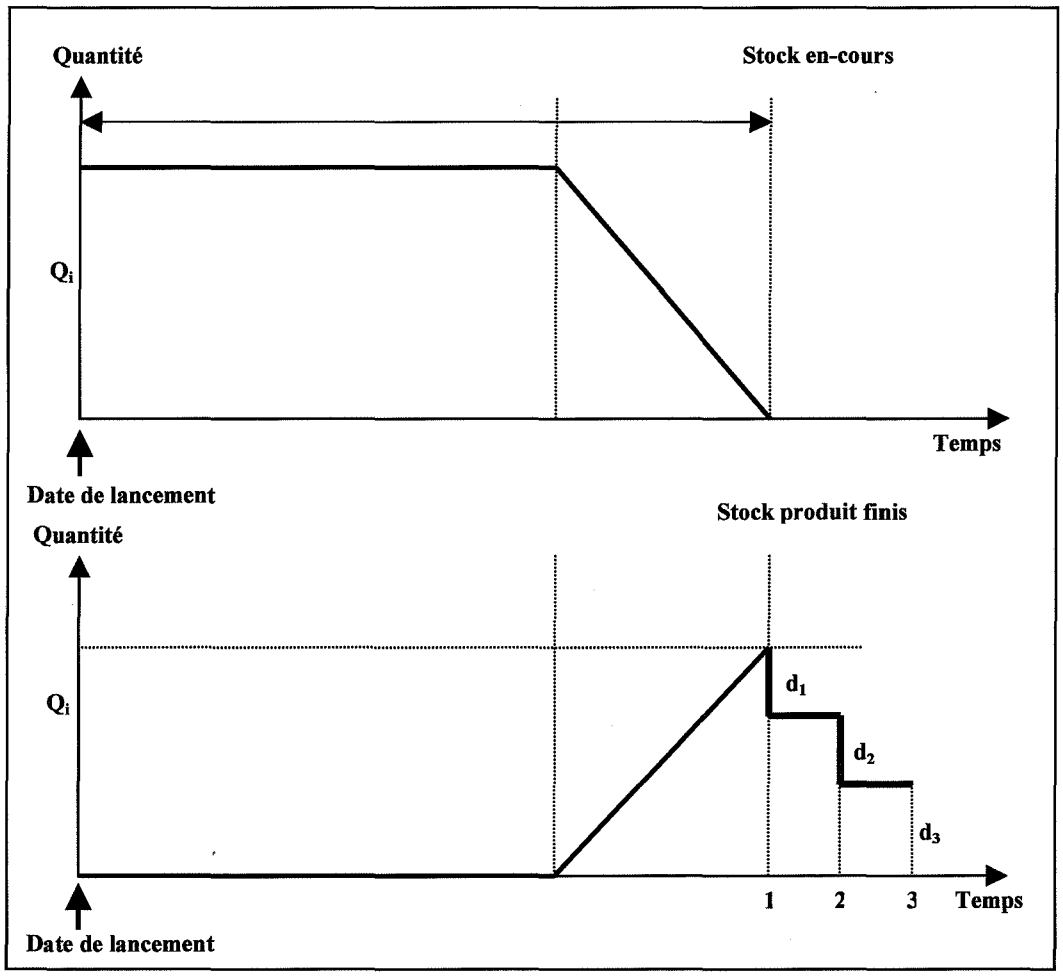


Figure 4. 1. Stock induit par un groupage de trois ordres de livraisons

En se basant sur ce constat, l'auteur écrit la fonction de stock associée à un groupage de x livraisons du produit i comme suit :

$$ST_i = Q_i.TC(Q_i) + \sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it} \text{ avec } Q_i = \sum_{t=1}^{x} d_{it} . \qquad (4.1)$$

Le premier terme correspond au cumul des stock encours et des produits finis avant leurs livraisons et est égal à $Q_i.(tf_i + tv_i.Q_i)$, et le second terme correspond au stock des produits finis en regard de leurs dates de livraisons $\sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it}$. Le groupage conduit en effet à stocker, au-delà du temps de fabrication, soit une période, la quantité livrée en période 2, deux périodes la quantité livrée en période 3, ... et x-1 périodes la quantité à livrer en période x (étant entendu que la fin de la production est calée sur la première date de livraisons).

Ainsi, le coût de stockage associé à un groupage de x livraisons du produit i est donné par la formule suivante :

$$CS_i.(Q_i.\lceil TC(Q_i)\rceil + \sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it}) \qquad (4.2)$$

Fonction du coût total relative au groupage de x livraisons

En additionnant le coût de lancement du produit i au coût de stockage d'un groupage de x livraisons de ce même produit, l'auteur formule la fonction de coût total, pour un groupage de x livraisons, comme suit :

$$CT_{ix} = CL_i + CS_i.(Q_i.\lceil TC(Q_i)\rceil + \sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it}) \qquad (4.3)$$

Et en remplaçant Q_i et $TC(Q_i)$ par leurs valeurs respectives $\sum_{t=1}^{x} d_{it}$ et $tf_i + tv_i.Q_i$ l'auteur déduit :

$$CT_{ix} = CL_i + CS_i.((\sum_{t=1}^{x}.d_{it}).\left[tf_i + tv_i(\sum_{t=1}^{x}.d_{it})\right] + \sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it}) \qquad (4.4)$$

En se basant sur cette fonction de coût, l'auteur recherche le meilleur groupage des ordres de livraisons successifs parmi tous les groupages possibles. Notons que le nombre de groupages possibles est de 2^{n-1} avec n le nombre d'ordres de livraisons du produit que le cycle de production doit couvrir (ce nombre d'ordres de livraisons varie en fonction de la durée du cycle de production).

Cependant le processus de groupage conduit à des coûts différents selon la date de début du premier groupage. L'auteur détermine, en plus d'un meilleur groupage des ordres de livraisons, un meilleur phasage (date de début du premier groupage conduisant à un meilleur coût).
A la fin de l'exécution de cette première étape, l'auteur détermine pour chacun des produits la meilleure durée du cycle de production et, selon le groupage et phasage optimaux, les quantités à lancer du produit durant cette durée de cycle.

Etape 2: Détermination du cycle de production de l'ensemble des produits
Une fois les cycles de production de chacun des produits déterminés (*étape 1*), l'auteur calcule un cycle de production unique pour tous les produits. Dans cette optique, il calcule le cycle de production théorique et vérifie son admissibilité en regard de la durée maximale du cycle de production autorisée. Il procède à la recherche d'un cycle admissible à surcoût minimal dans le cas où le cycle théorique calculé est inadmissible. Nous exposons ci-dessous plus en détails cette étape.

Sachant que le cycle de production doit vérifier l'hypothèse imposant au cycle de production d'être un multiple entier du cycle de livraison de chaque produit, l'auteur calcule un cycle de production théorique qui est multiple des cycles de livraisons des produits.
La durée du cycle de production théorique sera égale au Plus Petit Commun Multiple (PPCM) des durées des cycles de production des produits (déterminées par *l'étape 1*). Quant aux quantités à lancer de chacun des produits, elles seront déterminées par une reproduction de leurs cycles de production sur la durée du cycle de production théorique.

Cependant, ce cycle de production théorique peut, dans certain cas, ne pas respecter l'hypothèse lui imposant de ne pas excéder la borne maximale définie au préalable. Pour cela,

et après calcul du cycle de production théorique, l'auteur procède à la vérification de son admissibilité. Dans le cas où le cycle de production n'est pas admissible l'auteur recherche un cycle de production de durée admissible induisant un surcoût minimal.

Dans ce but, l'auteur parcourt toutes les durées de cycle de production inférieures à la durée maximale définie et multiple de toutes les durées des cycles de livraisons et choisit celle engendrant un coût de cycle de production moindre.

Une fois ce cycle de production unique des produits déterminé, l'auteur procède à sa synchronisation en regard des cycles de livraisons. Cette dernière consiste à assimiler les dates de fin de fabrication des lots groupés à la date de leur première livraison.

Etape 3: prise en compte des contraintes de capacité

La construction du cycle de production (*étape 1 et 2*) est réalisée à capacité infinie. Il s'agit dans cette étape de s'assurer que le cycle de production obtenu est réalisable en terme de capacité disponible. Dans le cas contraire, l'auteur détermine de combien décaler le cycle de production en regard du cycle de livraison pour le rendre réalisable.

L'auteur fait l'hypothèse de l'existence d'une machine goulet caractérisée par une capacité fixe par période. Il s'agit alors de vérifier que la charge durant chaque période, sur la ressource goulet, est inférieure ou égale à la capacité de cette ressource au cours du cycle de production.

Si la charge cumulée sur le cycle de production est supérieure à sa capacité cumulée, alors la solution n'est pas réalisable. Dans le cas inverse, l'auteur procède à la vérification de la condition de réalisabilité pour chacune des périodes composant le cycle de production. Si la condition de réalisabilité n'est pas vérifiée pour une ou plusieurs périodes, l'auteur anticipe la date de début de cycle de production, sans autant modifier sa durée d'un nombre de périodes nécessaires pour le rendre réalisable (Campagne et *al.*, 1998).

Avant de procéder à la comparaison de l'approche que l'on propose dans le chapitre 3 à celle proposée dans (Hacid, 2000), traitant le problème de détermination d'un meilleur plan de

production cyclique, nous ciblons dans la section suivante les similitudes et différences existant entre leurs contextes de travail ainsi que les hypothèses posées pour l'application de chacune d'elles.

4.3. Similitudes et différences avec l'approche proposée

Comme cité précédemment, l'objectif de cette section est de ressortir les similitudes ainsi que les différences qui existent entre les deux approches. Nous commençons d'abord par une comparaison des contextes de travail considérés par chacune des approches. Nous comparons par la suite les hypothèses posées, et terminons cette section par l'énoncé des différences globales existant entre les deux approches.

4.3.1. Comparaison des contextes

Les deux approches considèrent un atelier constitué de plusieurs machines fabricant plusieurs produits avec des appels de livraison cycliques. Cependant, et à l'inverse de (Hacid, 2000) où l'auteur considère une machine goulet, nous considérons dans notre étude un Flow Shop pur.

4.3.2. Comparaisons des hypothèses

Nous recensons, dans les deux études, un ensemble d'hypothèses similaires, entre autres, celle supposant que la capacité de production est suffisante pour répondre à la demande. Les deux études imposent à la durée du cycle de production d'être inférieure à une borne maximale définie au préalable par le planificateur.

Du point de vue coûts, l'étude de (Hacid, 2000) considère seulement des coûts de lancement et de stockage, alors que dans notre cas nous considérons, en plus de ces deux coûts, les coûts de fabrication. Notons que dans notre étude nous distinguons trois plages horaires (matin, soir et fin de semaines) et pour lesquels les coûts de fabrication diffèrent.

De même, nous recensons, un ensemble d'hypothèses différentes que nous énumérons ci-après :

Dans (Hacid, 2000) l'auteur considère des coûts de lancement constants pour chacun des produits, alors que dans notre cas nous associons à chacune des machines un coût de lancement d'un lot indépendamment du produit lancé.

La différence majeure réside dans le fait que dans le cas d'étude de (Hacid, 2000), l'auteur impose à la durée de cycle de production d'être *un multiple entier* des cycles de livraison des produits, alors que dans notre étude nous considérons un cas plus général où la durée du cycle de production peut être *ou pas un multiple entier* des cycles de livraisons.

4.3.3. Comparaisons des deux approches

Les deux approches diffèrent sur plusieurs angles. D'une part, l'auteur de (Hacid, 2000) détermine d'abord les cycles de production de chacun des produit pris séparément et impose à sa durée d'être un multiple entier de sa durée de cycle de livraison ; alors que dans notre cas nous traitons l'ensemble de tous les produits pris simultanément et étudions les cas où la durée du cycle de production peut être *ou pas un multiple entier* des durées des cycles de livraisons des produits.

D'autre part, et afin de déterminer les quantités à lancer dans l'approche de (Hacid, 2000), l'auteur effectue des groupages des ordres de livraisons successives alors que nous procédons dans notre cas d'étude à la détermination de ces quantités, soit considérant la politique de production lot pour lot (pour le cas où la durée du cycle de production est multiple entier de la durée du cycle de livraison), soit en résolvant un modèle mathématique linaire (pour le cas où la durée du cycle de production *n'est pas multiple entier* de la durée du cycle de livraison).

L'auteur (Hacid, 2000) détermine le cycle de production en calculant le plus petit commun multiple (PPCM) des cycles de production pour vérifier par la suite sa réalisabilité en regard des capacités, alors que dans notre cas, nous vérifiions d'abord la condition nécessaire et suffisante de réalisabilité des quantités à produire sur la durée du cycle de production considérée (décrite dans la section 3.4).

Nous soulignons que dans (Hacid, 2000) l'auteur ne propose pas de calendrier d'opérations sdes quantités à fabriquer, alors que nous procédons dans notre cas, à l'ordonnancement de celles-ci.

4.4. Adaptation proposée de la méthode de (Hacid, 2000)

Afin de pouvoir effectuer la comparaison des performances des deux approches (celle que l'on a proposée et celle proposée dans (Hacid, 2000), en les testant sur un même ensemble de benchmarks, nous ramenons d'abord les deux approches à un même contexte d'application.

Nous considérons un atelier de type Flow Shop pur, constitué de plusieurs machines et fabricant différents produits, et nous supposons que la capacité de production est suffisante pour répondre à la demande.

Nous présentons ci-après comment se fera, selon la méthode de Hacid, le calcul et l'estimation des fonctions de stocks et de coût relatives au groupage de x livraisons pour notre type d'atelier (Flow Shop pur).

Selon (Hacid, 2000), la fonction de stock relative au groupage de x livraisons d'un produit i est égale à $Q_i.(tf_i + tv_i Q_i) + \sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it}$ avec $Q_i = \sum_{t=1}^{x} d_{it}$ la quantité du lot à lancer. Dans cette équation le terme tf_i représente le temps fixe de lancement du produit i qui correspond, dans notre cas d'étude à la somme des temps des lancements sur toutes les machines ($tf_i = \sum_{j=1}^{M} S_j$).

Le terme tv_i détermine le temps de fabrication du produit i lequel est proportionnel à la quantité lancée du produit. Dans le cas d'une fabrication en ligne (Flow Shop pur) l'auteur (Hacid, 2000) considère ce temps égal à la somme des temps opératoires du produit i sur toutes les machines ($tv_i = \sum_{j=1}^{M} t_{ij}$).

Ainsi, la fonction de stock d'un groupage de x livraisons d'un produit i est donnée par la équation suivante:

$$Q_i.(\sum_{j=1}^{M} S_j + \sum_{j=1}^{M} t_{ij} Q_i) + \sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it} . \qquad (4.5)$$

D'où la fonction relative au coût de stockage de x livraisons d'un produit i est égale à $CS_i.(Q_i.(\sum_{j=1}^{M} S_j + \sum_{j=1}^{M} t_{ij} Q_i) + \sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it})$ avec CS_i le coût du stockage du produit i.

La fonction relative au coût de groupage de x livraisons d'un produit i est égale à $CT_{ix} = CL_i + CS_i.(Q_i.(\sum_{j=1}^{M} S_j + \sum_{j=1}^{M} t_{ij} Q_i) + \sum_{t=1}^{x}(t-1).d_{it})$ avec CL_i le coût de lancement du

produit i. Notons que ce coût de lancement sera égal à la somme des coûts de lancement du produit i sur l'ensemble de toutes les machines $CL_i = \sum_{j=1}^{M} cl_j$.

Par conséquent, l'estimation de la fonction coût relative à un groupage de x livraisons du produit i sera donnée par l'équation suivante :

$$CT_{ix} = \sum_{j=1}^{M} cl_j + CS_i.(Q_i.(\sum_{j=1}^{M} S_j + \sum_{j=1}^{M} t_{ij} Q_i) + \sum_{t=1}^{x} (t-1).d_{it}) \qquad (4.6).$$

Avant de présenter une étude comparative des performances de l'application des deux approches, sur un même ensemble de benchmarks, nous commençons d'abord par exposer la manière dont nous avons conçu le générateur de ces benchmarks.

4.5. Générateur de problèmes aléatoires

Nous proposons d'appliquer les méthodes décrites précédemment et de les tester sur un ensemble de trois cents soixante (360) problèmes fictifs reproduits de façon aléatoire et respectant les traits caractéristiques des problèmes réels.

Ces problèmes fictifs, d'atelier de type Flow Shop, sont issus d'un générateur que l'on a conçu sous Visual Basic Entreprise 6.0 de la manière suivante :

Nous distinguons deux catégories de données, celles fixées au préalable, d'autres tirées aléatoirement suivant une loi bien définie.

Données fixées

Nous énumérons dans ce qui suit l'ensemble des données fixées au préalable :

A. Nombre de machines et nombre de produits

Afin de mener une étude diversifiée prenant en compte différents types d'ateliers, nous proposons de nous intéresser aux classes d'ateliers illustrées par la Figure 4.2 ci-après :

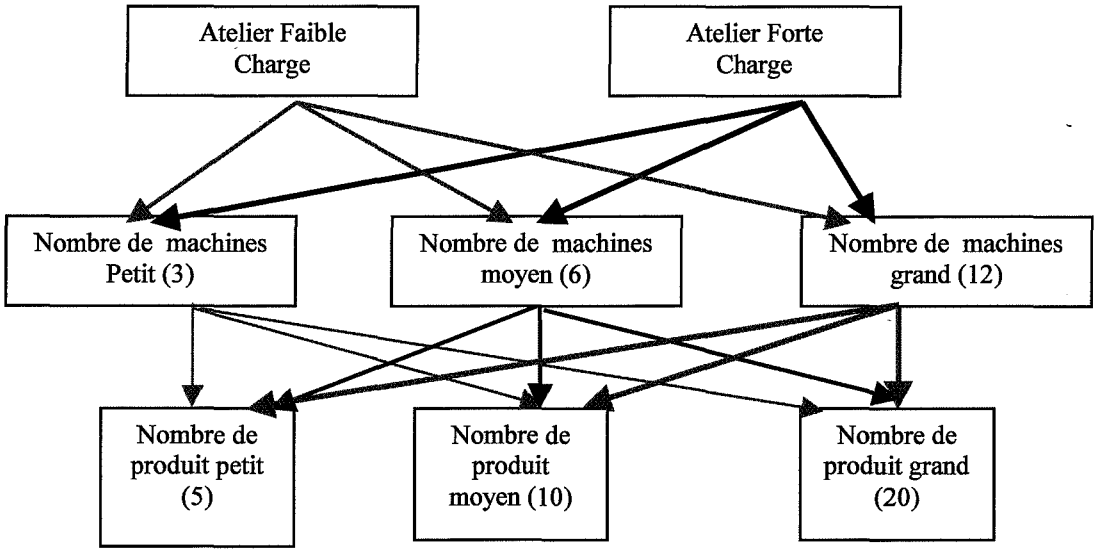


Figure 4. 2.Les différentes classes d'ateliers à traiter

B. Taux d'utilisation des machines

Toujours dans l'optique d'étudier et d'analyser, les approches présentées précédemment sur un ensemble de problèmes aléatoires respectant les traits caractéristiques des problèmes réels, nous avons généré des exemples de problèmes où le taux d'utilisation des machines est autour de 50% ou 80%.

C. Plages horaires

Nous fixons également le nombre de plages horaires de travail de l'atelier à trois plages :

- ***Première plage horaire*** : de 8 heures à 16 heures
- ***Seconde plage horaire :*** de 16 heures à 8 heures
- ***Troisième plage horaire :*** les fins de semaines (Week end).

Données tirées aléatoirement

Nous énumérons dans ce qui suit, l'ensemble des données tirées aléatoirement, suivant des lois de probabilité bien définies, et respectant les caractéristiques des problèmes réels:

A. Durée du cycle de livraison des produits L_i

Nous proposons de traiter le cas où les durées des cycles de livraison des différents produits L_i varient entre une et deux semaines, $L_i \in \{1\,semaine, 2\,semaines\}$.

B. Demandes d_{it}

Les demandes d_{it} des produits i sur la période t sont tirées aléatoirement suivant une loi Uniforme $d_{it} \approx U[10,100]$.

C. Nombre de lots de chaque produit i

Le nombre de lots n_i de chaque produit i à livrer durant son cycle de livraison L_i ainsi que les jours correspondant à ces livraisons, $n_i \approx U[1,3L_i]$.

D. Durées de lancements (réglages) S_j

La durée de réglages S_j de chacune des machines j nécessaire avant le lancement de chaque lot, $S_{jt} \approx U[15,120]$ avec des sauts de 15 à 20 minutes.

E. Coûts de fabrication, coûts de stockage et coûts de lancements

Nous énumérons dans ce qui suit, les différents coûts engendrés par l'atelier et nous exposons selon quelles lois ils sont générés :

Le coût de fabrication CF_{lj} *de la machine* j *à la* l *ème plage horaire :*

Le coût de fabrication de la machine j durant la plage horaire de travail régulière de 8 heures à 16 heures est généré suivant une loi Uniforme $CF_{1j} \approx U[0.2,2]$. Le coût de fabrication concernant la seconde plage horaire de travail, 16 heures à 8 heures, sera égal à $CF_{2j} = 1.2CF_{1j}$.

Enfin le coût de fabrication concernant la dernière plage horaire, fins de semaines, sera égal à $CF_{3j} = 1.5CF_{1j}$.

Le coût de stockage CS_i *du produit* i *:*

Le coût d'une minute de stockage CS_i du produit i suit également une loi Uniforme $CS_i \approx U[0.015, 0.5]$.

Le coût de lancement CL_j d'une machine j :

Le coût d'une minute de réglage d'une machine j est égal au coût d'une minute de fabrication de la première plage horaire de celle-ci.

F. Temps opératoires P_{ij} nécessaires pour la fabrication d'une unité de produit i sur la machine j

Dans le but de générer les temps opératoires P_{ij} nécessaires pour la fabrication d'une unité de produit i sur la machine j, nous procédons comme suit :

Nous tirons, dans un premier temps, d'une manière aléatoire, les temps opératoires « calculés » que nécessite une unité de produit i sur la machine j, soient $P_{ij}^C \approx U[5,10]$;

Nous calculons par la suite le taux d'utilisation μ_j^C de chacune des machines selon la formule suivante :

$$\mu_j^C = \sum_i \left(\frac{n_i . S_j + \sum_t d_{it} . p_{ij}^c}{L_i . 7.24.60} \right) \qquad (4.7)$$

Nous tirons par la suite d'une manière aléatoire le taux d'utilisation souhaitée μ_j^S de chacune des machines j suivant une loi Uniforme $\mu_j^S \approx U[0.4,0.6]$ ou $\mu_j^S \approx U[0.7,0.9]$;

Ainsi nous procédons à une correction sur les temps opératoires en calculant P_{ij}^S de la manière suivante:

$$p_{ij}^S = p_{ij}^C . (\mu_j^S / \mu_j^C) \qquad (4.8)$$

Nous procédons par la suite à la correction des temps de lancement S_j

$$\mu_j^S = \sum_i \left(\frac{n_i .S_j + \sum_t d_{it}.p_{ij}^S}{L_i.7.24.60} \right) = \sum_i \frac{n_i .S_j}{L_i.7.24.60} + \sum_i \sum_t \frac{d_{it}.p_{ij}^S}{L_i.7.24.60} \qquad (4.9)$$

D'où

$$S_j = \left(\mu_j^S - \sum_i \sum_t \frac{d_{it}.p_{ij}^S}{L_i.7.24.60} \right) / \sum_i \frac{n_i}{L_i.7.24.60} \qquad (4.10)$$

Nous présentons dans la section suivante, les résultats de l'application des méthodes proposées ainsi que l'adaptation de celle proposée dans (Hacid, 2000) et pour laquelle nous appliquons la même méthode d'amélioration que l'on a proposée pour les quatre variantes. Nous proposons également une analyse de ces résultats.

Nous exposons dans l'annexe A, à titre d'exemple, un ensemble de vingt problèmes, fictifs d'ateliers, tirés des trois cents soixante que l'on a générés.

