



**HAL**  
open science

# Nouvelles approches pour la formation des cellules de production dans le cadre d'une démarche de conception

Wafik Hachicha

► **To cite this version:**

Wafik Hachicha. Nouvelles approches pour la formation des cellules de production dans le cadre d'une démarche de conception. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2009. Français. NNT: . tel-00430450

**HAL Id: tel-00430450**

**<https://theses.hal.science/tel-00430450>**

Submitted on 6 Nov 2009

**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.



---

# THÈSE

*Présentée à*

L'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax

*En vue de l'obtention du*

## DOCTORAT

**Dans la discipline Mécanique**

**Nom du doctorat : Génie Mécanique**

*Par*

**Wafik HACHICHA**

Mastère en Mécanique et ingénierie  
Ingénieur en Génie Industriel

---

**NOUVELLES APPROCHES POUR LA FORMATION DES  
CELLULES DE PRODUCTION DANS LE CADRE D'UNE  
DÉMARCHE DE CONCEPTION**

---

*Soutenu publiquement le 13 mars 2009, devant le jury composé de :*

**Président :** M. Foued HALOUANI (Professeur à l'ENIS)  
**Rapporteurs :** M. Chedly BRADAI (Maître de conférences à l'ENIS)  
M. Samir LAMOURI (Professeur à SUPMECA)  
**Examineur :** M. Zoubeir BOUAZIZ (Maître de conférences à l'ENIS)  
**Encadreurs :** M. Mohamed HADDAR (Professeur à l'ENIS)  
M. Faouzi MASMOUDI (Maître de conférences à l'ENIS)

## REMERCIEMENTS

*Au moment où s'achève l'écriture de ce rapport de thèse, j'aurais passé Plus de trois années à l'Unité de Mécanique, Modélisation et Production (U2MP) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS). Je remercie en premier lieu son directeur, le Professeur **Mohamed Haddar**, de m'y avoir accueilli. Je tiens également à lui exprimer ma profonde gratitude, en tant que directeur de thèse, pour son aide qui a permis d'effectuer cette thèse dans les meilleures conditions possibles. Par ailleurs, je tiens à remercier les membres du U2MP, chercheurs et doctorants pour leur soutien et qui ont permis de faire avancer ces travaux dans un contexte agréable.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement, mon encadreur Monsieur **Faouzi MASMOUDI** associant des qualités pédagogiques à des rapports conviviaux, son encadrement a été précieux et professionnel ce qui m'a permis d'atteindre les objectifs qui avaient été assignés à cette thèse. Encore un grand remerciement pour son soutien sans faille.*

*J'exprime mon profond respect et mes remerciements chaleureux à Monsieur **Foued HALOUANI**, le président du jury et à tous les membres de jury à savoir Monsieur **Chedly BRADAI**, Monsieur **Samir LAMOURI** et Monsieur **Zoubeir BOUAZIZ** qui ont bien voulu juger ce travail.*

*Enfin, j'ai une pensée toute particulière pour ma mère, mon père, mon épouse, ma fille, mes sœurs, ma famille et tous mes amis qui ont si chaleureusement supporté mon indisponibilité et qui, de près comme de loin m'ont aidé et encouragé au moment opportun.*

## RÉSUMÉ

Dans ce travail de thèse, nous avons proposé des nouvelles approches pour la conception des aménagements cellulaires (AC) et plus particulièrement pour la formation des cellules (FC) de production. La première approche consiste à appliquer la méthode d'analyse en composantes principale sur la matrice d'incidence (produits/machines). La matrice de corrélation statistique est exploitée comme une matrice de similarité. L'analyse du plan principal permet de grouper simultanément les machines en groupes et les produits en machines. Des algorithmes pour l'affectation des éléments exceptionnels sont également proposés.

Le problème de FC devient plus complexe en présence de gammes alternatives. Dans ce contexte, nous avons proposé une deuxième nouvelle approche qui se base sur l'application de la méthode des plans d'expériences (factoriel, méthode de Taguchi). L'objectif étant de choisir, pour chaque produit, la gamme préférentielle permettant l'optimisation des indicateurs de performance de FC. En plus, ce traitement permet d'introduire un aspect d'analyse de la sensibilité de la solution finale ignorée par les techniques antérieures de la FC.

La troisième approche porte sur le développement d'une démarche de conception basée sur la combinaison de la conception axiomatique avec la technique des plans d'expériences. Elle permet de lister et d'ordonner les différentes tâches nécessaires pour concevoir un AC. Les autres approches que nous avons développées sont validées à travers cette démarche.

Partant de l'une des solutions initiales de répartition des machines en cellules en présence d'éléments exceptionnels, la quatrième approche proposée consiste à appliquer la méthode de simulation à événements discrets pour évaluer puis améliorer la performance des cellules de production. Plusieurs stratégies pourront être étudiées : admettre des éléments exceptionnels dans les différentes cellules, dupliquer les machines exceptionnelles, etc.

Les résultats des études comparatives basées sur plusieurs indicateurs de performance, indiquent que les approches proposées sont efficaces, efficientes et pratiques surtout dans leurs accessibilités à travers la disponibilité de plusieurs logiciels dans le marché.

**Mots clés:** Aménagement cellulaire, Formation de cellules, Gammes alternatives, Eléments exceptionnels, Corrélation statistique, Analyse en composantes principales, Conception axiomatique, Plan d'expérience, Méthode de Taguchi, Simulation, Indices de performance.

# ABSTRACT

The aim of this work is to propose new approaches for the design of cellular manufacturing (CM) and principally for the cell formation (CF) which consist in identifying the part families and machine groups. The scope of the first approach is to formulate a multivariate approach based on a correlation analysis for solving CF problem. The correlation matrix is used as similarity coefficient matrix. A scatter plot analysis is applied as a cluster analysis to make simultaneously machine groups and part families. Finally, an algorithm is improved to assign exceptional machines and exceptional parts.

The CF problem are increasingly complicated if parts are assigned with alternative routings. The second proposed approach is a first of its kind in CM literature that based on Taguchi method as an optimization technique for the route selection problem which consist in determining a unique route for each part. The obtained result goes across and beyond the previous researches by providing the main effect of each part as a sensitivity analysis aspect.

In the third proposed approach, we provide a framework for the complete CM system design which combines Axiomatic Design and Experimental Design to generate several feasible and potentially profitable designs. The AD approach is used as the basis for establishing a systematic CM systems design structure. ED has been a very useful tool to design and analyze complicated industrial design problems.

The forth proposed approach presents a simulation-based methodology, which takes into consideration the stochastic aspect in (CM) system, to create better cell configurations. An initial solution is developed using any of the numerous CF procedures. The objective of this proposed method which provides performances ratings and cost-effective consist in determine how best to deal with the remaining exceptional elements. It considers and compares two strategies: permitting intercellular transfer and exceptional machine duplication.

The results of a comparative study based on multiple performance criteria show that these proposed approaches are very effective, efficient and especially in their availability in many commercial software packages that make its easily practical.

**Keywords:** Cellular Manufacturing, Cell Formation, Alternative routings, Exceptional elements, Statistical correlation, Principal components analysis, Axiomatic Design, Design of experiments, Taguchi method, Simulation, Performance measures.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
1. Contexte et motivation de l'étude.....	1
2. Problématique et objectifs du travail.....	1
3. Organisation du mémoire.....	2
<b>Chapitre 1. L'aménagement cellulaire des systèmes de production.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Les concepts d'aménagement des systèmes de production.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Production unitaire.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Les industries de process.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 La production manufacturière.....</b>	<b>6</b>
2.3.1 Aménagement en flux unidirectionnel .....	6
2.3.2. Aménagement fonctionnel.....	7
2.3.3. Aménagement cellulaire (en îlots).....	8
2.3.4. Aménagement cellulaire hybride.....	10
<b>2.4 Comparaison entre les types d'aménagement.....</b>	<b>11</b>
<b>3. La Technologie de Groupe.....</b>	<b>13</b>
<b>4. Les méthodes de formation de cellules : Etat de l'art.....</b>	<b>14</b>
<b>4.1 Méthodes basées sur la forme des produits.....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 Méthodes basées sur la gamme de production des différents produits.....</b>	<b>19</b>
4.2.1 Méthodes de la réorganisation de la matrice.....	19
4.2.2 Méthodes basées sur un groupement hiérarchique.....	21
4.2.3 Méthodes basées sur la programmation mathématiques.....	25
4.2.4 Méthodes basées sur la théorie des graphes.....	27
4.2.5 Méthodes basées sur un groupement non hiérarchique.....	28
4.2.6 Méthodes basées sur la classification automatique.....	28
4.2.7 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle.....	29
4.2.8 Méthodes basées sur des heuristiques.....	33
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>33</b>