4.6. Résultats numériques

L'objectif de cette section est d'évaluer la qualité des solutions, obtenues par l'application des différentes méthodes exposées précédemment, pour la détermination du meilleur plan de production cyclique. Ces méthodes seront évaluées en mesurant la moyenne de déviation des solutions qu'elles obtiennent par rapport à la meilleure solution trouvée pour chacun des problèmes testés.
Dans cette optique, nous utiliserons les trois cents soixante problèmes fictifs, d'ateliers de tailles différentes, que l'on a générés.

Nous soulignons que ces trois cents soixante problèmes, sont répartis sur dix huit groupes, identifiés par le nombre de machines- nombre de produits- taux d'utilisation de l'atelier, générés (voir Figure 4.2). Chacun de ces groupes est constitué de vingt problèmes.

Nous exposons dans le tableau 4.1, pour chacun des quarante problèmes constituant les deux premiers groupes « M3-N5-Faible » et « M3-N5-Fort », les coûts totaux, engendrés par les plans de production cyclique finaux obtenus par chacune des méthodes étudiées ainsi que les déviations enregistrées par chacune de ces méthodes.

Pour un problème donné, la déviation mesure la qualité de l'application d'une approche sur ce problème. Pour cela, nous mesurons le rapport de l'écart entre la solution obtenue par l'approche et l'optimum du problème que l'on divise par l'optimum du problème.

$$\text{Dév} = (S - S^*)/ S^* \quad \text{avec}$$

S : Solution issue de l'application de l'approche
S* : Solution optimale.

Dans notre cas d'étude nous ne disposons pas de solution optimale des problèmes traités. Nous utilisons pour le calcul de la déviation la meilleure solution obtenue parmi les cinq approches pour chacun des problèmes considérés.
Soient les solutions obtenues suivantes :

- SC_1 SC1 : la solution obtenue par C1 ;
- SC_2 : la solution obtenue par C2 ;
- SN_1 : la solution obtenue par N1 ;
- SN_2 : la solution obtenue par N2 ;
- SH : la solution obtenue par Hacid ;
- SM :la meilleure solution obtenues parmi les cinq approches :

$$SM = Min(SC_1, SC_2, SN_1, SN_2, SH)$$

La déviation issue de l'application de l'approche C1 sur un problème est :

$$Dév(C_1) = (SC_1 - SM) / SM$$

	Coût de la solution					*Moyennes de déviation*				
M3-N 5 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*	*Déviation N1*	*Déviation N2*	*Déviation C1*	*Déviation C2*	*Déviation Hacid*
1	38084,74	38826,425	40891,125	38581,825	70558,750	0	0,019	0,073	0,013	0,852
2	32421,490	32167,990	30216,410	30403,680	52510,310	0,072	0,064	0	0,006	0,737
3	42305,640	37182,530	40858,355	42424,600	59675,140	0,137	0	0,098	0,140	0,604
4	32388,540	32487,600	32131,960	32983,250	60977,150	0,007	0,011	0	0,026	0,897
5	19718,320	19718,320	20207,330	13072,750	30997,350	0,508	0,508	0,545	0	1,371
6	68356,060	67094,870	68397,675	69045,705	83694,090	0,018	0	0,019	0,029	0,247
7	13719,090	13719,090	15400,410	10313,430	99285,700	0,330	0,330	0,493	0	8,626
8	44605,625	45725,745	45141,085	43651,420	58501,330	0,021	0,047	0,034	0	0,340
9	77594,365	77766,575	78538,115	77515,765	82757,220	0,001	0,003	0,013	0	0,067
10	42453,150	42453,150	41946,630	44060,330	64761,830	0,012	0,012	0	0,050	0,543
11	59188,990	59144,090	59241,810	59241,810	58881,820	0,005	0,004	0,006	0,006	0
12	33132,745	33086,545	33447,325	33132,745	36813,010	0,001	0	0,010	0,001	0,112
13	69906,895	66665,940	64852,675	63810,905	124238,18	0,095	0,044	0,016	0	0,946
14	87144,435	87396,905	87260,285	87203,315	118773,69	0	0,002	0,001	0	0,362
15	51542,490	53974,550	53974,550	53974,550	69451,630	0	0,047	0,047	0,047	0,347
16	34572,970	35345,095	35192,175	35192,175	41763,750	0	0,022	0,017	0,017	0,207
17	69467,560	69467,560	67610,180	67610,180	73798,940	0,027	0,027	0	0	0,091
18	40816,100	40816,100	40070,690	40070,690	47805,540	0,018	0,018	0	0	0,193
19	70284,895	69796,275	70122,840	69908,125	80916,230	0,007	0	0,004	0,001	0,159
20	24158,990	25984,290	26760,410	26476,400	62750,030	0	0,075	0,107	0,095	1,597
M3-N 5 Fort										
1	66697,800	66763,535	66191,290	66697,800	95412,640	0,007	0,008	0	0,007	0,441
2	84560,060	84613,420	86483,910	84475,825	124472,56	0	0,001	0,023	0	0,473
3	79017	76780,600	80636,690	80636,690	105347,40	0,029	0	0,050	0,05	0,372
4	44156,555	44403,055	43538,620	44467,785	73533,070	0,014	0,019	0	0,021	0,688
5	37740,550	34030,590	38365,190	35190,650	43341,720	0,109	0	0,127	0,034	0,273
6	67820,250	67505,550	69530,720	53490,170	106833,16	0,267	0,262	0,299	0	0,997
7	74705,355	74086,375	77847,690	76552,560	105214,59	0,008	0	0,050	0,033	0,42
8	44580,860	43863,675	43894,850	44607,410	52658,580	0,016	0	0	0,016	0,2
9	102788,95	103171,16	97239,280	96169,500	126098,24	0,068	0,072	0,011	0	0,311
10	47284,235	45741,050	46281,415	48331,195	56946,460	0,033	0	0,011	0,056	0,244
11	114785,27	118994,87	111954,89	116713,97	205555,89	0,025	0,062	0	0,042	0,836
12	116325,34	117037,80	116867,27	112318,53	144293,66	0,035	0,042	0,040	0	0,284
13	66812,170	66430,680	68496,700	66913,610	148381,40	0,005	0	0,031	0,007	1,233
14	64182,070	48914,310	69127,260	48914,310	101646,46	0,312	0	0,413	0	1,078
15	59269,935	62617,990	64650,880	59452,600	85399,750	0	0,056	0,090	0,003	0,44
16	67116,700	67116,700	66858,650	65685,590	107861,12	0,021	0,021	0,017	0	0,642
17	85275,460	80703,510	84526,455	80638,130	108288,56	0,057	0	0,048	0	0,342
18	52395,160	46793,515	52676,345	46793,515	86842,210	0,119	0	0,125	0	0,855
19	105622,08	103423,78	108709,45	103423,78	139895,52	0,021	0	0,051	0	0,352
20	51387,670	48301,940	47949,625	47949,625	73554,77	0,071	0,007	0	0	0,534

TAB.4. 1. Coûts des solutions et moyennes de déviations obtenus par l'application des cinq méthodes sur les deux premiers groupes de problèmes

Les coûts totaux ainsi que les moyennes de déviations des trois cents vingt autres problèmes répartis sur les seize groupes restants sont donnés en annexe B.

Les temps d'obtention des plans de production, pour les trois cents soixante problèmes, enregistrés par les méthodes testées sont également donnés dans l'annexe B.

4.7. Analyse des résultats

Nous consacrons, cette section à l'analyse des résultats obtenus à l'issue de l'application des méthodes que l'on a proposées ainsi que la méthode proposée dans (Hacid, 2000) aux trois cents soixante problèmes fictifs que l'on a générés. Ces problèmes sont répartis en dix huit groupes, contenant chacun vingt problèmes, identifiés comme illustré dans la Figure 4.2 par le nombre de machines, nombre de produits et le taux d'utilisation de l'atelier.

La table ci-dessous synthétise l'ensemble des déviations moyennes, de la meilleure solution, issues de l'application des différentes approches que l'on a proposées (N1, N2, C1 et C2) sur chacun des dix huit groupes de problèmes identifiés par le nombre de machines- nombre de produits- taux d'utilisation de l'atelier, où chacun de ces derniers est constitué de vingt problèmes, ainsi que celles obtenues par l'application de l'approche proposée dans (Hacid, 2000) sur ces mêmes groupes de problèmes.

Groupes	M	N	Taux d'utilisation	N1	N2	C1	C2	Hacid
1	3	5	Faible	0,062	0,061	0,074	0,021	0,914
2	3	5	Fort	0,06	0,027	0,069	0,013	0,55
3	3	10	Faible	0,065	0,031	0,061	0,036	0,539
4	3	10	Fort	0,028	0,02	0,041	0,022	0,364
5	3	20	Faible	0,046	0,018	0,061	0,013	0,55
6	3	20	Fort	0,053	0,029	0,036	0,034	0,861
7	6	5	Faible	0,38	0,361	0,386	0,355	0,152
8	6	5	Fort	0,147	0,121	0,155	0,12	0,179
9	6	10	Faible	0,044	0,033	0,068	0,038	0,207
10	6	10	Fort	0,036	0,04	0,032	0,022	0,248
11	6	20	Faible	0,025	0,013	0,034	0,008	0,331
12	6	20	Fort	0,028	0,019	0,023	0,005	0,333
13	12	5	Faible	0,249	0,195	0,252	0,178	0,188
14	12	5	Fort	0,119	0,103	0,121	0,107	0,282
15	12	10	Faible	0,144	0,12	0,141	0,117	0,055
16	12	10	Fort	0,117	0,101	0,112	0,095	0,209
17	12	20	Faible	0,038	0,027	0,04	0,02	0,114
18	12	20	Fort	0,023	0,015	0,076	0,067	0,328
Moyenne				0,09	0,07	0,09	0,07	0,35
Min				0	0	0	0	0
Max				2,299	2,299	2,313	2,313	8,626
Nombre de meilleures solutions				59	104	58	139	66
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				41	66	35	97	66
Nombre des pires solutions				39	15	31	19	279
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				29	7	19	9	279

TAB.4. 2. Déviations moyennes pour les groupes identifiés par -nombre de machines-nombre de produits-taux d'utilisation de l'atelier- pour toutes les méthodes

Comme le montre le tableau (TAB.4.2), et pour le cas où l'on considère des groupes de problèmes identifiés par le nombre de machines- nombre de produits- taux d'utilisation de l'atelier, la méthode proposée dans (Hacid, 2000), donne seule un meilleur calendrier des opérations pour 66 problèmes sur les 360 considérés, soit 18,33% des problèmes traités (voir figure (Figure 4.3).

De plus, la méthode proposée dans (Hacid, 2000) donne seule 279 mauvaises (pires) solutions sur l'ensemble des problèmes considérés, soit un taux 77,5% contre 8,5% de mauvaises solutions pour la méthode N1, 1,94% pour la méthode N2, 5,27% pour la méthode C1 et 2,5% pour la méthode C2.

Ces résultats traduisent la performance des approches que l'on a proposées comparativement à celle proposée dans (Hacid, 2000). Une performance que l'on associe aux facteurs suivants :

- Le premier facteur traduit le fait, qu'en plus de considérer des temps de cycle de production *multiple entier* des cycles de livraison des produits -hypothèse proposée dans (Hacid, 2000)-, nous considérons, dans les méthodes que l'on propose des temps de cycles de production lesquels ne sont pas nécessairement multiple *entier* des cycles de livraisons des produits.

  En effet, cette considération offre un ensemble de solutions faisable plus grand, comparativement à celui obtenu dans (Hacid, 2000).

  Notons également que les quantités à lancer de chaque produit, pour le cas où le temps de cycle de production n'est pas multiple entier du cycle de livraison du produit, sont déterminées d'une manière optimale à l'issue de la résolution du programme mathématique, minimisant les stocks, proposé dans la section 3.3.2, lequel favorise la politique de fabrication lot pour lot et par conséquent un mode de fabrication en juste à temps.
- Le second facteur, à la base de la performance des approches que l'on propose comparativement à celle proposée dans (Hacid, 2000), est la détermination des séquences de passage des lots de fabrication dans l'atelier. En effet, et contrairement à l'approche proposée dans (Hacid, 2000), nous déterminons, dans chacune des approches que l'on propose des séquences de lancement des lots minimisant au plus le séjour de ces derniers dans l'atelier. Ceci a une influence positive et directe sur les coûts de stockage des produits.

Pour les performances des quatre approches que l'on a proposées, elles sont plus ou moins proches.

Comme le montre le tableau (TAB. 4.2), les moyennes des déviations pour les quatre approches sont de la même grandeur de valeur, cependant la méthode C2 avec une moyenne de 0,07 détermine dans la majorité des problèmes traités le meilleur calendrier des opérations à coût minimum, et moins souvent le plus mauvais calendrier des opérations. En effet, sur les 360 problèmes traités C2 trouve seule, la meilleure solution pour 97 problèmes contre 41 pour N1, 66 pour N2 et 35 pour C1, et trouve seule la plus mauvaise solution que pour 9 problèmes des 360 traités contre 29 pour N1, 7 pour N2 et 19 pour C1.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des 360 problèmes traités.

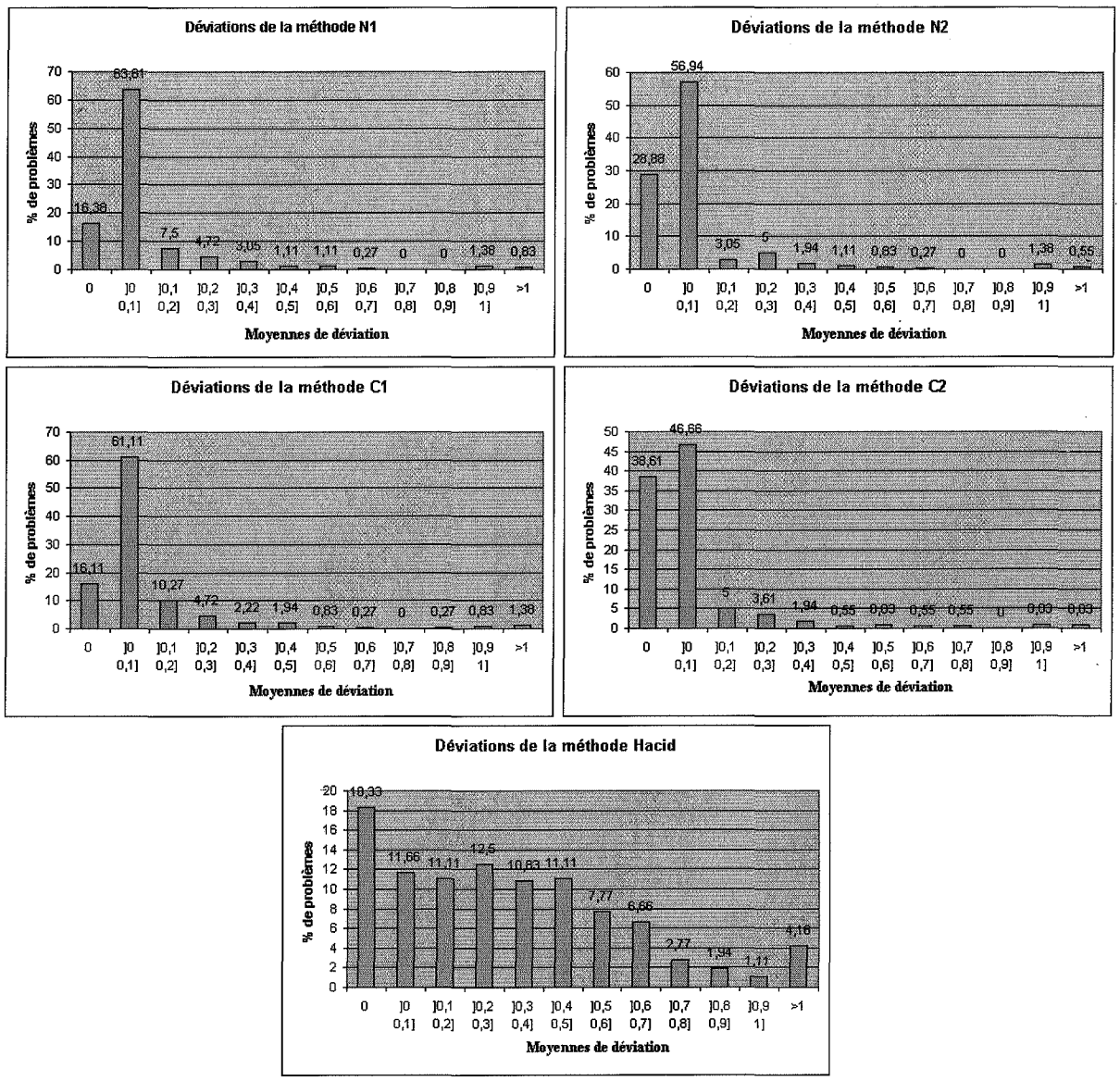


Figure 4. 3. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de problèmes identifiés par - nombre de machines-nombre de produits-taux d'utilisation de l'atelier

Comme illustré dans la Figure 4.3, la méthode N2 donne de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0,1 pour un total de 85,82% des trois cents soixante problèmes considérés, contre 85,27% des problèmes pour C2, 79,99% de problèmes pour N1, 77,22% des problèmes pour C1 et seulement 29,99% de problèmes pour (Hacid, 2000). De plus, cette dernière méthode (celle proposée par (Hacid, 2000)) donne pour 65,8% des problèmes une déviation moyenne entre 0,1 et 1 contre 19,14% des problèmes pour N1 et 13,58% des problèmes pour N2, 21,35% pour C1 et 13,86% pour C2.
De même, la méthode proposée dans (Hacid, 2000), donne pour 4,16% des problèmes testés une moyenne de déviation strictement supérieure à 1 alors que les méthodes N1 (resp.N2, C1, C2) enregistrent des moyennes de déviation strictement supérieure à 1 pour 0,83% des problèmes testés (resp.0,55%, 1,38 % et 0,83%).

Nous allons à présent, présenter une étude comparative des différentes méthodes sur trois classes de problèmes. La première est identifiée selon le nombre de machines et est composée des problèmes à 3, 6 et 12 machines. La seconde classe est identifiée selon le nombre de produits et est composée des problèmes à 5, 10 et 20 produits. La dernière classe que l'on considère est identifiée suivant le taux d'utilisation de l'atelier et est composée des problèmes à faibles et à fortes charges.

Classe de problèmes identifiée par le nombre de machines

Le tableau suivant synthétise, les moyennes de déviations, des méthodes proposées, pour l'ensemble des problèmes à 3 machines :

Groupes	M	N	Taux d'utilisation	N1	N2	C1	C2	HACID
1	3	5	Faible	0,062	0,061	0,074	0,021	0,914
2	3	5	Fort	0,060	0,027	0,069	0,013	0,550
3	3	10	Faible	0,065	0,031	0,061	0,036	0,539
4	3	10	Fort	0,028	0,020	0,041	0,022	0,364
5	3	20	Faible	0,046	0,018	0,061	0,013	0,550
6	3	20	Fort	0,053	0,029	0,036	0,034	0,861
Moyenne				0,050	0,030	0,050	0,020	0,630
Min				0	0	0	0	0
Max				0,508	0,508	0,545	0,169	8,626
Nombre de meilleures solutions				22	42	24	49	1
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				17	32	17	35	1
Nombre des pires solutions				0	0	1	1	119
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				0	0	0	0	119

TAB.4. 3. Déviations moyennes pour les groupes de trois machines

Comme le montre TAB.4.3, la méthode C2 enregistre la plus faible moyenne de déviation 0,02. La méthode N2 (resp. N1, C1) enregistre avec 0,03 (resp. 0,05, 0,05) une moyenne de déviation du même ordre que celle enregistrée par C2. La méthode proposée dans (Hacid, 2000) , quant à elle, enregistre la plus forte moyenne de déviation pour cette classe de problèmes à trois machines, soit 0.63.

De plus, la méthode proposée dans (Hacid, 2000) trouve, seule, la plus pire solution dans 119 problèmes des 120 problèmes à 3 machines, soit 99,16%.

La méthode C2 donne, quant à elle, les meilleurs résultats pour cette classe de problèmes à 3 machines et trouve, seule, le meilleur cycle de production pour 35 problèmes des 120 considérés contre 17 pour N1, 32 pour N2, 17 pour C1.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des problèmes à trois machines.

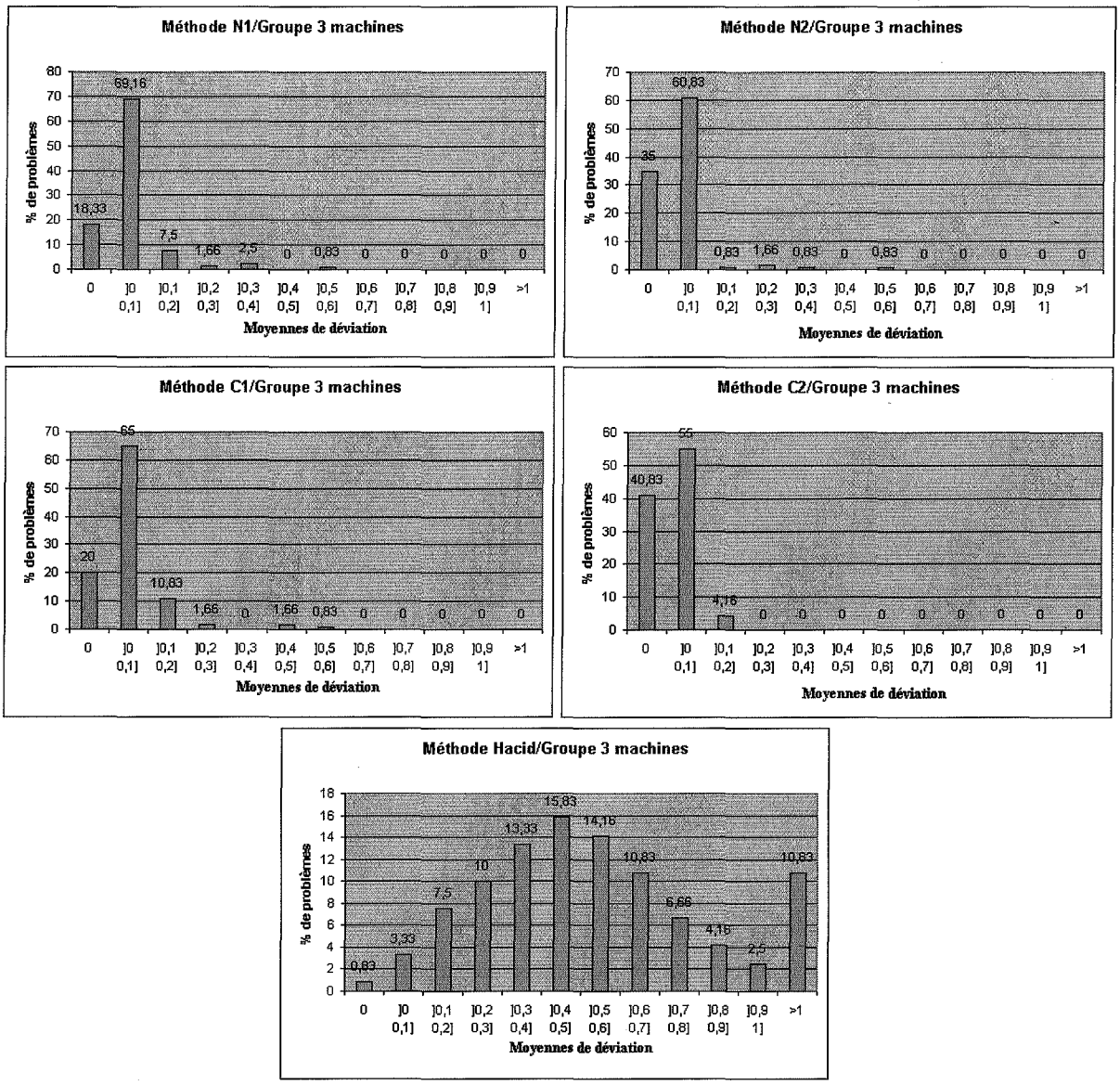


Figure 4. 4.Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de trois machines

Comme illustré dans la Figure 4.4. ci-dessus, et en plus de ce qui a cité précédemment, la méthode C2 donne avec la méthode N2 de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0,1 pour un total de 95,83% des cent vingt problèmes considérés, contre 87,49% des problèmes pour N1, 85% des problèmes pour C1 et 4,16% des problèmes pour la méthode proposée dans (Hacid, 2000).