<b>Chapitre 2. La formation des cellules basée sur l’analyse des corrélations.....</b>	<b>35</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>35</b>
<b>2. Les critères de performance des solutions.....</b>	<b>37</b>
<b>2.1 Pourcentage des éléments exceptionnel.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2 Taux moyen d’utilisation des machines.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3 Premier indicateur d’efficience de groupement.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4 Deuxième indicateur d’efficience de groupement.....</b>	<b>38</b>
<b>3. Analyse des données.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Objectifs de l’analyse des données.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Méthodes d’analyse de données.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3 Méthode d’Analyse en Composantes Principales (ACP).....</b>	<b>40</b>
<b>4. Description de l’approche proposée.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Cas des matrices d’incidence binaires.....</b>	<b>41</b>
4.1.1 Matrice des coefficients de similarité.....	42
4.1.2 Classification des machines et des produits.....	44
4.1.3 Algorithme d’affectation des éléments exceptionnels.....	45
4.1.4 Exemple de résolution.....	46
<b>4.2 Cas des matrices d’incidence en durées.....</b>	<b>51</b>
4.2.1 Cas des demandes identiques de produits.....	51
4.2.2. Influence de la demande sur la solution de formation des cellules.....	53
<b>5. Validation de l’approche proposée.....</b>	<b>55</b>
<b>5.1 Première étude comparative.....</b>	<b>55</b>
<b>5.2 Deuxième étude comparative.....</b>	<b>59</b>
5.2.1 Etude comparative avec la méthode de Recuit Simulé.....	63
5.2.2 Etude comparative avec la méthode de Recherche Tabou.....	64
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>65</b>
<b>Chapitre 3. Extension pour la formation des cellules avec gammes alternatives....</b>	<b>66</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>66</b>
<b>2. Etat de l’art.....</b>	<b>66</b>

<b>3. La méthode des plans d'expérience.....</b>	<b>69</b>
<b>3.1 Généralités.....</b>	<b>69</b>
<b>3.2 Vocabulaire.....</b>	<b>70</b>
<b>3.3 Type de plans.....</b>	<b>71</b>
<b>3.4 Méthode Taguchi.....</b>	<b>72</b>
3.4.1 La démarche de la méthode Taguchi.....	73
3.4.2 Le choix d'une table de Taguchi.....	73
<b>4. Approche proposée.....</b>	<b>74</b>
<b>4.1 Architecture de l'approche proposée.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2 Application du plan factoriel.....</b>	<b>75</b>
4.2.1 Sélection des gammes.....	75
4.2.2 Formation de cellules.....	77
<b>4.3 Validation de l'indice PC.....</b>	<b>78</b>
<b>4.4 Application de la méthode de Taguchi.....</b>	<b>80</b>
4.4.1 Problème de Kusiak (4 x 5 x 11).....	80
4.4.2 Problème de Sankaran (6 x 11 x 20).....	82
4.4.3 Problème de Nagi (20 x 20 x 51).....	85
<b>4.5 Validation de l'approche proposée.....</b>	<b>92</b>
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>93</b>
<b>Chapitre 4. Démarche globale pour la conception des cellules de production.....</b>	<b>94</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>94</b>
<b>2. Le choix d'une approche de conception.....</b>	<b>96</b>
<b>2.1 Les processus de conception.....</b>	<b>96</b>
2.1.1 La conception systématique (ou algorithmique).....	97
2.1.2 La conception axiomatique.....	97
2.1.3 La conception robuste.....	100
<b>2.2 Comparaison des processus de conception et justification du choix.....</b>	<b>101</b>
<b>3. Proposition d'une démarche de conception.....</b>	<b>102</b>
<b>3.1 Etat de l'art relatif à la conception axiomatique.....</b>	<b>102</b>
<b>3.2 Application de la conception axiomatique.....</b>	<b>102</b>
<b>3.3 Intégration de la méthode des plans d'expériences.....</b>	<b>104</b>



---

<b>4. Traitement des éléments exceptionnels.....</b>	<b>105</b>
<b>4.1 Etat de l'art.....</b>	<b>105</b>
<b>4.2 Evaluation des performances.....</b>	<b>106</b>
4.2.1 Les indicateurs de performances.....	107
4.2.2 Les modèles d'évaluation des performances.....	108
<b>4.3 L'évaluation des performances par simulation.....</b>	<b>110</b>
4.3.1 Utilisation de la simulation.....	111
4.3.2 Démarche classique d'utilisation de la simulation.....	112
<b>4.4 Application de la simulation.....</b>	<b>115</b>
4.4.1 Présentation du problème.....	115
4.4.2 Construction du modèle de Simulation.....	117
4.4.3 Analyse des résultats.....	119
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>122</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>123</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>127</b>

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre 1. L'aménagement cellulaire des systèmes de production

<b>Figure 1.1</b> Aménagement en flux unidirectionnel.....	7
<b>Figure 1.2</b> Aménagement fonctionnel.....	8
<b>Figure 1.3</b> Aménagement cellulaire.....	9
<b>Figure 1.4</b> Aménagement cellulaire RF.....	10
<b>Figure 1.5</b> Domaine d'application des différents types d'aménagement.....	11
<b>Figure 1.6</b> Schéma de principe de la TG.....	14
<b>Figure 1.7</b> Exemple d'une matrice d'incidence produits/machines.....	15
<b>Figure 1.8</b> Résultat de groupement en cellules.....	15
<b>Figure 1.9</b> Les classification des méthodes de conception cellulaire.....	17
<b>Figure 1.10</b> Exemple de structure d'un code de classification des produits.....	17
<b>Figure 1.11</b> Exemple de classification de produits en familles basée sur une codification.....	18
<b>Figure 1.12</b> Classification des MCS.....	24
<b>Figure 1.13</b> L'évolution des coefficients de similarité dans le temps.....	24

## Chapitre 2. La formation des cellules basée sur l'analyse des corrélations

<b>Figure 2.1</b> Place du deuxième chapitre dans les travaux de thèse .....	36
<b>Figure 2.2</b> Architecture de l'approche proposée pour la formation de cellules.....	43
<b>Figure 2.3</b> Matrice d'incidence initiale du problème de (Boctor, 1991).....	47
<b>Figure 2.4</b> Matrice d'incidence centrée réduite relative au problème de Boctor.....	47
<b>Figure 2.5</b> Matrice S de similarité relative au problème de Boctor.....	48
<b>Figure 2.6</b> Illustration du plan principal relatif au problème de Boctor.....	49
<b>Figure 2.7</b> Solution initiale du problème de Boctor.....	50
<b>Figure 2.8</b> Solution finale du problème de Boctor.....	50
<b>Figure 2.9</b> Matrice d'incidence initiale du problème de Chen (Chen et Guerrero, 1994).....	51
<b>Figure 2.10</b> Matrice S de similarité relative au problème de Chen.....	51
<b>Figure 2.11</b> Illustration du plan principal relatif au problème de Chen.....	52
<b>Figure 2.12</b> Solution finale proposée du problème de Chen.....	52
<b>Figure 2.13</b> Solution finale du problème de Chen par l'application de la méthode de King.....	52

<b>Figure 2.14</b> Matrice d'incidence du problème de Chen avec demande variable.....	53
<b>Figure 2.15</b> Illustration du plan principal du problème de Chen avec demande variable.....	54
<b>Figure 2.16</b> Solution finale proposée du problème de Chen avec demande variable.....	54
<b>Figure 2.17</b> Solution finale du problème de Chen avec demande constante.....	54
<b>Figure 2.18</b> Illustration du plan principal du problème (5 x 7).....	55
<b>Figure 2.19</b> Solution de deuxième phase du problème (5 x 7).....	56
<b>Figure 2.20</b> Solution finale du problème (5 x 7).....	56
<b>Figure 2.21</b> La matrice d'incidence du problème (11 x 22).....	56
<b>Figure 2.22</b> Illustration du plan principal du problème (11 x 22).....	56
<b>Figure 2.23</b> Solution de deuxième phase du problème (11 x 22).....	57
<b>Figure 2.24</b> Solution finale du problème (11 x 22).....	57
<b>Figure 2.25</b> Illustration du plan principal du problème (16 x 43).....	57
<b>Figure 2.26</b> Solution de deuxième phase du problème (16 x 43).....	58
<b>Figure 2.27</b> Solution finale du problème (16 x 43).....	58
<b>Figure 2.28</b> Les solutions trouvées pour les dix problèmes de (Boctor, 1991).....	63