Le tableau suivant synthétise, les moyennes de déviations, des méthodes proposées, pour l'ensemble des problèmes à 6 machines :

Groupes	M	N	Taux d'utilisation	N1	N2	C1	C2	HACID
1	6	5	Faible	0,380	0,361	0,386	0,355	0,152
2	6	5	Fort	0,147	0,121	0,155	0,120	0,179
3	6	10	Faible	0,044	0,033	0,068	0,038	0,207
4	6	10	Fort	0,036	0,040	0,032	0,022	0,248
5	6	20	Faible	0,025	0,013	0,034	0,008	0,331
6	6	20	Fort	0,028	0,019	0,023	0,005	0,333
Moyenne				0,110	0,090	0,110	0,090	0,240
Min				0	0	0	0	0
Max				2,299	2,299	2,313	2,313	1
Nombre de meilleures solutions				15	29	18	51	23
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				13	19	12	38	23
Nombre des pires solutions				13	5	13	3	92
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				11	4	9	0	92

TAB.4. 4. Déviations moyennes pour les groupes de six machines

Nous remarquons, dans ce cas, où le nombre de machines passe de trois à six machines, que la méthode proposée par (Hacid, 2000), enregistre la plus grande moyenne de déviation, soit 0,24 avec seulement 23 meilleurs plans de production et 92 pires plans de production sur les 120 problèmes testés. La méthode C2, quant à elle, donne toujours seule le plus grand nombre de meilleurs plans de production, soit 38, avec la plus faible moyenne de déviation, soit 0,09. Les moyennes de déviations enregistrées par les trois autres méthodes que l'on a proposées, sont plus ou moins de la même grandeur de valeur, avec un nombre de meilleurs plans de production obtenus moindre que celui trouvé par C2.

De même, et comme le montre le tableau ci-dessus, C2 ne trouve jamais seule la pire solution pour ces 120 problèmes testés pour ce cas d'étude (ateliers à six machines), alors que les

autres méthodes N1, N2, C1 enregistrent à elles seules respectivement 11, 4 et 9 pires solutions pour les 120 problèmes considérés.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des problèmes six machines :

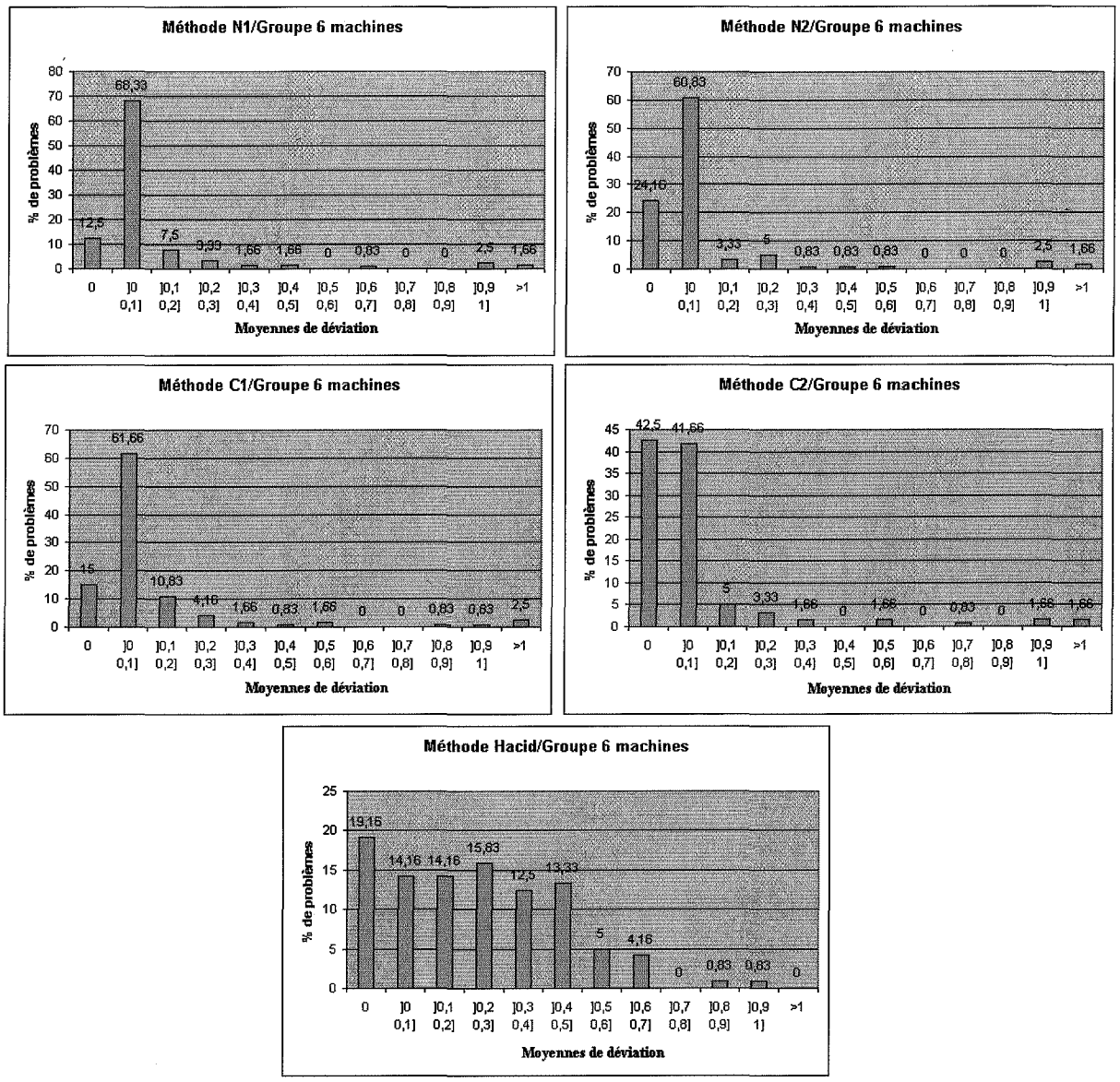


Figure 4. 5.Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de six machines

Comme illustré dans la Figure 4.5. ci-dessus, la méthode N2 donne pour ce cas d'étude, de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0,1 pour un total de 84,99% des cent vingt problèmes considérés, contre 84,16% des problèmes pour C2, 80,83% des problèmes pour N1, 76,66% de problèmes pour C1 et seulement 33,32% de problèmes pour (Hacid, 2000). De plus, cette dernière méthode (celle proposée dans (Hacid, 2000)) donne pour 66,64% des problèmes une déviation moyenne entre 0,1 et 1 contre 17,48% des problèmes pour N1 et 13,32% des problèmes pour N2, 20,8% pour C1 et 14,14% pour C2.

Nous étudions à présent, le cas d'ateliers, considérant 12 machines et nous présentons ci-après, le tableau synthétisant les moyennes de déviations, des méthodes proposées, pour l'ensemble des problèmes considérés :

Groupes	M	N	Taux d'utilisation	N1	N2	C1	C2	HACID
1	12	5	Faible	0,249	0,195	0,252	0,178	0,188
2	12	5	Fort	0,119	0,103	0,121	0,107	0,282
3	12	10	Faible	0,144	0,120	0,141	0,117	0,055
4	12	10	Fort	0,117	0,101	0,112	0,095	0,209
5	12	20	Faible	0,038	0,027	0,040	0,020	0,114
6	12	20	Fort	0,023	0,015	0,076	0,067	0,328
Moyenne				0,110	0,090	0,120	0,090	0,190
Min				0	0	0	0	0
Max				1,158	0,989	1,151	1,115	1,595
Nombre de meilleures solutions				22	33	16	39	42
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				11	15	6	24	42
Nombre des pires solutions				26	10	17	15	68
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				18	3	10	9	68

TAB.4. 5. Déviations moyennes pour les groupes de douze machines

Pour ce cas d'étude, les méthodes N2 et C2 enregistrent la plus faible moyenne de déviation comparativement aux autres méthodes, soit 0,09 contre 0,11 pour N1, 0,12 pour C1. La méthode proposée dans (Hacid, 2000), enregistre une fois de plus une plus forte moyenne de déviation avec 68 pires solutions, à elle seule, sur les 120 problèmes considérés.
Cependant, même si la méthode proposée dans (Hacid, 2000) donne la plus grande moyenne de déviation, pour ce cas, ateliers à 12 machines, elle enregistre à elle seule 42 meilleures solutions contre 11 pour N1, 15 pour N2, 6 pour C1 et 24 pour C2.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des problèmes à douze machines.

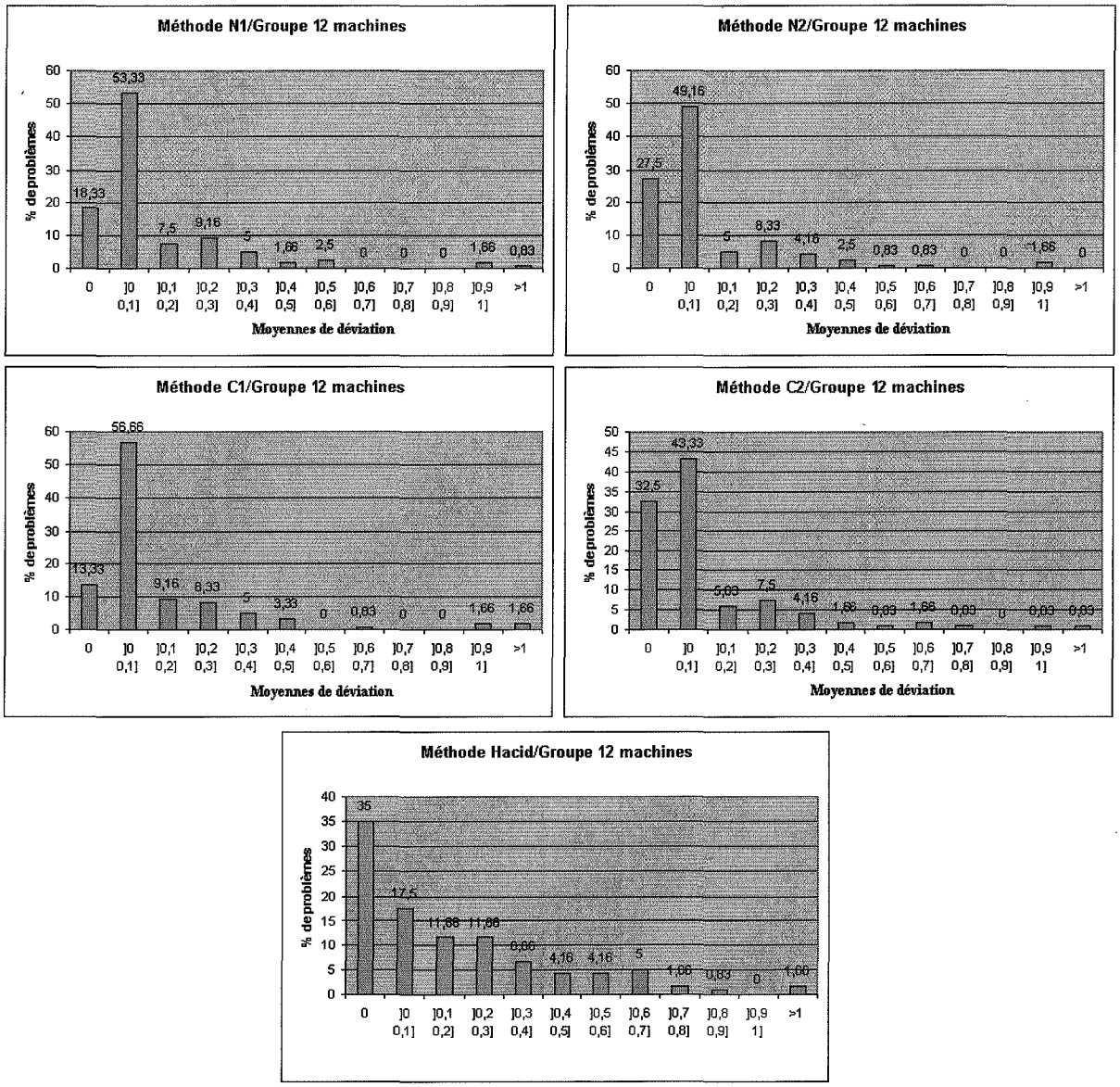


Figure 4. 6.Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de douze machines

Comme illustré dans la Figure 4.6. ci-dessus, la méthode N2 donne de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0,1 pour un total de 76,66% des cent vingt problèmes considérés, contre 75,83% des problèmes pour C2, 71,66% de problèmes pour N1, 69,99% des problèmes pour C1 et seulement 52,5% de problèmes pour (Hacid, 2000). De plus, cette dernière méthode donne pour 45,79% des problèmes une déviation moyenne entre 0,1 et 1, contre 27,48% des problèmes pour N1, 23,31% des problèmes pour N2, 28,31% pour C1 et 23,3% pour C2.

Classe de problèmes identifiée par le nombre de produits

Le tableau suivant synthétise, les moyennes de déviations, des méthodes proposées, pour l'ensemble des problèmes à 5 produits :

Groupes	N	M	Taux d'utilisation	N1	N2	C1	C2	HACID
1	5	3	Faible	0,062	0,061	0,074	0,021	0,914
2	5	3	Fort	0,060	0,027	0,069	0,013	0,550
3	5	6	Faible	0,380	0,361	0,386	0,355	0,152
4	5	6	Fort	0,147	0,121	0,155	0,120	0,179
5	5	12	Faible	0,249	0,195	0,252	0,178	0,188
6	5	12	Fort	0,119	0,103	0,121	0,107	0,282
Moyenne				0,170	0,140	0,170	0,130	0,370
Min				0	0	0	0	0
Max				2,299	2,299	2,313	2,313	8,626
Nombre de meilleures solutions				25	38	19	41	35
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				13	18	7	19	35
Nombre des pires solutions				17	11	19	10	83
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				8	4	9	2	83

TAB.4. 6. Déviations moyennes pour les groupes de cinq produits

Pour ce cas d'étude et cette classe de problèmes, nous remarquons que les méthodes N2 et C2, détiennent plus ou moins les plus faibles moyennes de déviations soient 0,14 pour N2 et 0,13 pour C2. Les méthodes N1 et C1 enregistrent quant à elles des moyennes de déviations de 0,17. La méthode proposée dans (Hacid, 2000) enregistre la plus grande moyenne de déviation soit 0,37.

Si l'on observe maintenant le nombre de fois où chacune des méthodes trouve seule le meilleur calendrier des opérations sur les 120 problèmes considérés, pour cette classe d'ateliers produisant cinq produits, on remarque que la méthode proposée dans (Hacid, 2000)

enregistre à elle seule 35 meilleures solutions et 83 pires solutions sur les 120 considérés. La méthode C2 offre, seule, 19 meilleurs calendriers des opérations et 2 pires sur les 120 mêmes problèmes contre 18 meilleurs plans de production et 4 pires pour N2, 13 meilleurs et 8 pires plan de production pour N1 et enfin 7 meilleurs plans de production et 9 pires pour la méthode C1.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des problèmes à cinq produits.

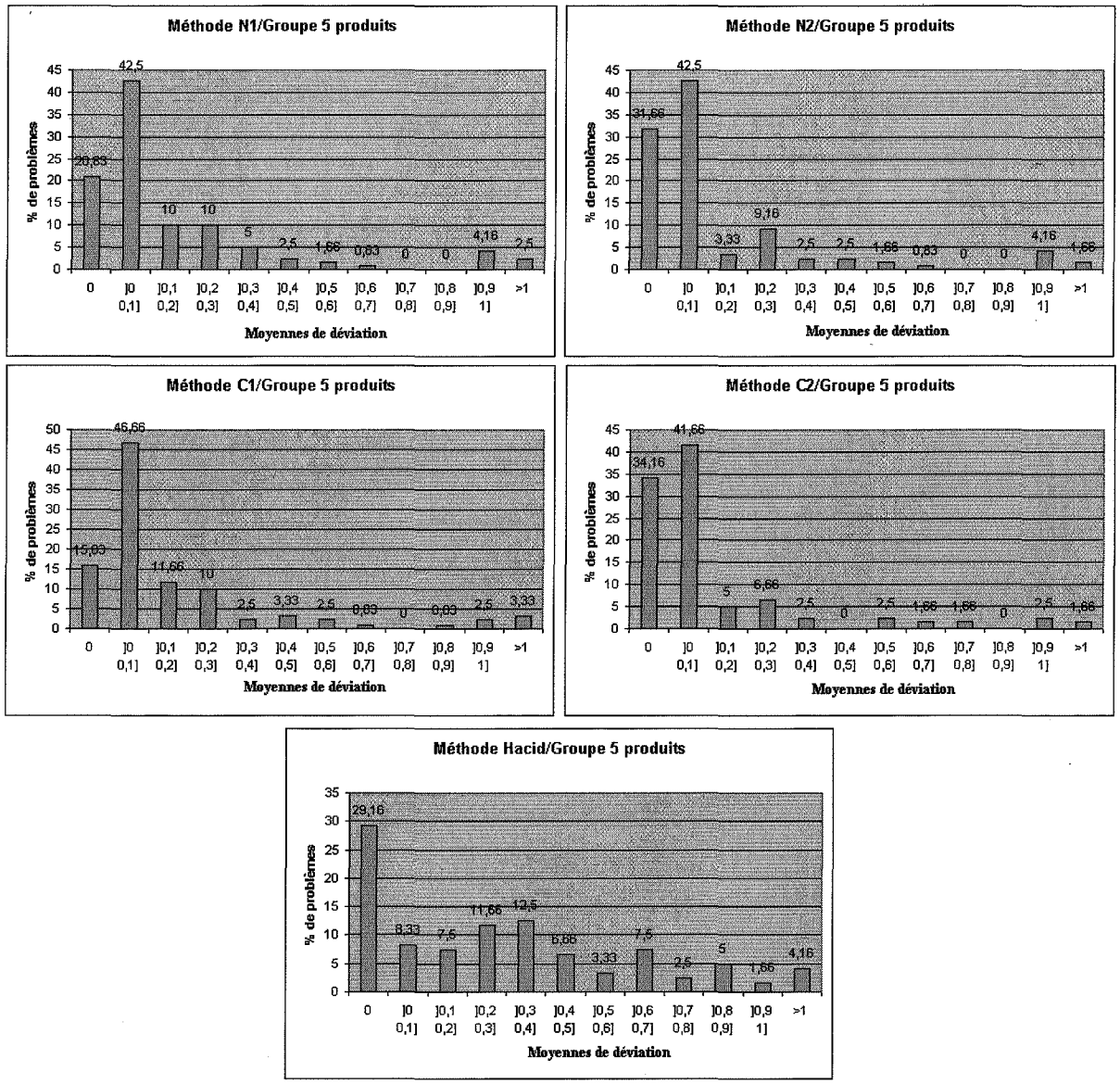


Figure 4. 7. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de cinq produits

Comme illustré dans la Figure 4.7., la méthode C2 donne de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0,1 pour un total de 75,82% des cent vingt problèmes considérés, contre 74,16% pour N2, 62,49% pour C1, 63,33% pour N1 et seulement 37,49% de problèmes pour (Hacid, 2000). De plus, cette dernière méthode donne pour 58,31% des problèmes une déviation moyenne entre 0,1 et 1, contre 34,15% des problèmes pour N1, 24,14% pour N2, 34,15% pour C1 et 22,48% pour C2.

Observons à présent, les résultats pour le cas d'ateliers fabricant dix produits. Le tableau synthétisant, les moyennes de déviations, des méthodes proposées, pour l'ensemble des problèmes de cette classe est le suivant :

Groupes	N	M	Taux d'utilisation	N1	N2	C1	C2	HACID
1	10	3	Faible	0,065	0,031	0,061	0,036	0,539
2	10	3	Fort	0,028	0,020	0,041	0,022	0,364
3	10	6	Faible	0,044	0,033	0,068	0,038	0,207
4	10	6	Fort	0,036	0,040	0,032	0,022	0,248
5	10	12	Faible	0,144	0,120	0,141	0,117	0,055
6	10	12	Fort	0,117	0,101	0,112	0,095	0,209
Moyenne				0,070	0,050	0,070	0,050	0,270
Min				0	0	0	0	0
Max				0,507	0,502	0,482	0,471	1,391
Nombre de meilleures solutions				21	31	13	46	26
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				16	20	7	35	26
Nombre des pires solutions				15	3	9	8	88
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				14	2	7	6	88

TAB.4. 7. Déviations moyennes pour les groupes de dix produits

La meilleure moyenne de déviation enregistrée, pour ce cas d'étude, est de 0,05 par les deux méthodes N2 et C2. Ces dernières offrent, seules, 20 (resp. 35) fois la meilleure solution et 2 (resp. 6) fois seulement la pire solution sur les 120 problèmes considérés. La méthode proposée dans (Hacid, 2000) quant à elle enregistre la plus forte moyenne de déviation, soit 0,27 et 88 pires solutions à elle seule et 26 meilleures solutions sur les 120 mêmes problèmes considérés.

Les autres méthodes marquent des moyennes de déviations du même ordre de grandeur que N2 et C2 et offrent un nombre de meilleures solutions moindre à C2 et un nombre de pires solutions supérieur à cette dernière.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des problèmes à dix produits.

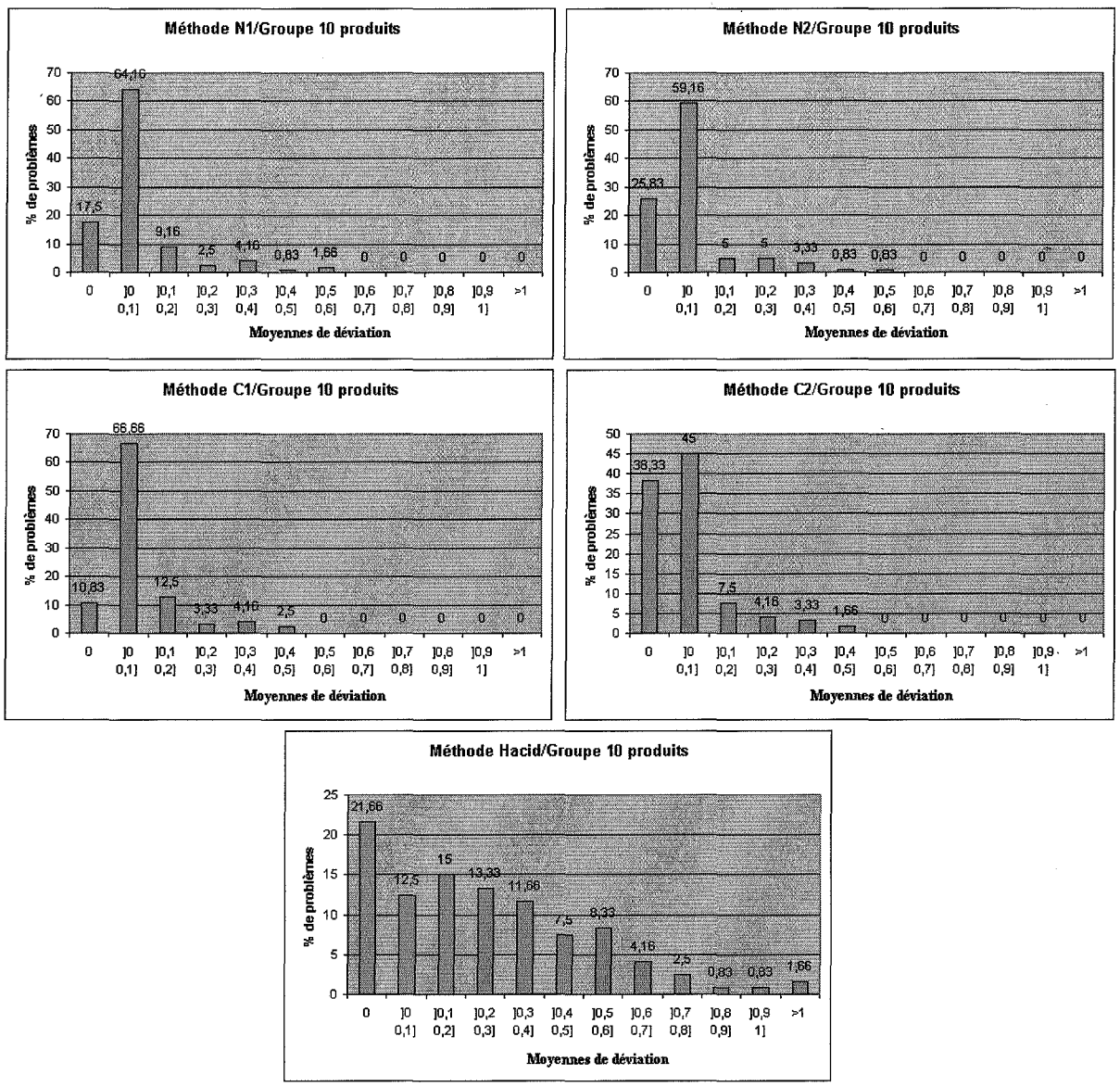


Figure 4. 8. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de dix produits

Comme illustré dans la figure, la méthode N2 donne de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0,1 pour un total de 84,99% des cent vingt problèmes considérés, contre 83,33% des problèmes pour C2, 81,66% de problèmes pour N1, 77,49% des problèmes pour C1 et seulement 34,16% de problèmes pour (Hacid, 2000). De plus, cette dernière méthode (celle proposée dans (Hacid, 2000)) donne pour 64,14% des problèmes une déviation moyenne entre 0,1 et 1, contre 18,31% des problèmes pour N1, 14,99% des problèmes pour N2, 22,49% pour C1 et 16,65% pour C2.

Nous nous intéressons maintenant à la même classe de problèmes, pour le cas d'ateliers fabricant vingt produits. Le tableau synthétisant, les moyennes de déviations, des méthodes proposées, pour l'ensemble de ces problèmes est le suivant :

Groupes	N	M	Taux d'utilisation	N1	N2	C1	C2	HACID
1	20	3	Faible	0,046	0,018	0,061	0,013	0,550
2	20	3	Fort	0,053	0,029	0,036	0,034	0,861
3	20	6	Faible	0,025	0,013	0,034	0,008	0,331
4	20	6	Fort	0,028	0,019	0,023	0,005	0,333
5	20	12	Faible	0,038	0,027	0,040	0,020	0,114
6	20	12	Fort	0,023	0,015	0,076	0,067	0,328
Moyenne				0,030	0,020	0,040	0,020	0,420
Min				0	0	0	0	0
Max				0,236	0,224	1,123	1,115	1,882
Nombre de meilleures solutions				13	35	26	52	5
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				12	28	21	43	5
Nombre des pires solutions				7	1	3	1	108
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				7	1	3	1	108

TAB.4. 8. Déviations moyennes pour les groupes de vingt produits

Pour ce cas, les méthodes N2 et C2, enregistrent la meilleure moyenne de déviation comparativement aux autres méthodes, soit 0,02 contre 0,42 pour la méthode proposée dans (Hacid, 2000). Les autres méthodes offrent également des solutions dont la moyenne de déviation n'excède pas 0,04.

Si l'on s'intéresse maintenant au nombre de fois où chacune des méthodes est la seule à trouver la bonne et la pire solution, la méthode C2 offre seule 43 meilleurs plans de production et seulement 1 pire sur les 120 problèmes considérés. La méthode N2 quant à elle,

trouve 28 fois, seule, le meilleur plan de production et 1 fois le pire. La méthode C1 enregistre 21 fois seulement la meilleure solution seule et 3 fois la pire. La méthode N1 enregistre 12 fois seulement la meilleure solution seule et 7 fois la pire. Enfin la méthode proposée dans (Hacid, 2000) trouve seule 5 meilleurs plans de production et 108 pires sur les 120 mêmes problèmes considérés.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des problèmes à cinq, dix et vingt produits.

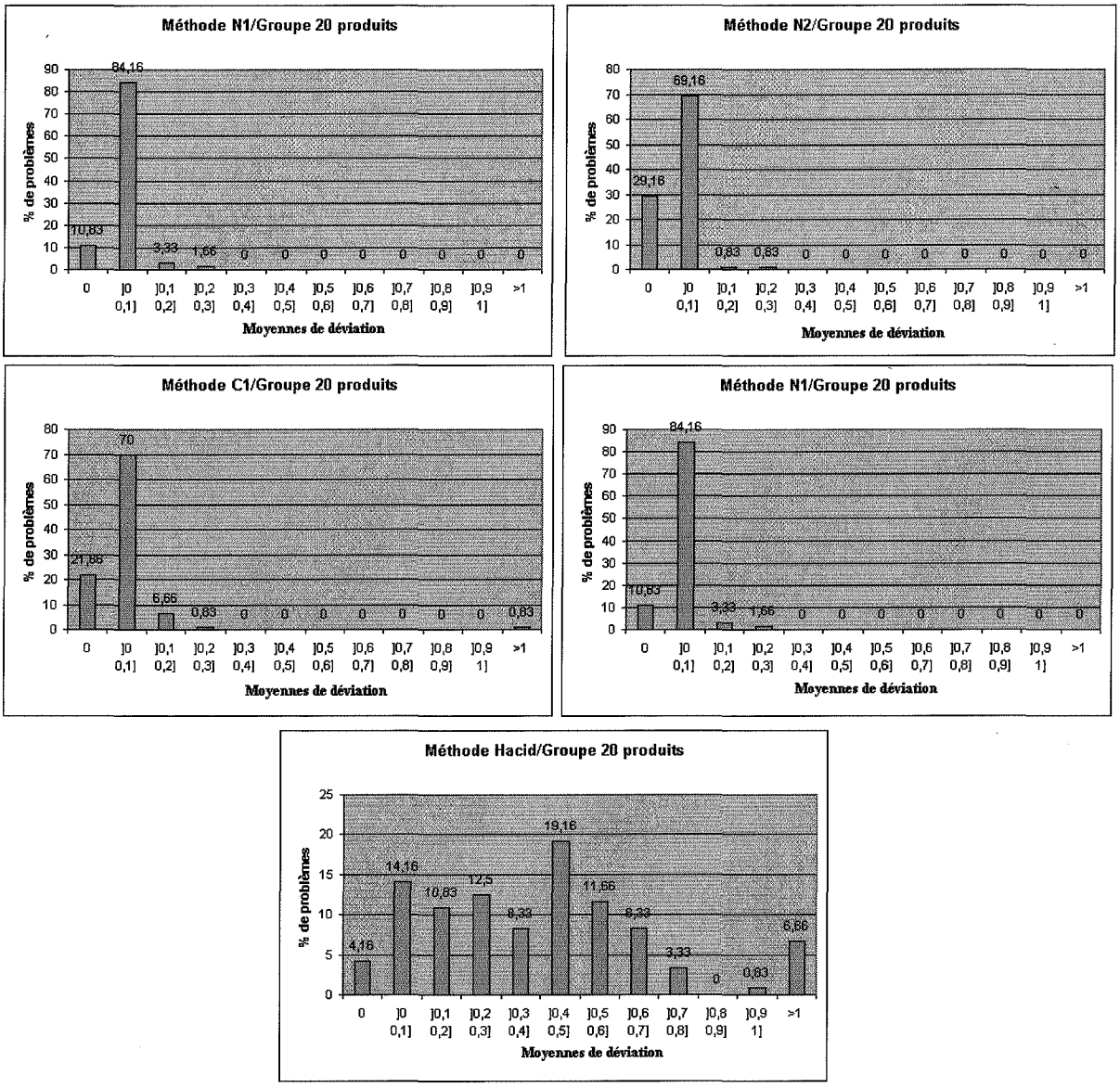


Figure 4. 9. Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes de vingt produits

Comme illustré dans la Figure 4.9., la méthode N2 donne de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0,1 pour un total de 98,32% des cent vingt problèmes considérés, contre 96,66% des problèmes pour C2, 94,99% pour N1, 91,66 pour C1 et seulement 18,32% de problèmes pour (Hacid, 2000). De plus, cette dernière méthode (celle proposée dans (Hacid, 2000)), donne pour 74,97% des problèmes une déviation moyenne entre 0.1 et 1, contre 4,99% des problèmes pour N1 et 1,66% des problèmes pour N2, 7,49% pour C1 et 2,5% pour C2.

Classe de problèmes identifiée par taux d'utilisation de l'atelier

Nous nous intéressons à présent à la classe de problèmes identifiée par le taux d'utilisation de l'atelier, soient à faible et à forte charge. Le tableau synthétisant, les moyennes de déviations, des méthodes proposées, pour l'ensemble des problèmes à faible charge est le suivant :

Groupes	Taux d'utilisation	M	N	N1	N2	C1	C2	HACID
1	Faible	3	5	0,062	0,061	0,074	0,021	0,914
2	Faible	3	10	0,065	0,031	0,061	0,036	0,539
3	Faible	3	20	0,046	0,018	0,061	0,013	0,550
4	Faible	6	5	0,380	0,361	0,386	0,355	0,152
5	Faible	6	10	0,044	0,033	0,068	0,038	0,207
6	Faible	6	20	0,025	0,013	0,034	0,008	0,331
7	Faible	12	5	0,249	0,195	0,252	0,178	0,188
8	Faible	12	10	0,144	0,120	0,141	0,117	0,055
9	Faible	12	20	0,038	0,027	0,040	0,020	0,114
Moyenne				0,110	0,090	0,120	0,080	0,330
Min				0	0	0	0	0
Max				2,299	2,299	2,313	2,313	8,626
Nombre de meilleures solutions				27	52	23	65	41
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				21	39	10	46	41
Nombre des pires solutions				26	10	18	9	129
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				21	6	11	3	129

TAB.4. 9. Déviations moyennes pour les groupes d'ateliers à faible charge

Comme illustré dans le tableau ci-dessus, la méthode C2 enregistre la meilleure moyenne de déviation, comparativement aux autres méthodes, soit une moyenne de 0,08 contre 0,33 pour la méthode proposée dans (Hacid, 2000). Les autres méthodes enregistrent des solutions avec des moyennes de déviation plus ou moins de la même grandeur de valeur, soient : 0,11 pour N1, 0,09 pour N2 et 0,12 pour C1. Nous constatons également que C2 enregistre seule 46

meilleures solutions parmi les 65 qu'elle trouve et 3 pires solutions. Cependant, la méthode proposée dans (Hacid, 2000) enregistre 41 meilleures solutions et 129 pires solutions sur les 180 considérés.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des problèmes d'ateliers à faible charge.

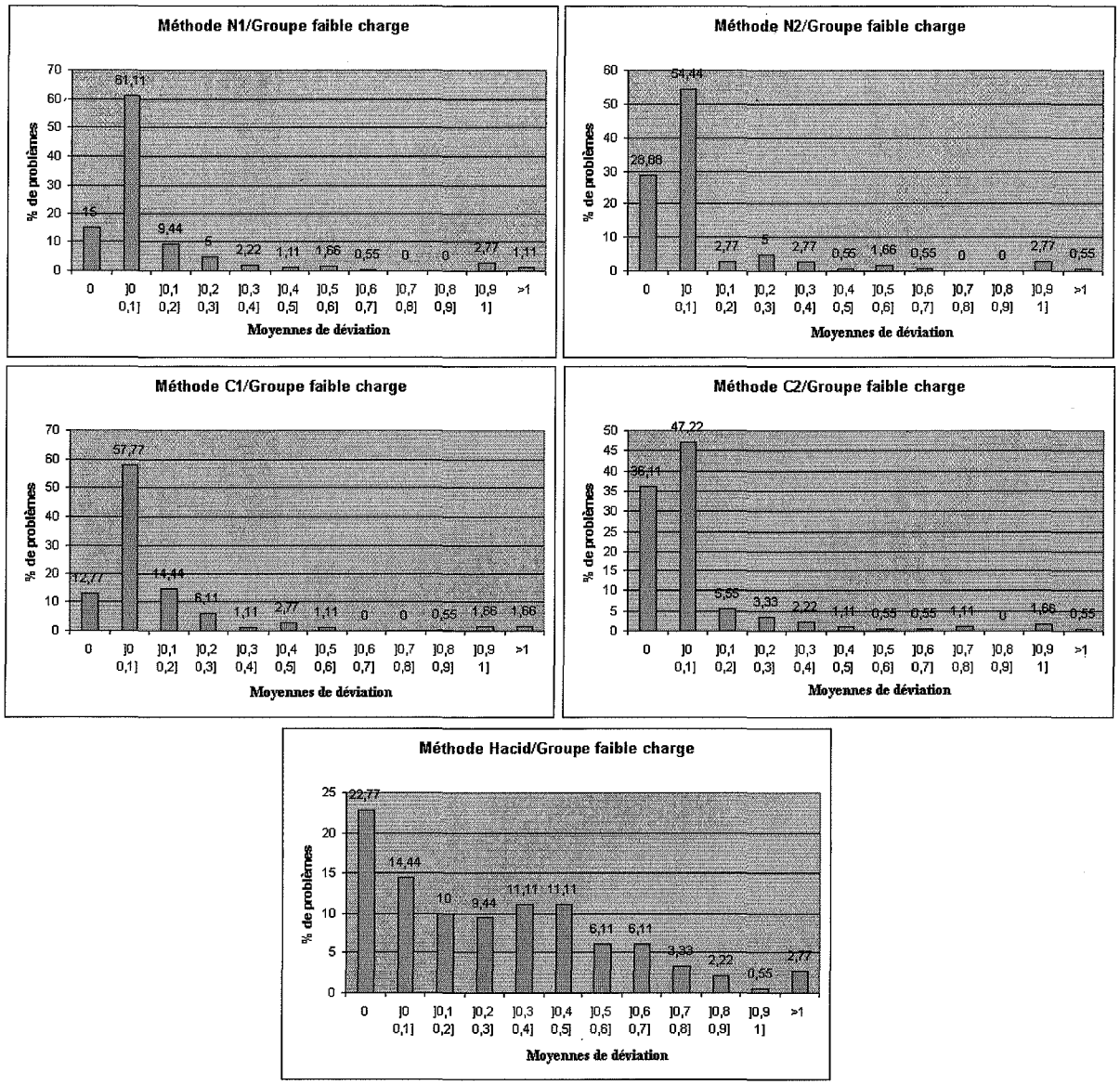


Figure 4. 10.Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes d'ateliers à faible charge

Comme illustré dans la Figure 4.10, la méthode C2 donne de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0,1 pour un total de 83,33% des cent quatre vingt problèmes considérés, contre 83,32% des problèmes pour N2, 76,11% des problèmes pour N1, 70,54% des problèmes pour C1 et seulement 37,21% de problèmes pour (Hacid, 2000). De plus, cette dernière méthode donne pour 59,98% des problèmes une déviation moyenne entre 0,1 et 1 contre 22,75% des problèmes pour N1, 16,07% des problèmes pour N2, 27,75% pour C1 et 16,08% pour C2.

Nous exposons dans ce qui suit, le tableau des moyennes de déviations, des méthodes proposées, pour l'ensemble des problèmes à forte charge:

Groupes	Taux d'utilisation	M	N	N1	N2	C1	C2	HACID
1	Fort	3	5	0,060	0,027	0,069	0,013	0,550
2	Fort	3	10	0,028	0,020	0,041	0,022	0,364
3	Fort	3	20	0,053	0,029	0,036	0,034	0,861
4	Fort	6	5	0,147	0,121	0,155	0,120	0,179
5	Fort	6	10	0,036	0,040	0,032	0,022	0,248
6	Fort	6	20	0,028	0,019	0,023	0,005	0,333
7	Fort	12	5	0,119	0,103	0,121	0,107	0,282
8	Fort	12	10	0,117	0,101	0,112	0,095	0,209
9	Fort	12	20	0,023	0,015	0,076	0,067	0,328
Moyenne				0,060	0,050	0,070	0,050	0,370
Min				0	0	0	0	0
Max				1,046	1,046	1,123	1,115	1,882
Nombre de meilleures solutions				32	52	35	74	25
Nombre de fois à être seule à trouver la meilleure solution				20	27	25	51	25
Nombre des pires solutions				13	5	13	10	150
Nombre de fois à être seule à trouver la pire solution				8	1	8	6	150

TAB.4. 10. Déviations moyennes pour les groupes d'ateliers à forte charge

Le tableau ci-dessus, montre que la meilleure moyenne de déviation enregistrée pour ce cas d'étude, taux d'utilisation de l'atelier fort, est donnée par les méthodes N2 et C2 avec une valeur de 0,05 contre 0,37 enregistrée par la méthode proposée dans (Hacid, 2000). Le nombre de meilleures solutions obtenues seulement par la méthode C2 est de 51 fois contre 25 pour la méthode proposée dans (Hacid, 2000). Le nombre de pires solutions fournies seulement par la méthode C2 est de 6 alors que la méthode proposée dans (Hacid, 2000) trouve 150 fois seule la pire solution pour les 180 problèmes considérés.

Les histogrammes suivants exposent la répartition, par paliers de 1%, des moyennes de déviations des différentes approches que l'on a proposées et celle proposée dans (Hacid, 2000) sur l'ensemble des problèmes d'ateliers à forte charge.

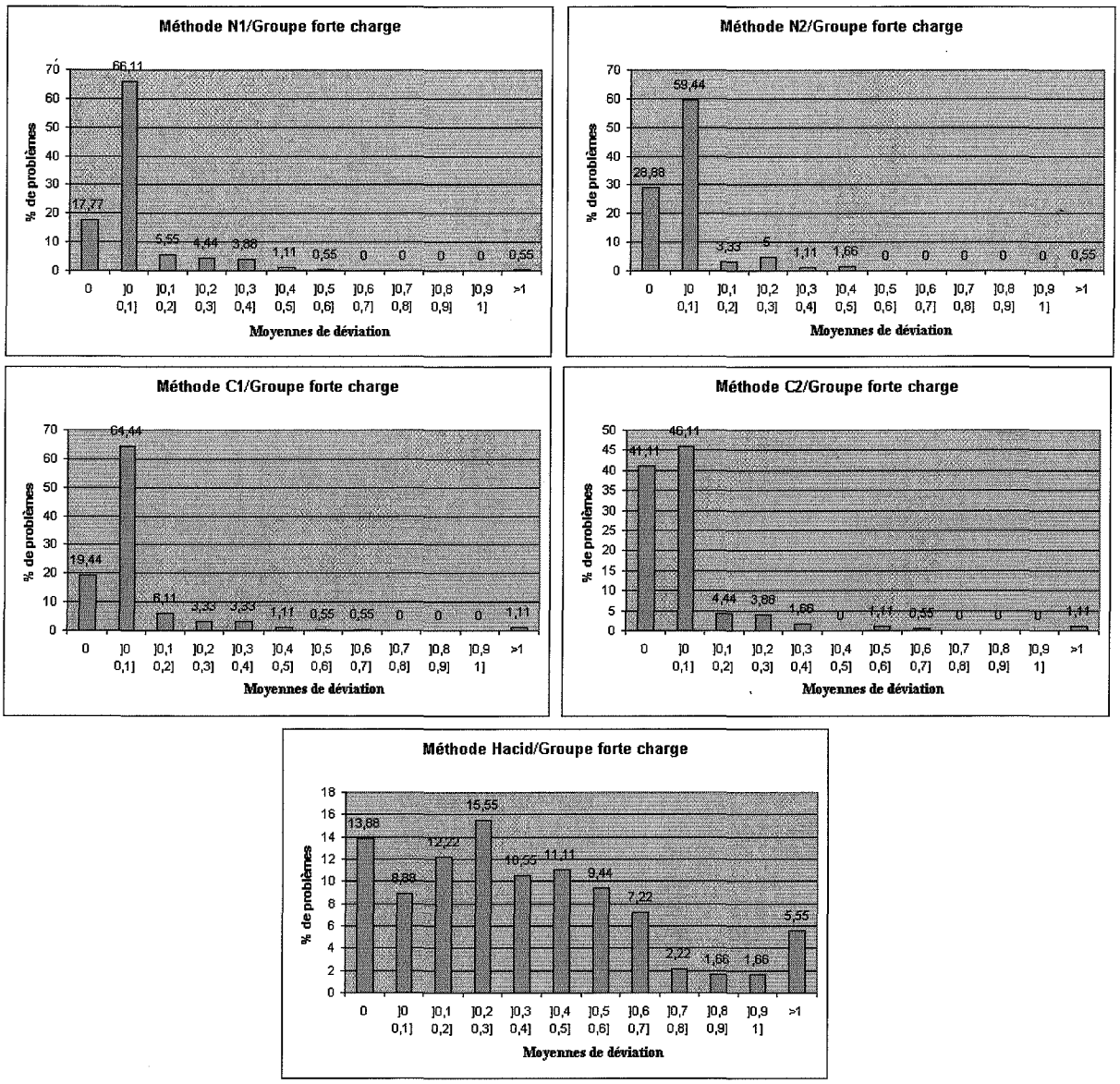


Figure 4. 11.Histogrammes des déviations des cinq méthodes pour les groupes d'ateliers à forte charge

Comme illustré dans la Figure 4.11, la méthode N2 donne de meilleurs résultats avec une moyenne de déviations inférieure à 0.1 pour un total de 88,32% des cent quatre vingt problèmes considérés, contre 87,22% des problèmes pour C2, 83,88% de problèmes pour N1 et C1 et seulement 22,76% de problèmes pour (Hacid, 2000). De plus, cette dernière méthode donne pour 71,63% des problèmes une déviation moyenne entre 0,1 et 1 contre 15,53% des problèmes pour N1 et 11,1% des problèmes pour N2, 14,98% pour C1 et 11,64% pour C2.

Nous proposons, dans ce qui suit, d'analyser les temps d'obtention des solutions des trois cents soixante problèmes par les différentes méthodes. Pour cela, nous proposons de calculer les moyennes des temps pour chacun des groupes de problèmes identifiés par -nombre de machines- nombre de produits- taux d'utilisation de l'atelier- obtenus de l'application de chacune des méthodes N1, N2, C1, C2 et celle proposée dans (Hacid, 2000). Ces temps sont obtenus par l'exécution des différentes méthodes sur un ordinateur *Pentium III*, 1.06 GHz sous le système d'exploitation Windows XP.

Ces moyennes sont synthétisées dans le tableau ci-après :

Groupes	M	N	Taux d'utilisation	N1	N2	C1	C2	Hacid
1	3	5	Faible	838,15	1520,5	865,8	1588,15	2338,9
2	3	5	Fort	895,3	1661,95	948,15	1659,15	1687,3
3	3	10	Faible	1817,2	3352,25	1938,8	3451,55	5550,8
4	3	10	Fort	2036,85	3588,2	2004	3619,15	4654,4
5	3	20	Faible	3540,4	7097,2	3761,95	9032,3	11951,35
6	3	20	Fort	3457,45	6836,05	3749,6	8509,2	9298,25
7	6	5	Faible	1423,9	2612,35	1433,25	2558,05	3099,6
8	6	5	Fort	1699,2	2952,05	1728,4	2958	3448,35
9	6	10	Faible	3136,5	5651,45	2992,6	5719,35	6987,45
10	6	10	Fort	3607,3	6512,45	3598,65	6311,15	6660,65
11	6	20	Faible	6112,85	12474,3	6070,2	13491,8	11969,15
12	6	20	Fort	6408,85	12241,8	6375,05	13643,55	11485,35
13	12	5	Faible	2665,2	4973,85	2900,15	5034,7	4440,85
14	12	5	Fort	2119,2	3560,45	2013,7	3195	4482,4
15	12	10	Faible	5910,85	11118,6	5630,6	11060,7	8875,2
16	12	10	Fort	6182,75	11531,55	6300,95	11497,9	9429,15
17	12	20	Faible	11546	21788,2	10754,95	21335,2	15047,5
18	12	20	Fort	11367,85	22580,25	10854,75	23766,55	16263,2
Moyenne				4153,65	7891,85	4106,75	8246,19	7648,32
Min				341	371	349	410	190
Max				15802	27819	15052	32046	27599

TAB.4. 11. Moyennes des temps d'obtention des solutions pour les groupes identifiés par -nombre de machines-nombre de produits-taux d'utilisation de l'atelier- pour les cinq méthodes.