### **Chapitre 3. Extension pour la formation des cellules avec gammes alternatives**

<b>Figure 3.1</b> Place du troisième chapitre dans les travaux de thèse.....	67
<b>Figure 3.2</b> Système étudié « Boîte noire ».....	69
<b>Figure 3.3</b> Graphes des effets du facteur A.....	70
<b>Figure 3.4</b> Interactions entre deux facteurs A et B.....	71
<b>Figure 3.5</b> Architecture de l'approche proposée pour la FC avec gammes alternatives.....	74
<b>Figure 3.6</b> Graphique des effets moyens de l'exemple.....	76
<b>Figure 3.7</b> Graphe des interactions de l'exemple.....	76
<b>Figure 3.8</b> Illustration du plan principal de la configuration optimale de l'exemple.....	77
<b>Figure 3.9</b> Comparaison de PC aux indices de performances : PE, MU, EG1 et EG2.....	79
<b>Figure 3.10</b> Les solutions finales de toutes les configurations possibles.....	79
<b>Figure 3.11</b> Graphique des effets moyens relatifs au problème de Kusiak.....	81
<b>Figure 3.12</b> Graphique des effets moyens relatifs au problème de Sankaran.....	83
<b>Figure 3.13</b> Plan principal de la configuration optimale du problème de Sankaran.....	84
<b>Figure 3.14</b> Graphique des effets relatifs au problème de Nagi.....	88
<b>Figure 3.15</b> Plan principal de la configuration optimale du problème de Nagi.....	88

**Chapitre 4. Démarche globale pour la conception des cellules de production**

<b>Figure 4.1</b> Place du quatrième chapitre dans les travaux de thèse.....	95
<b>Figure 4.2</b> Relation entre les domaines de conception.....	98
<b>Figure 4.3</b> Zig-Zag entre les domaines selon la conception axiomatique.....	99
<b>Figure 4.4</b> Processus de la conception axiomatique.....	99
<b>Figure 4.5</b> Diagramme de décomposition en EFs et PCs.....	103
<b>Figure 4.6</b> Intégration des méthodes des plans d'expériences.....	105
<b>Figure 4.7</b> Méthodes d'évaluation des performances des systèmes de production.....	109
<b>Figure 4.8</b> Les domaines d'application de la simulation.....	111
<b>Figure 4.9</b> Processus de la simulation.....	114
<b>Figure 4.10</b> Structure du modèle de simulation construit.....	118
<b>Figure 4.11</b> L'évolution du WIP durant une longue réplique.....	119

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre 1. L'aménagement cellulaire des systèmes de production

<b>Tableau 1.1</b> Les principales distances et indices proposés en classification hiérarchique.....	22
--	----

## Chapitre 2. La formation des cellules basée sur l'analyse des corrélations

<b>Tableau 2.1</b> Modèle de matrice de croisement pour des données multivariées.....	40
<b>Tableau 2.2</b> Les valeurs propres relatives au problème de (Boctor, 1991).....	48
<b>Tableau 2.3</b> Demandes des différents produits du problème de (Chen et Guerrero, 1994).....	53
<b>Tableau 2.4</b> Les différents problèmes de validation.....	55
<b>Tableau 2.5</b> Les résultats de l'approche proposée pour la FC.....	59
<b>Tableau 2.6.</b> Tableau comparatif avec la méthode de Recuit Simulé.....	63
<b>Tableau 2.7</b> Tableau comparatif avec la méthode de Recherche Tabou.....	64