Nous observons dans le tableau ci-dessus, que les moyennes des temps nécessaires pour l'obtention des plans de production par les quatre méthodes que l'on a proposées (N1, N2, C1, C2) appliquées aux trois cents soixante problèmes sont plus ou moins du même ordre de grandeur. Alors que la moyenne des temps utilisés pour l'obtention des plans de production cyclique en appliquant la méthode proposée dans (Hacid, 2000) à ces mêmes trois cents soixante problèmes est beaucoup plus importante et est égale à peu près le double de la moyenne des temps utilisés par n'importe quelle méthode de celles que l'on a proposées. Ceci est du essentiellement à la manière dont les quantités à lancer de chaque produit sont calculées. En effet la méthode proposée dans (Hacid, 2000) procède dans le calcul de ces quantités à des groupages de tous les ordres de livraisons successives possibles alors que les approches que l'on propose se base sur la détermination de ces quantités, soit en considérant la politique de production lot pour lot (pour le cas où la durée du cycle de production est multiple entier de la durée du cycle de livraison), soit en résolvant d'une manière optimale un

modèle mathématique linaire (pour le cas où la durée du cycle de production n'est pas multiple entier de la durée du cycle de livraison) à l'aide d'un outils très performant qui est Cplex.

4.8. Conclusion

Nous avons procédé dans ce chapitre à l'évaluation de l'approche proposée et ses variantes en les appliquant à trois cents soixante problèmes que l'on a générés et lesquels respectent les traits caractéristiques des problèmes réels. Nous avons également adapté la méthode proposée dans (Hacid, 2000) à notre contexte de travail, nous l'avons appliqué par la suite aux mêmes trois cents soixante problèmes que l'on a générés.

Pour l'étude et l'analyse des résultats, nous avons proposé, une étude comparative des différentes méthodes sur trois classes de problèmes. La première est identifiée selon le nombre de machines et est composée des problèmes à 3, 6 et 12 machines. La seconde classe est identifiée selon le nombre de produits et est composée des problèmes à 5, 10 et 20 produits. La dernière classe que l'on a considérée est identifiée selon le taux d'utilisation de l'atelier et est composée des problèmes à faibles et à fortes charges.

L'analyse des résultats issus de l'application des différentes méthodes sur les différentes classes de problèmes favorise la méthode C2 laquelle donne de meilleurs résultats dans la majorité des cas, soit au vue de la moyenne de déviation qu'elle enregistre par rapport à la meilleure solution retenue de l'application de toutes les méthodes étudiées, soit au vue du nombre de fois qu'elle trouve seule les meilleures solutions (resp. les pires solutions).

Notons que les quatre variantes que nous avons proposées enregistrent des résultats plus ou moins similaires avec des écarts de l'ordre des centièmes de la meilleure solution trouvée. Cependant, la méthode C2, suivie de N2, surpasse les autres approches en nombre de meilleures solutions obtenues. La méthode proposée dans (Hacid, 2000), trouve la pire solution pour la majorité des problèmes, et enregistre par conséquent des moyennes de déviation sensiblement supérieure à celles obtenues par les approches que l'on a proposées.

Chapitre 5 : Conclusions et perspectives

5.1. Conclusions générale

Nous nous sommes intéressé dans ce travail de recherche à une relation particulière entre clients et fournisseurs, celle fondée sur le principe de livraisons cycliques. Les fournisseurs s'engagent alors sur le long terme à livrer de façon répétitive des quantités de produits fixes à des intervalles de temps fixes.

Ce mode de livraisons a conduit les entreprises à revoir leurs méthodes de gestion et de production pour une meilleure synchronisation de leurs flux. Les entreprises adoptent alors la production cyclique laquelle, fondée sur le principe de synchronisation des flux de production et de livraison, s'inscrit totalement dans les principes du juste à temps.

Nous avons montré, à travers l'étude bibliographique que nous avons menée, que le mode de production cyclique présente plusieurs avantages, en particulier la répétitivité du schéma de travail laquelle contribue considérablement à la qualité, la productivité et l'amélioration des opérations de la production.

Néanmoins, les problèmes liés à ce type de production sont connus pour être complexes et hautement combinatoires. Une supervision hiérarchisée des systèmes de production cyclique a été proposée dans la littérature. Celle-ci est composée de trois niveaux : le long, le moyen et le court terme.

Nous nous sommes focalisé dans nos travaux sur le niveau moyen terme où l'entreprise se situe dans le cadre des engagements contractuels, pris au niveau long terme, de livrer des quantités de produits à fréquences fixes et selon des modalités d'appels connues.

Notre travail a consisté alors en la mise en œuvre des systèmes de production cyclique lorsque les demandes de livraison sont de nature cyclique. Pour cela nous nous sommes intéressé à un atelier de type Flow Shop pur fabricant plusieurs produits.

Nous avons étendu le domaine de définition de la durée de cycle de production, laquelle est définie par plusieurs auteurs, dans leurs travaux de recherches, comme étant un multiple entier

des durées de cycles de livraison des produits. En effet, nous avons défini, dans ce présent travail, une durée de cycle de production comme étant ou pas un multiple entier des durées des cycles de livraisons des produits.
Nous avons considéré dans ce travail trois plages horaires quant au calcul des coûts de fabrication : horaires de journée, horaires de soirs et horaires relatifs aux fins de semaines.

Nous avons proposé pour la détermination du plan de production cyclique, minimisant à la fois les coûts de fabrication, de lancement et de stockage, une nouvelle méthode consistant à (1) déterminer la durée maximale souhaitable du cycle de production, (2) déterminer les quantités à fabriquer pour chacun des produits. Ceci est fait, soit selon la politique lot pour lot dans le cas où la durée du cycle de production est multiple entier de la durée du cycle de livraison du produit, soit en résolvant d'une manière optimale le modèle mathématique linéaire, que l'on a proposé, visant à minimiser au plus les stocks. (3) Vérifier la condition nécessaire et suffisante, que l'on a définie, pour l'existence d'un cycle de production réalisable, (4) déterminer la séquence de lancement des lots à fabriquer. Ceci est fait dans l'optique de minimiser le temps de séjours des produits sur les machines. A cette fin, nous avons utilisé les méthodes CDS *(Campbell,Dudek et Smith)* et NEH *(Nawaz, Enscore et Ham)*. (5) Construire l'ordonnancement des lots à lancer suivant la séquence déterminée sur l'ensemble des machines constituant l'atelier. (6) Exploiter les différentes actions d'amélioration que l'on a proposées, pour l'amélioration d'un plan de production.

Nous avons testé la méthode, que l'on a proposée, ainsi que ses variantes sur un ensemble de trois cents soixante problèmes que l'on a générés de manière aléatoire et respectant les caractéristiques des problèmes réels. Nous avons présenté par la suite les résultats de l'application de nos approches sur ces problèmes et les avons analysés.

Nous avons réalisé une étude comparative, en terme de performance, entre la méthode et ses différentes variantes que l'on a proposées et une approche tirée de la littérature traitant de la même problématique. En résumé, cette étude comparative nous révèle la performance des approches que l'on a proposées par rapport à l'approche de référence considérée. Sur les trois cents soixante problèmes que l'on a générés, et prenant en compte plusieurs contextes de comparaisons (atelier chargé ou non, nombre de produits et nombre de machines variables),

les approches que l'on a proposées, lesquelles sont plus ou moins du même ordre de performance, fournissent dans la majorité des cas le meilleur plan de production cyclique alors que celle proposée dans (Hacid, 2000) trouve seule, pour la majorité des problèmes, la pire solution.

5.2. Voies de recherches futures

Nous avons mené cette étude sans la prise en compte des contraintes liées à la main d'œuvre. En effet, pour la mise en œuvre d'un plan de production cyclique, nous n'avons considéré que les contraintes relatives aux ressources machines et avons supposé les capacités ressources humaines illimitées.

Nous proposons, comme voie de recherche future, l'introduction et la prise en compte des capacités des ressources humaines pour la réalisation d'un plan de production cyclique. Il s'agit de déterminer d'un coté le nombre d'opérateurs nécessaires pour la réalisation du plan de production cyclique, et de déterminer les affectations de ces opérateurs aux machines (en déterminant leurs emplois du temps et leurs affectations aux machines). La détermination de la meilleure affectation des opérateurs, optimisant des coûts relatifs aux ressources humaines, pourrait également être envisagée.

Une seconde voie de recherche, pouvant être exploitée, serait l'étude de la qualité du plan de production cyclique que l'on a déterminé face à des changements tels que la variation de la demande, l'arrivée de nouveaux appels de livraisons, la rupture de stocks des matières premières ou encore les pannes des machines. Cette qualité de solution se mesurera en fonction des degrés de liberté dont dispose le plan de production cyclique quant à la réponse aux différents changements cités précédemment.

Cette étude de la qualité des solutions peut être réalisée par simulation introduisant les stocks de sécurités ou encore par le recours aux ressources humaines pour l'ajustement de la capacité de production à la charge réelle de production induite par les aléas.

Bibliographie

(Aldakhilallah et *al.*, 2001) K.A Aldakhilallah, et R Ramesh. Cyclic scheduling heuristics for a re-entrant job shop manufacturing environment. *International Journal of Production Research.* Vol. 39, Issue.12, pages 2635-2657, 2001.

(Bahroun, 1996) Z Bahroun. Conception et développement d'une nouvelle approche de planification à capacité finie pour un Flow Shop généralisé. Thèse d'état, *faculté des sciences de Tunis*, 1996.

(Bahroun, 2000) Z Bahroun. Contribution à la planification et à la gestion dynamique des systèmes de production cyclique, Thèse, *faculté des sciences de Tunis*, Octobre 2000.

(Bahroun et *al.*, 1998) Z Bahroun, P Baptiste, et J .P Campagne. A Production management model operating under a cyclic delivery schedule. *Dans 1998 Computational Engineering in Systems Applications conference*, pages 569-574, London, Avril 1998.

(Bahroun et *al.*, 1999) Z Bahroun, P Baptiste, J. P Campagne, et M Moalla. Production planning and scheduling in the context of cyclic delivery schedules. *Computers & Industrial Engineering.* Vol. 37, Issues. 1-2, Pages 3-7, 1999.

(Bahroun et *al.*, 2000) Z Bahroun, J .P Campagne, et M. Moalla. Une nouvelle approche de planification à capacité finie pour les ateliers Flow Shop. *Journal européen des systèmes automatisés (JESA)*, vol. 34(5), pages 567-598, Juillet 2000.

(Bhaba et *al.*, 1996) R.S Bhaba, et R Parija. Optimal batch size and raw material ordering policy for a production system with a fixed interval, lumpy demand delivery system. *European journal of operational research.* Vol. 89, pages 593-608, 1996.

(Boctor, 1985) F.F Boctor. Single machine lot scheduling: a comparison of some solution procedures. *APII.* Vol .19, pages 389-402, 1985.

(Boctor, 1988) F.F Boctor. A more efficient formulation of the single machine, static demand, lot scheduling problem. *Engineering Costs and Production Economics*. Vol. 14, pages 3-10, 1988.

(Campagne et *al.*, 1998) J.P Campagne, et S Hacid. Approvisionnement cycliques synchronisés: mise en œuvre sur une chaîne d'approvisionnement à capacité finie. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*. Vol. 32, issues. 5-6, pages 667-692, 1998.

(Campagne et *al.*, 1999) J.P Campagne, et S Hacid. Synchronization at finite loading capacity of cyclic production system along a supply chain. *ICIL'99, International Conference on Industrial Logistics, Petersburg*. Pages 238-250, 1999.

(Campagne, 2000) J.P Campagne. Modélisation évaluation et pilotage de systèmes de production cyclique. *Programme Thématique de recherche Région Rhône Alpe. Rapport final, (88 pages),* 2000.

(Campagne et *al.*, 2001a) J.P Campagne, F Grimaud, et S Hacid. Production cyclique : Application et évaluation chez un équipementier automobile. *Actes de la troisième conférence francophone de Modélisation et Simulation "Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels" (MOSIM'01)*. Avril 2001(a).

(Campagne et *al.*, 2001b) J.P Campagne, F Grimaud, et M. Mabed. Pilotage des Systèmes de Production Cyclique: proposition d'une instrumentation de gestion. *4ème congrès international de génie industriel in : Proceedings of GI'01*. Pages 1083-1094, juin 2001(b).

(Campbell et *al.*,1970) H.G. Campbell, R.A. Dudek, M.L. Smith, A heuristic algorithm for the n job, m machine sequencing problem. Management Science .Vol. 16, Issue. 10, pages 630-637, 1970.

(Campbell et *al.*, 1991) G.M Campbell, et V.A Mabert. Cyclical schedules for capacited lot sizing with dynamic demands. *Management science*. Vol. 37, Issue. 4, Pages 409-427, 1991.

(Campbell, 1996) G.M Campbell. Cyclic assembly schedules for dynamic demands. *IIE*. Vol. 28, pages 643-651, 1996.

(Carlier et *al.*, 1988) J Carlier, et P.h Chrétienne. Problèmes d'ordonnancement : modélisation/ complexité/algorithmes. Masson, paris, 1988.

(Castro et *al.*, 2003) P Castro, A Barbosa-Povoa, et H Matos. Optimal periodic scheduling of batch plants using RTN-based discrete and continuous-time formulations: A case study approach. *Industrial and Engineering Chemical Research*. Vol. 42, pages 3346–3360, 2003.

(Chauvet et *al.*, 2003) F Chauvet, J.W Herrmann, et J.M Proth. Optimization of cyclic production systems: a heuristic approach. *IEEE Transactions on robotics and automation*. Vol. 19, Issue.1, 2003.

(El-maghraby, 1978) S.E El-maghraby. The economic lot scheduling problem: Review and extensions. *Management Science*. Vol. 24, Issue.6, pages 587-598, 1978.

(El-Najdawi et *al.*, 1993) M El-Najdawi, et P.R kleindorfer. Common cycle lot size scheduling for multi-product, multi- stage production. *Management Science*. Vol. 39, pages 872-885, 1993.

(El-Najdawi, 1994) M El-Najdawi. A job splitting heuristic for lot size scheduling in multi-stage, multi-product production processes. *European Journal of Operational Research*. Vol. 75, pages 365-377, 1994.

(El-Najdawi, 1997) M El-Najdawi. Multi-cyclic flow shop scheduling ,An application in multi-stage, multi-product production processes, *International Journal of Production Research*. Vol. 35, pages 3323-3332, 1997.

(Gallego, 1990) G Gallego. An extension to the class of easy economic lot scheduling problems. *IIE transactions*. Vol. 22, pages 189-190, 1990.

(Hacid, 2000) S Hacid. Contribution à la mise en œuvre et à la synchronisation de systèmes de production cyclique sur une chaîne logistique. *Thèse, Ecole des mines de Saint Etienne,* Décembre 2000.

(Hall, 1988) R.W Hall. Cyclic scheduling for improvement. *International Journal of Production Research.* Vol. 26, pages 457-472, 1988.

(Hanen, 1994) C Hanen. Study of NP-hard cyclic scheduling problem: the recurrent Job-Shop. *European Journal of Operational Research.* Vol. 72, Issue. 1, pages 82-101, 1994.

(Hanen et *al.*, 1995) C Hanen, A Munier. A study of the cyclic scheduling problem on parallel processors. *Discrete Applied Mathematics.* Vol. 57, Issues.2-3, pages 167-192, 1995.

(Hanen, 1995) C Hanen. Problèmes d'ordonnancement cyclique. *habilitation à diriger des recherches, Université Paris VI, Institut Blaise Pascal,* 1995 .

(Harish et *al.*, 1984) C Harish, C Bahl, et P Ritzman Larry. A cyclical scheduling :heuristic for lot sizing with capacity constraints. *International Journal of Production Research.* Vol. 22, pages 791-800, 1984.

(Havale et *al.*, 1978) D Havale, G Dileep, G Aggarwal, et C Sumer. Multi-machines, Multi-products production scheduling and inventory control. *Decision sciences.* Vol. 9, pages 577-595, 1978.

(Hennet, 1999a) J.C Hennet. A decomposed resolution technique for the cyclic economic lot-sizing and scheduling problem. *7th IEEE International Conference on Emerging Tehnologies and Factory Automation (ETFA'99).* Vol.18, Issue.21, pages 1117-1122, 1999 (a).

(Hennet, 1999b) J.C Hennet. A common cycle approach to lot scheduling in multistage manufacturing systems. *Rapport LAAS N°99242,*1999(b).

(Hennet, 2000) J.C Hennet. Dimensionnement et ordonnancement cyclique de lots de fabrication. *Rapport LAAS N° 00355*. Septembre 2000.

(Hennet, 2001) J.C Hennet. Common cycle approach to lot scheduling in production planning and control. *Production Planning and Contro*. Vol. 12, Issue.4, pages 362-371, 2001.

(Hillon et *al.*, 1989) H.P Hillon, et J.M Proth. Performance evaluation of job shop systems using timed event graphs. *IEEE transaction on automatic control*. Vol. 34, Issue.1, pages 3-9, 1989.

(Hsu et *al.*, 1990) H Hsu, et M El-Najdawi. Common cycle scheduling in a multistage production process. *Engineering Costs and Production Economics*. Vol. 20, pages 73-80, 1990.

(Karmarkar et *al.*, 1989) U.S Karmarkar,et L Shrage. The deterministic dynamic product cycling problem. Operatoins Research, Vol. 33, Issue.2, pages 326-332, 1989.

(Kim et *al.*, 1995) D Kim, et V.A Mabert. Integrative versus separate cycle scheduling heuristics for capacitated discrete lot sizing and sequencing problems. *International Journal of Production Research*. Vol. 33, Issue. 7, pages 2007-2021, 1995.

(Korbaa et *al.*, 2000) O Korbaa, et J.C Genita. Ordonnancement cyclique en production flexible manufacturière. *Revue Internationale d'Ingénierie des Systèmes de Production Mécanique*. Vol. 4, pages 47-54, 2000.

(Leorch et *al.*, 1994) A.G Leorch, et J.A Muuckstadt. An approach to production planning and scheduling in cyclically scheduled manufacturing systems. *International Journal of Production Research*. Vol. 32, issue.4, pages 8511-871, 1994.

(Loos, 2001) P Loos. Gozinto graphs for By-Products and Cyclic Production-An Approach for ERP System Application. *Proceedings of the Seventh Americas Conference on Information Systems*. Vol. 3(5), pages 1111-1117, 2001.

(Mabed et *al.*, 2005) M. Mabed, FF. Boctor et JP.Campagne. Construction des plans de production cyclique : proposition d'un nouveau modèle mathématique linéaire pour la détermination des tailles des lots de fabrication, *JD MACS'2005*. Accepté.

(Mabed et al., 2003a) M Mabed, et J.P Campagne. Approche Distribuée pour la résolution des Problèmes Combinatoires. 4e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation MOSIM ''Organisation et Conduite d'Activités dans l'Industrie et les Services'', Avril 2003.

(Mabed et *al.*, 2003b) M. Mabed, et J.P.Campagne. Problèmes de Dimensionnement des Tailles des Lots. *5ème congrès international de Génie Industriel*. Canada 2003.

(Mabed, 2002) M Mabed. Distributed Approach for the Cyclic Scheduling Problems. 6th World Multi-Conference on Systemics, Cybernitics and Informatics. *Industrial Systems and Engineering II* SCI 2002, Orlando, Florida,USA,Vol.11, pages 537-541,2002.

(McCormick et *al.*, 1994) S.T McCormick, U.S Rao. Some complexity results in cyclic scheduling. *Math. Comput. Modelling.* Vol. 20, Issue.2, pages 107-122, 1994.

(Nawaz et *al.*, 1983). M. Nawaz, , Jr.EE Enscore and I. Ham. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. Omega, Vol. 11,pages 91-95, 1983.

(Ouenniche et *al.*, 1999) J Ouenniche, et F.F Boctor. The two-group heuristic to solve the multi-product, economic lot sizing and scheduling problem in flow shops. *European Journal of Operational Research.* Vol. 129, Issue.3, pages 539-554, 1999.

(Ouenniche et *al.*, 2000) J Ouenniche, et F.F Boctor. The multi-product, economic lot sizing problem in flow shops, the powers- of- two heuristic. *Computers and Operation Research.* Vol. 28, pages 1165-1182, 2000.

(Ouenniche et *al.*, 2001a) J Ouenniche, et F.F Boctor. The G-group heuristic to solve the multi-product, sequencing, lot sizing and scheduling problem in flow shops. *International Journal of Production Research.* Vol. 39, pages 81-98, 2001(a).

(Ouenniche et *al.*, 2001b) J Ouenniche, et J.W.M. Bertrand. The finite horizon economic lot sizing problem in job shops: : the multiple cycle approach. *International Journal of Production Economics*. Vol. 74, Issues 1-3, pages 49-61, December 2001(b).

(Pinto et *al.*, 1994) J Pinto, G Grossmann. Optimal cyclic scheduling of multistage continuous multi-product plants. *Computer chemical Engineering*. Vol.18(9), pages 797-816, 1994.

(Pinto et *al.*, 1995) J Pinto, I Grossmann. A continuous-time mixed-integer linear-programming model for short-term scheduling of multistage batch plants. *Industrial and Engineering Chemical Research*. Vol. 34, pages 3037–3051, 1995.

(Sarker et *al.*, 1991) D Sarker, et W.I Zangwill. Variances effects in cyclic production systems. *Management Science*. Vol. 37(4), pages 444-453, 1991.

(Szendrovits et *al.*, 1975) A.Z Szendrovits. Manufacturing cycle time determination for a multistage economic production quantity model. *Management Science*. Vol. 22, pages 298-308, 1975.

(Tunasar et *al.*, 2001) C Tunasar, et J Rajgopal. An Evolutionary Computation Approach to the Economic Lot Scheduling Problem. *University of Pittsburgh, Department of Industrial Engineering, Pittsburgh*. 2001.

(Zipkin, 1991) P.H. Zipkin, «Computing Optimal Lot Sizes in the Economic Lot Scheduling Problem», *International journal of Operations Research, vol 39,n 1,* 1991, *pages 56-63.*

Annexes

Annexe A : Exemple de problèmes générés aléatoirement

Nous présentons ci-après, à titre d'exemple, les données composant vingt problèmes fictifs des trois cents soixante générés aléatoirement.

Les données de chaque problème sont données sous forme de fichiers Text exposant les données dans l'ordre suivant :

Nombre de machines ; nombre de produits ;
Temps de lancement machine 1; Coût de lancement machine 1; coût de fabrication machine 1- plage horaire 1; coût de fabrication machine 1- plage horaire 2; coût de fabrication machine 1- plage horaire 3; taux utilisation machine 1;

Temps de lancement machine 2; Coût de lancement machine 2; coût de fabrication machine 2- plage horaire 2; coût de fabrication machine 2- plage horaire 2; coût de fabrication machine 2- plage horaire 3; taux utilisation machine 2;

.
.
.

Temps de lancement machine M; Coût de lancement machine 2; coût de fabrication machine M- plage horaire 1; coût de fabrication machine- M plage horaire 2; coût de fabrication machine M- plage horaire 3; taux utilisation machine M;

Durée de cycle du produit 1; coût de stockage du produit 1 ;
Nombre de livraisons du produit 1 durant son cycle de livraison;
Périodes de livraisons des demandes du produit 1;
Quantités à livrer du produit 1 pour chacune des périodes constituant son cycle de livraison;

Durée de cycle du produit 2; coût de stockage du produit 2 ;
Nombre de livraisons du produit 2 durant son cycle de livraison;
Périodes de livraisons des demandes du produit 2;
Quantités à livrer du produit 2 pour chacune des périodes constituant son cycle de livraison;

.
.
.

Durée de cycle du produit N; coût de stockage du produit N ;
Nombre de livraisons du produit N durant son cycle de livraison;
Périodes de livraisons des demandes du produit N;
Quantités à livrer du produit N pour chacune des périodes constituant son cycle de livraison;

Temps opératoire que nécessite le produit 1 sur la machine 1 ; Temps opératoire que nécessite le produit 2 sur la machine 1 ;... ; Temps opératoire que nécessite le produit N sur la machine 1 ;

Temps opératoire que nécessite le produit 1 sur la machine 2 ; Temps opératoire que nécessite le produit 2 sur la machine 2 ;... ; Temps opératoire que nécessite le produit N sur la machine 2 ;

.

.

.

Temps opératoire que nécessite le produit 1 sur la machine M ; Temps opératoire que nécessite le produit 2 sur la machine M ;... ; Temps opératoire que nécessite le produit N sur la machine M ;

Problème1
3;5;
15;4,01;0,27;0,32;0,4;0,59;
90;82,08;0,91;1,09;1,37;0,43;
105;85,87;0,82;0,98;1,23;0,45;
2;0,03;
5;
1;9;8;6;7;
66;0;0;0;0;0;0;52;32;98;58;0;0;0;
1;0,06;
1;
4;
0;0;0;16;0;0;0;
2;0;
3;
9;10;6;
0;0;0;0;0;0;0;24;0;0;60;32;0;0;
2;0,01;
1;
9;
0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;82;0;0;0;
1;0,01;
1;
2;
0;36;0;0;0;0;0;
20;11;20;20;11;
12;17;8;10;18;
15;12;8;15;7;

Problème2
3;5;
105;129,3;1,23;1,48;1,85;0,41;
30;29,25;0,97;1,17;1,46;0,47;
75;26;0,35;0,42;0,52;0,52;
2;0;
3;
4;8;1;
92;0;0;38;0;0;0;0;0;94;0;0;0;0;
2;0,03;
4;
1;5;10;6;
50;0;0;0;70;0;0;22;0;0;0;56;0;0;
2;0,05;
5;
5;3;1;6;8;
100;0;66;0;64;0;0;38;0;100;0;0;0;0;
1;0,03;
1;
3;
0;0;70;0;0;0;0;
2;0,05;
3;
4;5;10;
0;0;0;26;38;0;0;0;0;0;0;70;0;0;
5;5;8;8;5;
10;5;8;13;8;
7;12;8;11;6;

Problème 3
3;5;
60;68,27;1,14;1,37;1,71;0,41;
60;40,96;0,68;0,82;1,02;0,52;
15;6,03;0,4;0,48;0,6;0,44;
2;0,01;
6;
9;8;2;5;6;3;
0;76;42;0;60;0;0;22;0;42;76;0;0;0;
1;0,06;
2;
4;5;
0;0;0;58;100;0;0;
2;0,03;
2;
4;8;
0;0;0;12;0;0;0;0;0;52;0;0;0;0;
1;0;
2;
2;1;
100;78;0;0;0;0;0;
2;0,05;
2;
9;3;
0;0;18;0;0;0;0;0;0;0;74;0;0;0;
6;7;4;8;3;
11;10;10;4;9;
4;7;11;10;9;

Problème 4
3;5;
75;81,62;1,09;1,31;1,63;0,42;
60;66,21;1,1;1,32;1,66;0,46;
15;18,5;1,23;1,48;1,85;0,47;
1;0,03;
3;
3;2;4;
0;38;34;26;0;0;0;
1;0,04;
3;
5;4;2;
0;32;0;24;54;0;0;
2;0,03;
4;
4;6;1;7;
70;0;0;14;0;0;0;24;24;0;0;0;0;0;
1;0,03;
2;
4;2;
0;54;0;36;0;0;0;
2;0,03;
5;
2;10;6;1;7;
84;92;0;0;0;0;0;16;32;0;0;12;0;0;
7;6;10;8;6;
8;8;9;9;9;
11;11;8;12;5;

Problème 5
3;5;
105;37,8;0,36;0,43;0,54;0,45;
75;17,76;0,24;0,28;0,36;0,59;
75;28,33;0,38;0,45;0,57;0,57;
2;0,02;
5;
9;8;10;3;6;
0;0;74;0;0;0;0;78;0;92;50;28;0;0;
2;0;
3;
1;2;7;
36;26;0;0;0;0;0;0;60;0;0;0;0;0;
1;0,01;
1;
5;
0;0;0;0;50;0;0;
1;0,06;
1;
2;
0;50;0;0;0;0;0;
2;0,05;
3;
7;2;4;
0;94;0;88;0;0;0;0;32;0;0;0;0;0;
11;10;7;9;7;
10;18;16;18;7;
13;5;14;13;13;

Problème 6
3;5;
15;14,52;0,97;1,16;1,45;0,52;
60;58,78;0,98;1,18;1,47;0,48;
105;23,27;0,22;0,27;0,33;0,4;
1;0,07;
2;
5;4;
0;0;0;62;66;0;0;
1;0,06;
2;
5;3;
0;0;26;0;46;0;0;
2;0,05;
2;
8;1;
78;0;0;0;0;0;0;0;0;96;0;0;0;0;
1;0,03;
3;
5;2;4;
0;86;0;90;60;0;0;
2;0,06;
1;
10;
0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;24;0;0;
7;9;10;11;4;
9;8;12;6;9;
9;4;4;7;8;

Problème 7
3;5;
60;26,39;0,44;0,53;0,66;0,6;
30;14,19;0,47;0,57;0,71;0,46;
105;61,17;0,58;0,7;0,87;0,41;
2;0,06;
2;
4;1;
96;0;0;50;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2;0,03;
5;
6;2;3;1;10;
64;52;58;0;0;0;0;54;0;0;0;92;0;0;
1;0,04;
3;
5;4;1;
90;0;0;68;18;0;0;
1;0,03;
3;
5;2;1;
36;88;0;0;76;0;0;
2;0,04;
6;
6;4;2;9;7;1;
72;80;0;92;0;0;0;46;34;0;28;0;0;0;
6;4;6;10;8;
4;6;5;7;5;
6;5;5;3;5;

Problème 8
3;5;
15;8,41;0,56;0,67;0,84;0,52;
45;11,57;0,26;0,31;0,39;0,52;
90;67,92;0,75;0,91;1,13;0,44;
1;0,02;
3;
2;5;4;
0;52;0;62;88;0;0;
2;0,05;
3;
5;2;9;
0;82;0;0;20;0;0;0;0;0;96;0;0;0;
1;0,01;
2;
1;2;
84;68;0;0;0;0;0;
1;0,03;
1;
4;
0;0;0;74;0;0;0;
1;0,03;
3;
1;3;2;
96;16;96;0;0;0;0;
9;4;6;6;8;
8;7;9;8;3;
5;7;6;5;5;

Problème 9

3;5;
75;93,09;1,24;1,49;1,86;0,56;
45;37,88;0,84;1,01;1,26;0,56;
30;37,65;1,26;1,51;1,88;0,58;
1;0,02;
1;
5;
0;0;0;0;46;0;0;
1;0,03;
2;
5;2;
0;12;0;0;76;0;0;
2;0,03;
4;
4;6;3;2;
0;46;16;40;0;0;0;52;0;0;0;0;0;0;
1;0,06;
2;
2;3;
0;92;32;0;0;0;0;
2;0,06;
4;
1;10;6;7;
40;0;0;0;0;0;0;56;66;0;0;24;0;0;
6;11;14;13;10;
10;13;9;11;15;
17;7;17;12;12;

Problème 10

3;5;
75;18,16;0,24;0,29;0,36;0,43;
105;124,94;1,19;1,43;1,78;0,47;
75;73,2;0,98;1,17;1,46;0,47;
2;0,04;
1;
1;
82;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
1;0,03;
2;
2;5;
0;12;0;0;78;0;0;
1;0,06;
2;
4;1;
72;0;0;36;0;0;0;
1;0,04;
3;
3;5;4;
0;0;64;50;62;0;0;
1;0,06;
2;
1;4;
30;0;0;26;0;0;0;
10;9;6;7;11;
9;4;7;12;6;
7;9;10;10;6;

Problème 11
3;5;
30;21,57;0,72;0,86;1,08;0,46;
30;13,36;0,45;0,53;0,67;0,56;
60;75,76;1,26;1,52;1,89;0,44;
2;0,03;
6;
7;8;6;9;5;4;
0;0;0;84;48;0;0;44;70;56;28;0;0;0;
2;0,01;
6;
1;4;5;8;9;3;
58;0;98;24;30;0;0;0;0;56;92;0;0;0;
1;0,04;
3;
3;2;1;
92;16;24;0;0;0;0;
1;0,05;
2;
5;2;
0;62;0;0;64;0;0;
1;0,06;
3;
1;2;4;
50;52;0;96;0;0;0;
7;8;3;3;5;
11;6;5;5;6;
4;5;7;3;6;

Problème 12
3;5;
90;37,05;0,41;0,49;0,62;0,5;
45;51,95;1,15;1,39;1,73;0,54;
105;42,65;0,41;0,49;0,61;0,51;
1;0,06;
3;
3;5;2;
0;10;10;0;40;0;0;
2;0,01;
3;
10;2;3;
0;76;86;0;0;0;0;0;0;0;0;52;0;0;
2;0,02;
3;
1;6;3;
90;0;14;0;0;0;0;68;0;0;0;0;0;0;
2;0,02;
4;
10;7;6;2;
0;18;0;0;0;0;0;100;86;0;0;38;0;0;
1;0,03;
1;
4;
0;0;0;54;0;0;0;
12;9;7;13;7;
7;7;21;12;7;
13;5;11;10;13;

Problème 13
3;5;
75;46,07;0,61;0,74;0,92;0,53;
45;48,37;1,07;1,29;1,61;0,55;
60;59,84;1;1,2;1,5;0,47;
1;0,04;
3;
3;5;2;
0;64;18;0;78;0;0;
2;0,04;
1;
6;
0;0;0;0;0;0;0;46;0;0;0;0;0;0;
1;0,03;
3;
1;5;3;
76;0;46;0;68;0;0;
2;0,03;
6;
7;3;9;10;5;8;
0;0;36;0;20;0;0;0;52;26;70;94;0;0;
2;0,02;
1;
10;
0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;100;0;0;
8;11;9;6;10;
12;12;8;5;11;
5;13;5;10;10;

Problème 14
3;5;
45;52,65;1,17;1,4;1,75;0,47;
75;78,15;1,04;1,25;1,56;0,46;
15;3,73;0,25;0,3;0,37;0,54;
1;0,01;
1;
5;
0;0;0;0;30;0;0;
1;0,06;
2;
3;5;
0;0;84;0;42;0;0;
2;0,05;
5;
6;9;4;5;3;
0;0;88;54;98;0;0;74;0;0;62;0;0;0;
1;0,01;
1;
4;
0;0;0;50;0;0;0;
2;0,03;
2;
4;5;
0;0;0;96;100;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
7;7;7;13;12;
10;9;9;7;8;
8;7;13;11;13;

Problème 15
3;5;
90;43;0,48;0,57;0,72;0,58;
60;26,8;0,45;0,54;0,67;0,54;
15;17,21;1,15;1,38;1,72;0,44;
2;0,01;
1;
7;
0;0;0;0;0;0;0;0;68;0;0;0;0;0;
1;0,01;
3;
3;4;1;
30;0;86;24;0;0;0;
2;0,06;
5;
5;10;2;4;8;
0;74;0;24;76;0;0;0;0;82;0;50;0;0;
2;0,06;
2;
2;5;
0;12;0;0;96;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2;0,02;
3;
6;4;8;
0;0;0;98;0;0;0;92;0;16;0;0;0;0;
17;16;7;7;7;
7;8;15;13;7;
4;11;9;7;9;

Problème 16
3;5;
90;105,66;1,17;1,41;1,76;0,42;
105;74,66;0,71;0,85;1,07;0,51;
75;70,29;0,94;1,12;1,41;0,42;
2;0,04;
2;
4;8;
0;0;0;70;0;0;0;0;0;28;0;0;0;0;
2;0,02;
2;
9;1;
48;0;0;0;0;0;0;0;0;0;38;0;0;0;
2;0,03;
6;
5;10;7;1;8;2;
84;12;0;0;44;0;0;0;52;38;0;62;0;0;
1;0,06;
2;
2;3;
0;40;30;0;0;0;0;
1;0,06;
1;
5;
0;0;0;0;20;0;0;
7;13;11;10;12;
13;11;15;6;19;
13;18;6;13;10;

Problème 17
3;5;
30;27,03;0,9;1,08;1,35;0,4;
105;136,29;1,3;1,56;1,95;0,48;
90;102,68;1,14;1,37;1,71;0,46;
1;0,07;
3;
2;4;1;
22;66;0;18;0;0;0;
1;0;
1;
5;
0;0;0;0;38;0;0;
1;0,02;
1;
5;
0;0;0;0;84;0;0;
2;0,05;
6;
10;2;9;7;5;3;
0;46;28;0;16;0;0;0;64;0;30;100;0;0;
2;0,05;
5;
10;5;8;1;4;
66;0;0;98;84;0;0;0;0;40;0;42;0;0;
6;6;9;5;9;
8;12;4;11;4;
6;8;6;9;8;

Problème 18
3;5;
90;19,76;0,22;0,26;0,33;0,4;
75;79,26;1,06;1,27;1,59;0,44;
105;135,4;1,29;1,55;1,93;0,49;
2;0,01;
6;
8;5;2;7;9;3;
0;12;70;0;54;0;0;0;32;48;32;0;0;0;
2;0;
2;
8;9;
0;0;0;0;0;0;0;0;0;26;90;0;0;0;
2;0,01;
3;
1;4;9;
100;0;0;66;0;0;0;0;0;0;74;0;0;0;
1;0,04;
1;
5;
0;0;0;0;32;0;0;
1;0,05;
3;
2;5;1;
78;52;0;0;98;0;0;
4;5;6;8;7;
7;5;8;7;7;
8;6;8;7;8;

Problème 19
3;5;
45;17,02;0,38;0,45;0,57;0,52;
30;23,15;0,77;0,93;1,16;0,6;
60;57,07;0,95;1,14;1,43;0,55;
2;0,05;
5;
1;10;5;8;2;
70;98;0;0;30;0;0;0;0;42;0;52;0;0;
2;0,06;
2;
4;6;
0;0;0;58;0;0;0;86;0;0;0;0;0;0;
2;0,02;
3;
5;7;6;
0;0;0;0;28;0;0;12;30;0;0;0;0;0;
1;0,05;
1;
1;
26;0;0;0;0;0;0;
2;0,04;
4;
10;1;8;9;
90;0;0;0;0;0;0;0;0;100;30;58;0;0;
7;12;8;7;17;
13;13;20;18;12;
9;16;13;18;11;

Problème 20
3;5;
45;15,87;0,35;0,42;0,53;0,51;
30;13,84;0,46;0,55;0,69;0,55;
105;135,43;1,29;1,55;1,93;0,55;
2;0,07;
1;
3;
0;0;74;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
1;0,02;
2;
5;4;
0;0;0;76;28;0;0;
2;0,04;
2;
8;10;
0;0;0;0;0;0;0;0;0;78;0;52;0;0;
1;0,02;
3;
1;5;4;
34;0;0;62;94;0;0;
1;0,04;
2;
2;5;
0;50;0;0;20;0;0;
9;6;14;11;13;
8;13;8;12;12;
9;8;12;10;8;

	Coût de la solution					Moyennes de déviations				
3- 5 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*	*Déviation N1*	*Déviation N2*	*Déviation C1*	*Déviation C2*	*Déviation Hacid*
1	38084,74	38826,425	40891,125	38581,825	70558,75	0	0,019	0,073	0,013	0,852
2	32421,49	32167,99	30216,41	30403,68	52510,31	0,072	0,064	0	0,006	0,737
3	42305,64	37182,53	40858,355	42424,6	59675,14	0,137	0	0,098	0,14	0,604
4	32388,54	32487,6	32131,96	32983,25	60977,15	0,007	0,011	0	0,026	0,897
5	19718,32	19718,32	20207,33	13072,75	30997,35	0,508	0,508	0,545	0	1,371
6	68356,06	67094,87	68397,675	69045,705	83694,09	0,018	0	0,019	0,029	0,247
7	13719,09	13719,09	15400,41	10313,43	99285,7	0,33	0,33	0,493	0	8,626
8	44605,625	45725,745	45141,085	43651,42	58501,33	0,021	0,047	0,034	0	0,34
9	77594,365	77766,575	78538,115	77515,765	82757,22	0,001	0,003	0,013	0	0,067
10	42453,15	42453,15	41946,63	44060,33	64761,83	0,012	0,012	0	0,05	0,543
11	59188,99	59144,09	59241,81	59241,81	58881,82	0,005	0,004	0,006	0,006	0
12	33132,745	33086,545	33447,325	33132,745	36813,01	0,001	0	0,01	0,001	0,112
13	69906,895	66665,94	64852,675	63810,905	124238,18	0,095	0,044	0,016	0	0,946
14	87144,435	87396,905	87260,285	87203,315	118773,69	0	0,002	0,001	0	0,362
15	51542,49	53974,55	53974,55	53974,55	69451,63	0	0,047	0,047	0,047	0,347
16	34572,97	35345,095	35192,175	35192,175	41763,75	0	0,022	0,017	0,017	0,207
17	69467,56	69467,56	67610,18	67610,18	73798,94	0,027	0,027	0	0	0,091
18	40816,1	40816,1	40070,69	40070,69	47805,54	0,018	0,018	0	0	0,193
19	70284,895	69796,275	70122,84	69908,125	80916,23	0,007	0	0,004	0,001	0,159
20	24158,99	25984,29	26760,41	26476,4	62750,03	0	0,075	0,107	0,095	1,597
3- 5 Fort										
1	66697,8	66763,535	66191,29	66697,8	95412,64	0,007	0,008	0	0,007	0,441
2	84560,06	84613,42	86483,91	84475,825	124472,56	0	0,001	0,023	0	0,473
3	79017	76780,6	80636,69	80636,69	105347,4	0,029	0	0,05	0,05	0,372
4	44156,555	44403,055	43538,62	44467,785	73533,07	0,014	0,019	0	0,021	0,688
5	37740,55	34030,59	38365,19	35190,65	43341,72	0,109	0	0,127	0,034	0,273
6	67820,25	67505,55	69530,72	53490,17	106833,16	0,267	0,262	0,299	0	0,997
7	74705,355	74086,375	77847,69	76552,56	105214,59	0,008	0	0,05	0,033	0,42
8	44580,86	43863,675	43894,85	44607,41	52658,58	0,016	0	0	0,016	0,2
9	102788,95	103171,16	97239,28	96169,5	126098,24	0,068	0,072	0,011	0	0,311
10	47284,235	45741,05	46281,415	48331,195	56946,46	0,033	0	0,011	0,056	0,244
11	114785,27	118994,87	111954,89	116713,97	205555,89	0,025	0,062	0	0,042	0,836
12	116325,34	117037,80	116867,27	112318,53	144293,66	0,035	0,042	0,04	0	0,284
13	66812,17	66430,68	68496,7	66913,61	148381,4	0,005	0	0,031	0,007	1,233
14	64182,07	48914,31	69127,26	48914,31	101646,46	0,312	0	0,413	0	1,078
15	59269,935	62617,99	64650,88	59452,6	85399,75	0	0,056	0,09	0,003	0,44
16	67116,7	67116,7	66858,65	65685,59	107861,12	0,021	0,021	0,017	0	0,642
17	85275,46	80703,51	84526,455	80638,13	108288,56	0,057	0	0,048	0	0,342
18	52395,16	46793,515	52676,345	46793,515	86842,21	0,119	0	0,125	0	0,855
19	105622,08	103423,78	108709,45	103423,78	139895,52	0,021	0	0,051	0	0,352
20	51387,67	48301,94	47949,625	47949,625	73554,77	0,071	0,007	0	0	0,534

Annexe B : Synthèse des résultats issus de l'application des différentes approches sur les problèmes générés

Nous synthétisons dans cette partie l'ensemble des résultats obtenus par l'application des approches que l'on a proposées ainsi que celle de Hacid sur les trois cents soixante problèmes que l'on a générés. Ces résultats sont résumés dans les tableaux suivants. Ils donnent les coûts des solutions trouvées ainsi que les moyennes des moyennes de déviations des différentes méthodes.

3- 10 Faible										
1	36529,27	35169,99	35423,2	36426,9	63215,97	0,038	0	0,007	0,035	0,797
2	93498,47	88160,19	98099,04	93195,175	134501,13	0,06	0	0,112	0,057	0,525
3	85544,06	88718,065	89273,23	90731,205	128336,1	0	0,037	0,043	0,06	0,5
4	75564,095	72291,275	72684,235	71437,26	109968,96	0,057	0,011	0,017	0	0,539
5	50056,15	49454,315	50585,09	46399,095	74507,84	0,078	0,065	0,09	0	0,605
6	84997,32	84997,32	78821,3	78627,62	101728,56	0,081	0,081	0,002	0	0,293
7	71003,805	66781,395	74087,065	74087,065	95914,98	0,063	0	0,109	0,109	0,436
8	76245,02	69225,2	76826,87	75043,61	122910,16	0,101	0	0,109	0,084	0,775
9	44732,11	41830,2	48124,46	44732,11	99852,59	0,069	0	0,15	0,069	1,387
10	77032,275	77032,275	73229,135	75243,505	105628,28	0,051	0,051	0	0,027	0,442
11	68889,995	68889,995	72656,795	72656,795	82456,04	0	0	0,054	0,054	0,196
12	94640	94767,77	93598,96	91682,22	127159,76	0,032	0,033	0,02	0	0,386
13	93989,26	88641,22	88883,96	68352,75	126733,53	0,375	0,296	0,3	0	0,854
14	127260,82	128610,64	128833,06	129425,81	172657,17	0	0,01	0,012	0,017	0,356
15	70915,19	65285,85	70028,06	68502,01	108913,96	0,086	0	0,072	0,049	0,668
16	63944,85	65894,33	64657,94	64535,6	93554,02	0	0,03	0,011	0,009	0,463
17	79390,325	70914,875	71291,835	75489,3	97424,32	0,119	0	0,005	0,064	0,373
18	60763,505	56301,8	61389,46	61031,875	88644,14	0,079	0	0,09	0,084	0,574
19	47073,89	47073,89	47175,65	46157,96	66754,2	0,019	0,019	0,022	0	0,446
20	70118,28	70289,33	70528,105	71409,505	82968,9	0	0,002	0,005	0,018	0,183
3- 10 Fort										
1	106127,35	106960,37	105540,37	105540,37	133330,1	0,005	0,013	0	0	0,263
2	117508,43	107849,64	116885,25	106743,68	183417,54	0,1	0,01	0,095	0	0,718
3	163875,16	163449,44	156316,33	159137,77	246211,15	0,048	0,045	0	0,018	0,575
4	111838,10	121277,60	121816,25	119146,83	130523,77	0	0,084	0,089	0,065	0,167
5	104247,71	103386,56	105637,5	105859,19	107368,81	0,008	0	0,021	0,023	0,038
6	105470,43	105677,14	101255,66	99897,79	136398,93	0,055	0,057	0,013	0	0,365
7	118840,98	119761,53	118910,09	119100,72	153599,48	0	0,007	0	0,002	0,292
8	149250,83	147367,56	150056,63	149886,25	169763,05	0,012	0	0,018	0,017	0,151
9	102816	102154,3	108848,73	102154,3	138058,74	0,006	0	0,065	0	0,351
10	132626,67	132626,67	134625,81	134934,9	199711,61	0	0	0,015	0,017	0,505
11	182425,77	175484,79	177388,91	175182,95	224248,72	0,041	0,001	0,012	0	0,28
12	69920,26	70237,33	71205,37	71002,58	117649,7	0	0,004	0,018	0,015	0,682
13	127810,57	131845,96	131197,48	130892,22	146876,68	0	0,031	0,026	0,024	0,149
14	111551,57	99947,81	110444,35	110970,99	158537,05	0,116	0	0,105	0,11	0,586
15	105596,85	104997,88	103148,73	101000,96	128867,75	0,045	0,039	0,021	0	0,275
16	121066,85	118355,09	120912,94	117041,50	178711,05	0,034	0,011	0,033	0	0,526
17	155874,61	169183,04	168732,45	153837,4	206545,01	0,013	0,099	0,096	0	0,342
18	126775,92	123977,74	132971,06	132971,06	166585,97	0,022	0	0,072	0,072	0,343
19	97461,585	96210,455	99815,33	98473,315	122245,1	0,013	0	0,037	0,023	0,27
20	86377,74	82253,555	89224,275	88141,375	115613,36	0,05	0	0,084	0,071	0,405

3- 20 Faible										
1	99218,96	100539,75	98491,81	99322,185	139153,12	0,007	0,02	0	0,008	0,412
2	144779,32	139806,63	148793,41	137256,99	244434,72	0,054	0,018	0,084	0	0,78
3	60151,11	57075,35	56118,7	58257,86	146050,48	0,071	0,017	0	0,038	1,602
4	75445,665	76106,885	75016,45	72921,775	104262,99	0,034	0,043	0,028	0	0,429
5	132653,07	129414,60	131759,20	120133,8	185744,71	0,104	0,077	0,096	0	0,546
6	208514,17	195319,47	211810,54	198319,16	252909,4	0,067	0	0,084	0,015	0,294
7	140685,18	137884,21	142233,54	130727,15	183964,79	0,076	0,054	0,088	0	0,407
8	101412,16	95544,25	104417,37	92297,425	152444,08	0,098	0,035	0,131	0	0,651
9	103102,27	98919,46	109252	95728,57	132221,06	0,077	0,033	0,141	0	0,381
10	159224,89	159426,75	165687,36	156180,04	250830,69	0,019	0,02	0,06	0	0,606
11	132457,26	131729,69	133471,52	133004,36	207547,58	0,005	0	0,013	0,009	0,575
12	102000,99	99946,9	105487,26	102410,25	148135,86	0,02	0	0,055	0,024	0,482
13	117466,26	108837,18	130075,26	112252,28	194561,62	0,079	0	0,195	0,031	0,787
14	175831,82	172589,35	173854,37	174158,7	186705,12	0,018	0	0,007	0,009	0,081
15	74877,12	76361,96	79041,305	76995,74	117193,2	0	0,019	0,055	0,028	0,565
16	134545,86	136003,44	139167,81	137614,86	196674,74	0	0,01	0,034	0,022	0,461
17	156169,19	156773,2	153605,72	153512,94	230394,13	0,017	0,021	0	0	0,5
18	132862,09	134448,19	138922,24	137629,06	217815,83	0	0,011	0,045	0,035	0,639
19	128977,02	117206,57	124032,10	123965,82	173090,5	0,1	0	0,058	0,057	0,476
20	127470,27	118403,01	124271,58	118403,01	158604,74	0,076	0	0,049	0	0,339
3- 20 Fort										
1	333212,73	338841,14	320875,18	322348,34	509304,67	0,038	0,055	0	0,004	0,587
2	285080,61	269516,81	256990,03	278979	393716,44	0,109	0,048	0	0,085	0,532
3	174449,06	183813,18	187520,02	184785,08	309573,04	0	0,053	0,074	0,059	0,774
4	241039,37	238977,52	237427	232228,62	330228,55	0,037	0,029	0,022	0	0,421
5	180406,48	176116,24	183697,36	176116,24	403579,17	0,024	0	0,043	0	1,291
6	234295,98	229413,79	220903,82	228359,98	343403,86	0,06	0,038	0	0,033	0,554
7	213769,17	208781,26	209706,05	207792,93	329117,61	0,028	0,004	0,009	0	0,583
8	195383,24	187296,83	191762,42	183619,71	418661,24	0,064	0,02	0,044	0	1,28
9	215565,27	215565,27	218708,99	214507,3	349881,9	0,004	0,004	0,019	0	0,631
10	149697,39	121103,6	144963,8	141635,37	200622,23	0,236	0	0,197	0,169	0,656
11	170790,42	171440,37	166921,56	170671,94	333323,94	0,023	0,027	0	0,022	0,996
12	126340,39	121598,06	108717,84	120045,39	313331,39	0,162	0,118	0	0,104	1,882
13	178981,8	178981,8	182164,9	170987,88	268206,78	0,046	0,046	0,065	0	0,568
14	113550,83	113731,53	111730,86	112006,05	181130,93	0,016	0,017	0	0,002	0,621
15	116124,55	124097,26	123236,56	121360,93	282302,46	0	0,068	0,061	0,045	1,431
16	223188,09	216137,02	205003,80	208522,30	351424,48	0,088	0,054	0	0,017	0,714
17	206932,55	207697,47	210089,49	206213,62	289145,84	0,003	0,007	0,018	0	0,402
18	213813,62	212559,99	211800,68	210048,19	489930,94	0,017	0,011	0,008	0	1,332
19	131480,43	124597,96	137943,77	136543,19	204941,21	0,055	0	0,107	0,095	0,644
20	135778,86	127164,69	134073,95	134460,40	297341,08	0,067	0	0,054	0,057	1,338

6- 5 Faible										
1	138853,88	138666,61	138495,19	138495,19	71803,14	0,933	0,931	0,928	0,928	0
2	144022,51	143767,57	158004,81	143767,57	73399,56	0,962	0,958	1,152	0,958	0
3	113236,4	113236,4	113719,58	113719,58	34324,27	2,299	2,299	2,313	2,313	0
4	53361,56	57532,89	61046,65	57689,63	75061,76	0	0,078	0,144	0,081	0,406
5	129814,25	128037,48	128793,74	124951,19	149785,15	0,038	0,024	0,03	0	0,198
6	82611,82	79846,3	78753,48	78516,14	106668,01	0,052	0,016	0,003	0	0,358
7	122448,70	110221,99	123966,57	121883,59	142894	0,11	0	0,124	0,105	0,296
8	115168,94	115848,67	109248,47	106617,92	59274,48	0,942	0,954	0,843	0,798	0
9	98749,19	89632,11	92254,82	86485,49	83747,56	0,179	0,07	0,101	0,032	0
10	170518,64	167473,41	170278,2	167473,31	152964,96	0,114	0,094	0,113	0,094	0
11	138753,24	134636,59	135477,71	136757,58	85862,24	0,615	0,568	0,577	0,592	0
12	84473,05	86868,545	84725,695	82537,04	76002,11	0,111	0,142	0,114	0,085	0
13	133798,68	124169,23	131470,95	123162,53	92840,42	0,441	0,337	0,416	0,326	0
14	91928,16	90358,66	89089,285	91174,93	74869,24	0,227	0,206	0,189	0,217	0
15	108690,58	111253,78	109873,86	111253,78	147888,12	0	0,023	0,01	0,023	0,36
16	117924,7	120924,11	121842,79	115803,04	97625,62	0,207	0,238	0,248	0,186	0
17	84162,42	84162,42	84362,97	83835,63	120018,51	0,003	0,003	0,006	0	0,431
18	153861,33	146186,40	148761,29	148761,29	273501,69	0,052	0	0,017	0,017	0,87
19	83831,14	82352,99	90631,245	87168,96	93183,2	0,017	0	0,1	0,058	0,131
20	98867,315	98541,055	99154,555	99154,555	75936,91	0,301	0,297	0,305	0,305	0
6- 5 Fort										
1	179872,45	179872,45	181647,71	179872,45	87902,46	1,046	1,046	1,066	1,046	0
2	127925,97	126246,08	127046,64	127925,97	135849,87	0,013	0	0,006	0,013	0,076
3	87644,5	77118,93	87607,31	77118,93	127551,91	0,136	0	0,136	0	0,653
4	149682,87	149868,96	145897,76	147113,50	200328,62	0,025	0,027	0	0,008	0,373
5	118801,08	118801,08	118801,08	115215,95	157555,6	0,031	0,031	0,031	0	0,367
6	158178,18	123852,95	160351,29	159383,87	179680,57	0,277	0	0,294	0,286	0,45
7	164227,18	164276,08	164582,56	133012,18	135365,24	0,234	0,235	0,237	0	0,017
8	142063,16	141116,43	139038,18	139038,18	146489,8	0,021	0,014	0	0	0,053
9	98314,635	102390,8	98314,635	101782,01	88252,67	0,114	0,16	0,114	0,153	0
10	154008,98	150693,32	154903,7	154008,98	144684	0,064	0,041	0,07	0,064	0
11	144419,97	144419,97	144419,97	144419,97	143675,48	0,005	0,005	0,005	0,005	0
12	132803,22	135729,28	134080,49	134481,34	136541,62	0	0,022	0,009	0,012	0,028
13	199028,42	194331,71	203292,32	194331,71	149951,78	0,327	0,295	0,355	0,295	0
14	122439,82	121159,12	121288,46	121299,45	155039,3	0,01	0	0,001	0,001	0,279
15	101869,08	102008,66	105035,31	102008,66	140231,38	0	0,001	0,031	0,001	0,376
16	134114,75	124169,82	134114,75	124169,82	124894,16	0,08	0	0,08	0	0,005
17	91450,06	91278,06	94876,17	92904,425	61351,94	0,49	0,487	0,546	0,514	0
18	186292,55	174498,12	186244,88	171967,78	188464,41	0,083	0,014	0,083	0	0,095
19	153936,36	159489,71	161975	154266,26	186017,17	0	0,036	0,052	0,002	0,208
20	135134,10	136011,14	135324,14	136198,17	218715,71	0	0,006	0,001	0,007	0,618

6- 10 Faible										
1	126508,77	123248,67	126495,93	116132,5	123362,15	0,089	0,061	0,089	0	0,062
2	146511,66	144328,52	144263,05	146683,56	161469,06	0,015	0	0	0,016	0,119
3	168849,81	171863,46	175925,71	168630,49	213273,94	0,001	0,019	0,043	0	0,264
4	99191,38	106811,48	106758,31	102027,41	139997,39	0	0,076	0,076	0,028	0,411
5	105960,26	105960,26	105380,63	105380,63	130419,58	0,005	0,005	0	0	0,237
6	121147,64	116683,2	143738,25	143829,75	190506,14	0,038	0	0,231	0,232	0,632
7	139030,74	136115,93	141901,77	135988,16	142945,68	0,022	0	0,043	0	0,051
8	90589,24	92711,34	99901,79	97120,02	100548,52	0	0,023	0,102	0,072	0,109
9	150821,35	147963,63	158101,49	155092,07	177155,81	0,019	0	0,068	0,048	0,197
10	128496,08	126805,35	129463,71	123433,64	117406,46	0,094	0,08	0,102	0,051	0
11	135509,97	139082,53	143844,71	139397,61	143066,58	0	0,026	0,061	0,028	0,055
12	110912,29	111219,44	113810,83	109326,91	117410,03	0,014	0,017	0,041	0	0,073
13	181971,23	184180,46	182991,06	182027,99	152232,28	0,195	0,209	0,202	0,195	0
14	121810,28	114709,87	119411,93	114709,87	124375,67	0,061	0	0,04	0	0,084
15	143107,34	143107,34	152130,16	152130,16	176262,32	0	0	0,063	0,063	0,231
16	131994,5	127741,53	129286,15	115206,72	135959,32	0,145	0,108	0,122	0	0,18
17	125245,49	125245,49	126283,77	125245,49	168391,88	0	0	0,008	0	0,344
18	125272,58	125272,58	122653,6	122653,6	144190,41	0,021	0,021	0	0	0,175
19	135345,33	124982,82	128760,27	129902,20	169251,81	0,082	0	0,03	0,039	0,354
20	118367,76	112330,71	114402,82	109416,86	172761	0,081	0,026	0,045	0	0,578
6- 10 Fort										
1	239370,87	219993,56	234926,59	229270,09	200071,97	0,196	0,099	0,174	0,145	0
2	165649,12	165258,16	162195,25	167042,01	222605,61	0,021	0,018	0	0,029	0,372
3	179836,07	173407,29	176379,49	176819,19	167428,74	0,074	0,035	0,053	0,056	0
4	165983,93	169358,1	169668,62	165705,42	196646,15	0,001	0,022	0,023	0	0,186
5	184314,3	181900,47	180439,03	178437,48	190437,43	0,032	0,019	0,011	0	0,067
6	193821,59	191724,51	197313,13	183162,13	201796,24	0,058	0,046	0,077	0	0,101
7	164476,47	173405,24	163907,05	166380,07	207459,9	0,003	0,057	0	0,015	0,265
8	250280,78	254136,50	261419,09	240436,86	328895,74	0,04	0,056	0,087	0	0,367
9	249669,76	249813,46	256631,93	247646,72	307856,94	0,008	0,008	0,036	0	0,243
10	259777,46	261784,05	263941,25	260720,56	265751,57	0	0,007	0,016	0,003	0,022
11	112944,38	112944,38	106334,06	104533,02	151110,21	0,08	0,08	0,017	0	0,445
12	186801,3	188658,72	185968,17	185968,17	225205,09	0,004	0,014	0	0	0,21
13	162170,87	162310,01	162034,99	161571,46	214908,3	0,003	0,004	0,002	0	0,33
14	253858,33	247961,5	247182,15	248080,37	233601,41	0,086	0,061	0,058	0,061	0
15	194499,77	194071	197790,62	194071	388229,06	0,002	0	0,019	0	1
16	219773,4	213044,66	219317,83	211743,74	271576,77	0,037	0,006	0,035	0	0,282
17	168231,12	177300,67	171460,02	171460,02	196768,18	0	0,053	0,019	0,019	0,169
18	185776,38	211595,61	182696,87	202393,8	212289,16	0,016	0,158	0	0,107	0,161
19	190939,93	190939,93	185706,68	181954,00	287014,39	0,049	0,049	0,02	0	0,577
20	180528,23	178670,32	176533,80	177842,39	207197,88	0,022	0,012	0	0,007	0,173

6- 20 Faible										
1	159727,18	158639,58	158419,63	158302,32	206985,33	0,009	0,002	0	0	0,307
2	232170,12	233371,04	226163,04	216535,55	308669,36	0,072	0,077	0,044	0	0,425
3	169940,98	169863,95	169338,76	169121,10	228253,91	0,004	0,004	0,001	0	0,349
4	213717,67	214402,20	212762,82	213354,20	298211,04	0,004	0,007	0	0,002	0,401
5	192331,75	189929,37	197810,68	192156,49	203183,12	0,012	0	0,041	0,011	0,069
6	201391,63	195007,30	195252,84	194546,65	233652,35	0,035	0,002	0,003	0	0,201
7	219594,30	221687,64	217352,23	215689,85	269080,05	0,018	0,027	0,007	0	0,247
8	139209,91	141298,78	142981,41	138618,57	178935,09	0,004	0,019	0,031	0	0,29
9	160597,97	164745,87	178566,76	169677,69	238910,93	0	0,025	0,111	0,056	0,487
10	265133,83	250826,39	274804,25	251731,74	395843,4	0,057	0	0,095	0,003	0,578
11	249354,03	248210,86	249416,13	246055,39	345125,22	0,013	0,008	0,013	0	0,402
12	162466,84	160298,58	157486,9	158693,33	158196,72	0,031	0,017	0	0,007	0,004
13	170113,31	162848,63	170772,65	168191,75	242436,36	0,044	0	0,048	0,032	0,488
14	223521,75	217210,95	223713,68	219612,49	263833,87	0,029	0	0,029	0,011	0,214
15	192521,51	190123,54	196665,75	193815,50	227162,02	0,012	0	0,034	0,019	0,194
16	245460,97	232054,83	243071,78	239889,07	355253,04	0,057	0	0,047	0,033	0,53
17	174562,68	168737,06	177109,06	168133,02	270213,94	0,038	0,003	0,053	0	0,607
18	201124,22	201616,07	207307,6	192315,46	261302,61	0,045	0,048	0,077	0	0,358
19	141854,72	145727,50	150790,21	142168,69	153520,33	0	0,027	0,062	0,002	0,082
20	200646,28	196882,9	197533,53	197221,03	273720,67	0,019	0	0,003	0,001	0,39
6- 20 Fort										
1	222520,75	213106,81	219348,48	209492,9	244299,81	0,062	0,017	0,047	0	0,166
2	345564,26	354852,01	343284,60	337486,57	479324,04	0,023	0,051	0,017	0	0,42
3	235083,07	239618,44	231136,14	234518,12	286130,29	0,017	0,036	0	0,014	0,237
4	295240,65	295793,9	291163,15	283491,03	417750,14	0,041	0,043	0,027	0	0,473
5	243241,51	241825,55	248643,5	243140,11	312840,1	0,005	0	0,028	0,005	0,293
6	218708,18	217680,99	227717,06	217795,08	309629,8	0,004	0	0,046	0	0,422
7	285834,85	287625,92	284565,56	289076,3	402241,8	0,004	0,01	0	0,015	0,413
8	296151,40	294529,79	300726,79	289944,19	321261,38	0,021	0,015	0,037	0	0,108
9	300704,09	303499,58	293006,47	293796,95	359481,94	0,026	0,035	0	0,002	0,226
10	261554,64	257799,77	261542,31	253764,44	303135,83	0,03	0,015	0,03	0	0,194
11	325689,73	328837,57	321828,28	318844,17	405085,21	0,021	0,031	0,009	0	0,27
12	322941,67	322377,92	313245,97	313868,63	434583,91	0,03	0,029	0	0,001	0,387
13	181058,05	181684,91	183221,72	180859,93	268099,26	0,001	0,004	0,013	0	0,482
14	233117,85	221264,17	231793,03	232430,29	353668,05	0,053	0	0,047	0,05	0,598
15	243046,14	233351,15	240850,82	235985,96	246779,89	0,041	0	0,032	0,011	0,057
16	313860,49	312428,1	316216,79	312428,1	472893,22	0,004	0	0,012	0	0,513
17	190716,67	189786,85	184828,43	187999,68	219764,26	0,031	0,026	0	0,017	0,189
18	304904,62	301810,87	307807,63	292482,51	468518,32	0,042	0,031	0,052	0	0,601
19	343795,84	325299,32	326729,49	313045,55	439960,38	0,098	0,039	0,043	0	0,405
20	243049,62	243095,61	247211,72	239748,16	292307,77	0,013	0,013	0,031	0	0,219

12- 5 Faible										
1	220074,81	220487,37	220887,22	220887,22	204893,93	0,074	0,076	0,078	0,078	0
2	126452,77	116785,43	126535,73	116785,43	144829,93	0,082	0	0,083	0	0,24
3	211927,2	174343,02	211927,2	199970,23	173199,37	0,223	0,006	0,223	0,154	0
4	258891,39	259146,59	259309,03	244430,25	202786,87	0,276	0,277	0,278	0,205	0
5	168146,44	145932,77	167145,96	145932,77	136162,23	0,234	0,071	0,227	0,071	0
6	251102,11	251102,11	251102,11	251102,11	405995,79	0	0	0	0	0,616
7	239404,61	239404,61	239281,36	239281,36	188369,49	0,27	0,27	0,27	0,27	0
8	170184,79	128561,79	169673,38	128561,79	78854,06	1,158	0,63	1,151	0,63	0
9	211332,84	211332,84	210688,19	210688,19	255307,44	0,003	0,003	0	0	0,211
10	220813,37	228417,5	227952,09	225355,67	114786,19	0,923	0,989	0,985	0,963	0
11	333612,06	320728,23	333612,06	320728,23	439818,28	0,04	0	0,04	0	0,371
12	196297,74	189832,03	199985,19	174307,79	279113,35	0,126	0,089	0,147	0	0,601
13	214527,47	214527,47	214527,47	214527,47	199286,83	0,076	0,076	0,076	0,076	0
14	125556,18	112384,48	126264,21	112384,48	187305,61	0,117	0	0,123	0	0,666
15	263729,51	263729,51	255683,2	254378,21	201169,74	0,31	0,31	0,27	0,264	0
16	266942,13	271226,68	273333,4	241359,55	138289,77	0,93	0,961	0,976	0,745	0
17	244366,30	244366,30	243009	243009	219009,1	0,115	0,115	0,109	0,109	0
18	257653,41	263735,27	259062,17	254668,82	331501,41	0,011	0,035	0,017	0	0,301
19	193123,03	193123,03	193123,03	193123,03	199770,49	0	0	0	0	0,034
20	180135,89	178490,58	177741,27	177741,27	307233,9	0,013	0,004	0	0	0,728
12- 5 Fort										
1	326085,2	312522,11	324007,35	325457,78	579604,26	0,043	0	0,036	0,041	0,854
2	333472,51	304788,86	333393,98	316471,72	462634,46	0,094	0	0,093	0,038	0,517
3	261675,96	261675,96	254970,84	247290,84	281944,17	0,058	0,058	0,031	0	0,14
4	186011,85	192165,02	191005,32	194759,32	293381,25	0	0,033	0,026	0,047	0,577
5	185137,03	179995,92	191879,26	152666,44	192838,5	0,212	0,179	0,256	0	0,263
6	353030,16	353030,16	352911,90	352911,90	522245,24	0	0	0	0	0,479
7	260759,17	260759,17	261259,48	261259,48	275829,6	0	0	0,001	0,001	0,057
8	421501,71	434629,26	433632,12	433632,12	684378,55	0	0,031	0,028	0,028	0,623
9	367618,95	353792,37	361617,52	368456,97	276563,63	0,329	0,279	0,307	0,332	0
10	199392,48	199392,48	200094,24	200094,24	234632,57	0	0	0,003	0,003	0,176
11	241208,44	234456,95	234779,55	236220,61	410655,15	0,028	0	0,001	0,007	0,751
12	313955,66	313955,66	313955,66	313955,66	361028,49	0	0	0	0	0,149
13	302198,64	302198,64	307199,67	307199,67	368485,03	0	0	0,016	0,016	0,219
14	210057,66	210057,66	210057,66	210057,66	163775,72	0,282	0,282	0,282	0,282	0
15	239304,89	239304,89	239809,22	239809,22	317903,71	0	0	0,002	0,002	0,328
16	291861,03	291530,66	291478,88	293195,64	194543,35	0,5	0,498	0,498	0,507	0
17	178556,04	163677,93	179157,28	179157,28	111549,15	0,6	0,467	0,606	0,606	0
18	275491,93	275615,48	276106,09	276106,09	351796,69	0	0	0,002	0,002	0,276
19	440422,93	440422,93	440004,04	440004,04	355658,16	0,238	0,238	0,237	0,237	0
20	398097,50	398097,50	398097,50	398097,50	496709,66	0	0	0	0	0,247

12-10Faible										
1	346360,68	345825,98	348752,05	327847,1	337268,16	0,056	0,054	0,063	0	0,028
2	262500,54	266230,02	262723,69	260868,44	177243,92	0,481	0,502	0,482	0,471	0
3	282149,73	277777,57	272171,88	271996,79	267774,69	0,053	0,037	0,016	0,015	0
4	271866,39	270718,63	271359,4	266303,59	287982,24	0,02	0,016	0,018	0	0,081
5	291733,32	291733,32	292726,90	292726,90	240278,29	0,214	0,214	0,218	0,218	0
6	220076,34	222283,15	223389,03	222192,46	169183,52	0,3	0,313	0,32	0,313	0
7	180512,33	181102,73	185116,77	181168,44	188662,67	0	0,003	0,025	0,003	0,045
8	207739,78	204635,23	205174,27	195686,99	228587,13	0,061	0,045	0,048	0	0,168
9	228620,42	222923,15	225316,04	225609,72	278208,86	0,025	0	0,01	0,012	0,248
10	251649,73	238175,83	251720,15	214587,17	322845,9	0,172	0,109	0,173	0	0,504
11	243903,20	242949,09	244848,08	245731,77	245371,94	0,003	0	0,007	0,011	0,009
12	294593,27	294891,45	293438,49	295269,57	286619,4	0,027	0,028	0,023	0,03	0
13	264366,68	252269,67	263689,91	262947,63	260658,21	0,047	0	0,045	0,042	0,033
14	247355,45	240030,73	244642,72	233579,19	227767,07	0,086	0,053	0,074	0,025	0
15	217063,68	206731,84	211383,48	211046,49	144076,71	0,506	0,434	0,467	0,464	0
16	227637,65	223866,18	226503,82	224912,04	222250,97	0,024	0,007	0,019	0,011	0
17	254547,07	254250,37	254234,12	254941,44	250678,08	0,015	0,014	0,014	0,017	0
18	185554,86	167285,48	181562,52	171890,23	123123,96	0,507	0,358	0,474	0,396	0
19	241487,47	242986,72	245567,46	245518,43	212079,01	0,138	0,145	0,157	0,157	0
20	214562,05	200727,08	216325,52	216109,41	185174,62	0,158	0,083	0,168	0,167	0
12-10 Fort										
1	272419,19	271271,7	270579,2	271001,17	276663,9	0,006	0,002	0	0,001	0,022
2	451485,56	454138,76	453955,25	455441,71	401592,45	0,124	0,13	0,13	0,134	0
3	405389,49	406734,66	409901,81	407719,77	597847,21	0	0,003	0,011	0,005	0,474
4	520105,93	525608,2	524326,81	511606,52	700784,14	0,016	0,027	0,024	0	0,369
5	365567,52	355970,97	369868,18	340167,28	431002,9	0,074	0,046	0,087	0	0,267
6	271435,68	271435,68	270100,06	270100,06	249610,96	0,087	0,087	0,082	0,082	0
7	392450,6	375091,91	387329,44	386118,74	297310,01	0,32	0,261	0,302	0,298	0
8	226766,69	222079,89	225294,24	222079,89	369924,11	0,021	0	0,014	0	0,665
9	229915,7	225059,99	230456,04	225059,99	166291,11	0,382	0,353	0,385	0,353	0
10	441456,6	449890,92	453236,41	453236,41	445960,41	0	0,019	0,026	0,026	0,01
11	345119,17	341348,41	326472,57	345679,6	275962,76	0,25	0,236	0,183	0,252	0
12	262342,23	250432,96	261234,74	250432,96	293795,25	0,047	0	0,043	0	0,173
13	251505,99	251505,99	247480,63	244287,11	279778,61	0,029	0,029	0,013	0	0,145
14	345082,80	347579,89	356826,75	346036,83	447476,33	0	0,007	0,034	0,002	0,296
15	256443,15	256416,78	254353,43	257377,21	250232,68	0,024	0,024	0,016	0,028	0
16	381285,38	375575,4	379550,01	364861,45	321456,28	0,186	0,168	0,18	0,135	0
17	289878,47	281714,18	286411,76	279652,21	668822,44	0,036	0,007	0,024	0	1,391
18	369388,79	363218,88	365875,85	362331,59	269095,22	0,372	0,349	0,359	0,346	0
19	474809,98	457404,79	473444,32	450254,59	363055,07	0,307	0,259	0,304	0,24	0
20	319312,41	307490,43	308864,38	301205,62	415669,21	0,06	0,02	0,025	0	0,38

12-20 Faible										
1	320207,85	330621,69	335974,63	331070,80	446954,43	0	0,032	0,049	0,033	0,395
2	323272,10	323615,99	318139,29	322435,79	345072,65	0,016	0,017	0	0,013	0,084
3	251874,83	244337,05	254560,77	240788,29	308272,3	0,046	0,014	0,057	0	0,28
4	270695,27	265875,21	267644,30	258981,88	292659,81	0,045	0,026	0,033	0	0,13
5	330116,45	329276,59	334084,54	331197,05	386593,26	0,002	0	0,014	0,005	0,174
6	310244,59	308636,03	313287,9	312458,96	425005,44	0,005	0	0,015	0,012	0,377
7	405503,74	402575,75	402733,68	405948,77	471772,95	0,007	0	0	0,008	0,171
8	259715,1	266767,23	256037,67	257864,13	268936,21	0,014	0,041	0	0,007	0,05
9	262253,64	262523,78	261681,21	261530,34	263818,14	0,002	0,003	0	0	0,008
10	333150,37	308506,61	332347,94	301355,07	301682,75	0,105	0,023	0,102	0	0,001
11	334964,23	322588,98	327552,08	325096,83	325563,92	0,038	0	0,015	0,007	0,009
12	374757,66	375420,40	375566,65	375566,65	458319,5	0	0,001	0,002	0,002	0,222
13	294541,26	294154,42	302658,13	299406,70	318945,32	0,001	0	0,028	0,017	0,084
14	287787,72	283521,2	284354,85	286155,75	282361,3	0,019	0,004	0,007	0,013	0
15	289378,37	289373,91	286637,6	284745,57	306813,81	0,016	0,016	0,006	0	0,077
16	222064,82	221842,28	217750,38	216255,24	181217,61	0,225	0,224	0,201	0,193	0
17	296851,98	292985,24	293553,1	293817,85	271596,43	0,092	0,078	0,08	0,081	0
18	261981,17	267375,85	257347,38	256715,92	266708,3	0,02	0,041	0,002	0	0,038
19	293103,26	279168,91	311152,5	286616,07	298764,96	0,049	0	0,114	0,026	0,07
20	219056,07	211741,71	222237,01	206028,49	232478,31	0,063	0,027	0,078	0	0,128
12- 20 Fort										
1	615961,24	599287,75	603667,50	605575,05	892274,71	0,027	0	0,007	0,01	0,488
2	480001,51	466735,75	463318,88	465731,95	474539,85	0,036	0,007	0	0,005	0,024
3	486281,78	473204,73	481168,67	481168,67	596947,89	0,027	0	0,016	0,016	0,261
4	392909,74	387758,66	389575,58	393681,6	378766,68	0,037	0,023	0,028	0,039	0
5	349884,5	350101,17	336657,00	339565,07	479104,07	0,039	0,039	0	0,008	0,423
6	432701,64	435801,87	453441,6	425374,50	531419,75	0,017	0,024	0,065	0	0,249
7	621866,64	587848,97	615014,22	620330,83	900516,53	0,057	0	0,046	0,055	0,531
8	304046,28	305749,74	311250,06	311250,06	372342,77	0	0,005	0,023	0,023	0,224
9	390230,84	389405,07	386826,86	382531,86	455378,73	0,02	0,017	0,011	0	0,19
10	440224,59	440767,64	441363,76	442671,15	629609,46	0	0,001	0,002	0,005	0,43
11	349444,84	340898,73	345591,78	341543,15	389292,29	0,025	0	0,013	0,001	0,141
12	398631,71	390958,27	409074,38	390822,36	403907,75	0,019	0	0,046	0	0,033
13	479916,38	476031,97	469581,88	468374,18	508068,16	0,024	0,016	0,002	0	0,084
14	523495,17	528155,85	519494,36	523341,64	619171,89	0,007	0,016	0	0,007	0,191
15	532941,3	540098,93	550318,3	537120,04	594090,78	0	0,013	0,032	0,007	0,114
16	551570,80	552097,27	539595,99	533293,90	872171,41	0,034	0,035	0,011	0	0,635
17	461252,45	460854,75	461497,82	450344,25	425043,32	0,085	0,084	0,085	0,059	0
18	550264,08	550264,08	549830,78	543088,00	860983,09	0,013	0,013	0,012	0	0,585
19	457560,31	458533,07	454543,95	454419,42	623037,83	0,006	0,009	0	0	0,371
20	146800,16	146800,16	311714,64	310569,24	380962,18	0	0	1,123	1,115	1,595

Le tableau suivant donne une synthèse des temps d'obtention des solutions par l'application des différentes méthodes que l'on a proposées ainsi que celle de Hacid sur les trois cents soixante problèmes que l'on a générés.

3- 5 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	790	1421	761	1601	520
2	650	1341	790	1482	661
3	802	1501	841	1632	721
4	670	1492	940	1461	4706
5	701	1341	730	1271	410
6	852	1562	870	1683	2562
7	790	1311	910	1791	4586
8	920	1811	921	1893	4557
9	810	1362	721	1271	561
10	870	1632	881	1691	2493
11	921	1621	910	1351	4847
12	1001	1532	912	1552	2393
13	771	1511	872	1421	5638
14	821	1611	902	1921	601
15	741	1472	771	1461	2503
16	1020	1733	831	1612	690
17	790	1491	890	1703	2663
18	1052	1752	951	2003	2713
19	731	1391	871	1311	510
20	1060	1522	1041	1652	2443
3- 5 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	1080	1572	972	1732	690
2	790	1462	800	1512	631
3	910	1751	1021	1692	619
4	850	1492	870	1432	770
5	1100	1472	1061	1722	500
6	830	1892	1060	1572	4647
7	1020	1891	961	1972	2643
8	1011	1822	1132	1712	2674
9	921	1632	890	1633	2312
10	691	1481	821	1372	480
11	961	1823	1040	1923	2774
12	840	1552	770	1512	2492
13	880	1672	910	1612	750
14	840	1821	1041	1802	2834
15	960	1642	951	1702	2303
16	691	1542	862	1703	611
17	1080	1943	1131	1972	2742
18	931	1562	850	1442	480
19	910	1743	1030	1663	2604
20	610	1472	790	1501	190

3- 10 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	1122	3865	1562	3464	1341
2	2172	3394	2233	3935	3945
3	1753	3133	1821	3245	5638
4	1693	3705	2172	3806	10536
5	1891	3183	1752	3625	3604
6	2293	3444	2412	3855	3816
7	1611	3634	2033	3073	8511
8	1552	3074	1922	2944	6268
9	1581	3014	1872	2984	3444
10	2023	3585	1962	3595	6660
11	1932	3095	1763	3515	3704
12	2143	3195	1623	3445	4956
13	1843	3183	1812	3375	3674
14	1942	3375	2283	3395	8781
15	1781	3093	1992	3093	6789
16	2033	3485	1772	3825	8572
17	1712	3444	1892	3304	10374
18	1621	3315	2033	3545	3555
19	1803	3224	1803	3354	3384
20	1843	3605	2062	3654	3464
3- 10 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	2413	3844	2244	4345	4435
2	1811	3305	1923	3495	1271
3	2083	3685	2342	3935	10184
4	2353	3525	1572	3615	1522
5	1583	3495	1691	3164	1461
6	1923	3594	1991	3455	10715
7	1561	3435	1843	2863	3985
8	2062	3495	2082	3845	8421
9	2062	3315	1922	3515	6067
10	1752	3274	1843	2973	1541
11	2153	3565	2293	3454	6339
12	2302	3885	2392	3625	4055
13	2292	3695	1963	3744	5177
14	2063	3884	2133	3915	7179
15	1862	3814	2113	3635	5989
16	1951	3555	1983	3816	1412
17	2023	3876	1831	3855	1741
18	2073	3606	2093	4436	5026
19	2262	3474	2003	3193	2203
20	2153	3443	1823	3505	4365

3- 20 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	3625	6449	3343	8872	13819
2	3434	6459	4195	7701	14030
3	3895	6849	3414	9213	7311
4	4215	7961	4917	9314	13499
5	2924	6759	4116	10154	9072
6	3324	7261	3745	9023	11617
7	3724	6468	2893	6920	13689
8	3394	7251	3444	8963	11987
9	3855	8081	3284	9364	9934
10	2652	5127	2254	5228	12828
11	3144	7110	3985	8793	14119
12	3544	7270	3945	10074	9353
13	4046	6929	5739	8522	9524
14	3295	7751	3414	9874	14311
15	3575	6799	3835	10204	7421
16	3794	6518	4075	9362	11236
17	3144	6869	3525	7891	17945
18	4085	8170	3916	10464	9172
19	3384	6249	3515	9554	18206
20	3755	9614	3685	11156	9954
3- 20 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	3195	6137	3635	7460	13819
2	2213	4846	2743	6359	4876
3	3575	7090	4415	9594	12297
4	3555	7980	4035	9583	7571
5	3285	6269	3275	8132	11506
6	3905	6790	4166	9163	9272
7	3253	7189	3235	8551	9112
8	3695	7480	4086	8482	6959
9	4005	7670	3745	7870	6909
10	3995	9063	4776	9684	11907
11	3354	6578	3264	8051	11425
12	3856	6899	4096	9583	15812
13	3234	7120	3294	8171	9053
14	3946	7370	4587	9584	13459
15	3765	6990	3154	7962	11697
16	3013	5086	3004	7139	4546
17	2452	4545	2423	6258	5327
18	3675	7269	4607	9312	8121
19	3344	6629	4406	9943	3013
20	3834	7721	4046	9303	9284

6- 5 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	1592	2854	1532	2834	851
2	1391	2934	1593	3374	3535
3	510	922	460	931	4896
4	1663	3285	1663	2703	3464
5	1761	3324	1581	3374	5487
6	1451	2843	1311	2634	7459
7	2043	2784	1823	3175	8120
8	380	742	551	870	400
9	1902	2594	1622	2843	1220
10	1451	2574	1481	3064	1151
11	1442	2743	1562	2632	3304
12	1721	2923	1402	2702	3083
13	1552	2643	1472	2564	2973
14	1582	3164	1793	2623	3585
15	1291	2472	1512	2404	650
16	1411	2843	1211	2603	3054
17	1402	2883	1481	2483	1001
18	1151	2673	1521	2472	1101
19	1601	2945	1812	2723	5477
20	1181	2102	1282	2153	1181
6- 5 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	641	1552	701	1192	6839
2	1622	2844	1673	3063	3464
3	1873	3415	1801	2945	961
4	1553	2974	1783	3215	3505
5	1322	2362	1391	3124	3244
6	2153	3024	1812	3204	3395
7	1752	2933	2022	3204	3174
8	2242	3053	2122	3645	5597
9	1421	2573	1362	2873	940
10	1290	3354	1702	2953	870
11	1981	3464	1791	2905	5156
12	2154	3184	1731	3144	5288
13	800	870	621	1072	7069
14	1933	3444	1851	3175	3184
15	1532	2763	2033	3105	1261
16	1673	3475	2113	3244	3665
17	2023	3354	1791	3454	3184
18	2174	3464	2574	3525	1311
19	1962	3384	1822	3104	3525
20	1883	3555	1872	3014	3335

6- 10 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	2854	5558	2384	5447	9504
2	2754	5428	2825	5737	4486
3	3105	5667	3064	6399	4557
4	3075	5437	2814	5508	6248
5	2993	5787	3144	5117	4956
6	2723	4646	2544	4887	4886
7	3164	5377	2903	6809	9192
8	3575	6348	2914	6119	4546
9	3364	5457	3185	6119	11816
10	3415	6179	3634	5598	10744
11	2953	5146	2764	5337	1872
12	3093	6678	3184	5657	6778
13	2643	5267	2833	5457	10305
14	3674	6209	3415	5768	8462
15	3105	5337	2333	5618	4747
16	3495	6449	3384	6228	9021
17	4135	5978	3876	6960	4707
18	2923	5327	2984	4416	9183
19	3124	4977	2703	5679	9193
20	2563	5777	2965	5527	4546
6- 10 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	3354	5928	4025	6549	1933
2	3606	6809	3494	4787	11185
3	3575	6789	3423	6799	6539
4	3704	6419	2903	5928	4597
5	3364	6809	3754	6339	4196
6	3594	5909	4235	6228	2604
7	3485	5977	2925	5538	2002
8	3434	6949	3586	6400	8822
9	3444	5799	3556	6079	4747
10	3454	5839	3135	5677	6949
11	4355	7241	4165	7621	11325
12	4035	6700	4176	6047	9073
13	3224	6459	3344	6709	9473
14	3665	6789	3605	6328	8412
15	3716	6680	4325	6960	7130
16	4206	6438	4035	7210	10524
17	3045	6799	2853	6660	4616
18	3726	5919	3224	6368	2003
19	3706	6608	3475	6418	4536
20	3454	7389	3735	5578	12547

6- 20 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	5538	13890	7340	13999	6680
2	5437	13068	6339	11816	7039
3	6640	12297	5717	13340	11907
4	5928	11475	5748	14450	9614
5	5768	11947	5757	16032	14159
6	5226	11907	5707	13188	13548
7	6358	13579	6979	13099	13308
8	5927	11886	5648	12978	10575
9	7831	13298	7291	10875	9713
10	6640	13389	7461	13579	24063
11	5949	11516	5978	14460	11316
12	6158	12328	6298	13478	14260
13	6119	14069	5768	14011	13840
14	6018	11897	5218	12878	9975
15	6478	13418	5107	13609	10694
16	6269	12558	5097	14500	11746
17	6419	12016	6678	14109	16504
18	5828	10104	4916	13339	14081
19	5758	11626	5707	12267	6658
20	5968	13218	6650	13829	9703
6- 20 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	6599	13178	6459	14420	6458
2	5408	11036	6499	13178	4375
3	8502	13759	6349	14800	15432
4	5737	11407	6079	14431	17274
5	6680	12537	6879	14940	8532
6	6820	12779	5517	16354	15182
7	6929	14281	7941	15301	11516
8	6359	9483	5288	10475	8433
9	5268	9884	5727	11786	8511
10	7179	12406	5006	12338	11035
11	6670	13189	6599	15182	12468
12	5968	10245	6760	12908	8141
13	6249	14670	7229	15261	16983
14	7130	14891	7320	16975	14450
15	5067	10225	6399	11316	9133
16	6919	13058	7259	14260	13448
17	7089	13310	6048	13379	10003
18	7150	14981	6809	14089	13529
19	5027	8932	5567	10313	14810
20	5427	10585	5767	11165	9994

12- 5 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	2763	5107	2603	5267	8001
2	2774	4496	2182	4466	2033
3	2293	4555	3033	5587	1763
4	2894	5528	2453	4876	5078
5	910	1562	961	1582	9232
6	2814	5587	2643	4786	2492
7	2342	4856	2754	5018	1801
8	2212	5168	2843	4436	2383
9	1832	4447	3265	3755	2113
10	2853	5188	3215	5286	4205
11	3093	5266	3685	5758	5538
12	3155	4537	2964	5446	5578
13	2925	5087	2944	5107	2723
14	2793	5527	3394	6390	1963
15	3284	6007	3485	5146	7731
16	2913	5528	3354	4827	4675
17	2913	5739	3654	6399	2994
18	3033	4988	3125	5727	8412
19	2934	5268	3113	5858	4996
20	2574	5036	2333	4977	5106
12- 5 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	2894	4936	3325	5578	6849
2	2883	5948	3674	5817	7010
3	490	440	3344	5797	2863
4	3985	6558	3805	6179	7331
5	3696	5077	3264	6057	4206
6	421	430	409	420	4405
7	3834	5677	4044	5807	6940
8	3384	5328	410	440	4405
9	3144	5317	3515	6239	4477
10	351	420	390	410	2133
11	2914	5548	3834	5537	2352
12	341	371	410	410	1362
13	3534	6689	4426	6620	9144
14	451	500	491	531	1932
15	440	530	470	480	6738
16	2673	5226	2923	5868	4515
17	3274	5528	349	410	2213
18	2934	5857	370	410	2392
19	351	390	390	410	6849
20	390	439	431	480	1532

12- 10Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	5707	11677	6438	11285	6708
2	5306	10775	5077	11756	9774
3	6059	11927	7200	12587	9353
4	5127	10965	4487	10435	6499
5	5978	10394	4887	10905	6509
6	6880	11797	5367	11355	9354
7	5698	10404	4725	11415	6689
8	5547	11236	5547	10394	9473
9	6158	12327	5678	11707	10595
10	4596	8882	5148	10043	9624
11	7450	11295	7010	11896	19317
12	4847	10666	5186	10023	5447
13	7941	11876	6159	10735	12166
14	5817	11786	5747	9944	8952
15	6438	12057	6048	10193	11806
16	5397	11265	4966	11777	7169
17	5498	10125	5508	11036	6429
18	5097	11136	5578	11346	5689
19	6819	11036	4967	11236	12697
20	5857	10746	6889	11146	3254
12- 10 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	6137	11686	5306	9973	9354
2	6167	11225	6189	11806	4396
3	7230	12558	6999	13610	7770
4	6848	11435	6449	10834	6720
5	6499	12238	6057	10855	14960
6	4776	11175	7060	12117	4335
7	6238	11216	6037	12127	8853
8	4938	11737	7249	12328	14321
9	4607	10475	6259	8132	6950
10	5949	10465	6308	10565	6949
11	6359	12448	6660	13087	9612
12	7219	12427	7141	13007	11476
13	7551	13127	6549	10805	14971
14	7511	12027	6849	13529	9624
15	5308	10905	6208	10143	11626
16	6518	10584	5618	10595	11637
17	6588	13208	7079	12708	7000
18	5857	9574	5017	10815	6920
19	6959	11136	5868	12016	9873
20	4396	10985	5117	10906	11236

12- 20 Faible	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	12227	22102	9633	25627	12227
2	11586	22461	13669	19578	14129
3	10484	20239	9403	22942	8912
4	10765	22823	10014	25155	20058
5	10795	23292	9923	23744	20048
6	11807	22462	11345	19298	16383
7	12147	19798	12398	21990	27599
8	12397	23052	15052	18857	14130
9	14169	26127	8432	23242	12927
10	9483	21921	10755	22202	11516
11	13448	23113	14121	17205	16865
12	11536	21810	11446	17515	15441
13	8942	15371	7851	14310	20959
14	12227	23263	14480	26739	11005
15	11756	20909	10224	23773	10023
16	11687	21480	9973	23493	14461
17	10695	20530	9763	19468	12258
18	11877	20048	6970	19026	9102
19	10885	21510	11786	22632	19528
20	12007	23453	7861	19908	13379
12- 20 Fort	*N1*	*N2*	*C1*	*C2*	*HACID*
1	10153	17956	9524	29262	13478
2	11866	20250	11546	21049	16453
3	11536	21631	11356	28310	22052
4	9784	23222	9504	22962	14241
5	10435	22090	12738	23573	10814
6	11527	25746	12939	23052	24946
7	11636	21861	10585	22022	17394
8	12798	20950	14330	18295	15673
9	8762	16443	8290	24985	10696
10	15802	27658	11407	21380	17005
11	8632	22531	10996	16653	7250
12	12417	23323	10265	25967	20289
13	12518	23383	10274	25676	16664
14	13779	27519	10424	30223	22933
15	12528	27819	12777	21030	20840
16	12478	26156	12598	21540	14290
17	11656	21790	10795	24364	17094
18	9053	18846	7861	28511	17324
19	9252	18427	5837	14431	14411
20	10745	24004	13049	32046	11417

Résumé

L'évolution de l'environnement des entreprises a transformé la nature des relations entre elles, qui de simple relations d'achat entre clients et fournisseurs se sont transformées en des rapports plus contractualisés et plus durables. Ces derniers imposent à ces entreprises de revoir leurs méthodes de gestion et de production pour une meilleure synchronisation de leurs flux.

Nous nous intéressons dans ce mémoire à une relation particulière entre clients et fournisseurs, celle fondée sur le principe de livraisons cycliques, selon lequel le fournisseur s'engage à livrer des quantités de produits à des intervalles de temps fixes et de façon répétitive. L'intérêt de ce mode de livraison et qu'il permet, aux donneurs d'ordres, une gestion extrêmement simple des approvisionnements et facilite l'organisation des activités.

Comme réponse à ce type de livraisons et afin de synchroniser leurs flux de production à ceux de livraisons, les entreprises adoptent la production cyclique. L'avantage de cette dernière est qu'elle permet entre autres de réduire les coûts engendrés par la fabrication, et de simplifier l'organisation du travail.

Notre travail consiste alors en l'évaluation et la mise en œuvre d'un plan de production cyclique, pour un atelier de type Flow Shop pur fabricant plusieurs produits, lorsque les appels de livraisons sont cycliques. Nous proposons une nouvelle méthode déterminant un plan de production cyclique minimisant des coûts de lancements, coûts de stockage et des coûts de fabrication.

Nous introduisons dans un premier temps le contexte de notre travail en précisant les différentes hypothèses que l'on pose. Nous proposons par la suite une revue de la littérature sur les différents travaux réalisés, et proposons une classification des problèmes traitant de la production cyclique étudiés par la communauté scientifique. Nous exposons également la méthode que l'on propose pour la détermination d'un plan de production cyclique minimisant les différents coûts que l'on considère.

Nous présentons une analyse des résultats issus de l'application de notre approche ainsi que ses variantes sur un ensemble de benchmarks générés aléatoirement et respectant les traits caractéristiques des problèmes réels. Nous réalisons une étude comparative des approches que l'on propose à l'une de celles proposées dans la littérature. Nous terminons ce mémoire par une conclusion et un ensemble de voies de recherches futures.

Mots- clés *: Livraison cyclique, Production cyclique, Lot sizing, Ordonnancement, Flow Shop.*