## Chapitre 3. Extension pour la formation des cellules avec gammes alternatives

<b>Tableau 3.1</b> Les données de l'exemple illustratif.....	75
<b>Tableau 3.2</b> Les résultats du plan factoriel complet de l'exemple illustratif.....	76
<b>Tableau 3.3</b> Solution finale de l'exemple illustratif.....	78
<b>Tableau 3.4</b> Résultats des différents indices de performances.....	79
<b>Tableau 3.5</b> La matrice d'incidence (4 x 5 x 11) du problème de Kusiak.....	80
<b>Tableau 3.6</b> Table de Taguchi $L_8$ ( $4^1 \times 2^4$ ) relative au problème de Kusiak.....	81
<b>Tableau 3.7</b> La solution finale obtenue du problème de Kusiak.....	81
<b>Tableau 3.8</b> La matrice d'incidence (6 x 11 x 20) du problème de Sankaran.....	82
<b>Tableau 3.9</b> Table de Taguchi $L_{16}$ ( $4^1 \times 2^7$ ) relative au problème de Sankaran.....	83
<b>Tableau 3.10</b> La solution finale obtenue du problème de Sankaran.....	85
<b>Tableau 3.11</b> La solution du problème de Sankaran par la méthode de Kusiak.....	85
<b>Tableau 3.12</b> La matrice d'incidence (20 x 20 x 51) du problème de Nagi.....	86
<b>Tableau 3.13</b> Table de Taguchi $L_{36}$ ( $3^9 \times 2^7$ ) relative au problème de Nagi.....	87
<b>Tableau 3.14</b> La solution finale obtenue du problème de Nagi.....	89
<b>Tableau 3.15</b> La solution du problème de Nagi proposée par (Joines et al. 1995).....	89
<b>Tableau 3.16</b> La solution du problème de Nagi proposée par (Uddin et Shanker, 2002).....	90
<b>Tableau 3.17</b> La solution du problème de Nagi proposée par (Malakooti et al. 2004).....	90
<b>Tableau 3.18</b> La solution du problème de Nagi proposée par (Chan F.T.S et al. 2006).....	91

---

<b>Tableau 3.19</b> Comparaison entre la solution proposée et celles proposées en littérature.....	91
<b>Tableau 3.20</b> Les différents problèmes avec gammes alternatives.....	92
<b>Tableau 3.21</b> Les résultats de l'approche proposée.....	92

#### **Chapitre 4. Démarche globale pour la conception des cellules de production**

<b>Tableau 4.1</b> Solution initiale de formation des cellules.....	115
<b>Tableau 4.2</b> Les données du processus de production et de transfert.....	116
<b>Tableau 4.3</b> Les temps de réglage.....	117
<b>Tableau 4.4</b> Les résultats de la configuration initiale pour les machines.....	120
<b>Tableau 4.5</b> Les résultats de la configuration initiale pour les produits.....	121
<b>Tableau 4.6</b> Les coûts de traitement des EE.....	121
<b>Tableau 4.7</b> Les résultats après acquisition des machines exceptionnelles.....	122

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

## Français

<b>AC</b>	: Aménagement Cellulaire
<b>ACP</b>	: Analyse en Composantes Principales
<b>AdC</b>	: Attentes des Clients
<b>AF</b>	: Aménagement Fonctionnel
<b>FC</b>	: Formation de Cellules
<b>EE</b>	: Eléments Exceptionnels
<b>EFs</b>	: Exigences Fonctionnelles
<b>EG</b>	: Efficacité de Groupement
<b>MCS</b>	: Méthodes basées sur des Coefficients de Similarité
<b>NEE</b>	: Nombre des Eléments Exceptionnels
<b>NEV</b>	: Nombre des éléments vides
<b>NMA</b>	: Nombre de lots Moyen en Attente
<b>NT</b>	: Le nombre de transferts intercellulaires
<b>PC</b>	: Pourcentage Cumulé
<b>PCs</b>	: Paramètres de Conception
<b>PEE</b>	: Pourcentage des Eléments Exceptionnels
<b>TAM</b>	: Temps d'attente Moyen
<b>TFM</b>	: Temps de Fabrication Moyen
<b>TG</b>	: Technologie de Groupe
<b>TGAO</b>	: Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur
<b>TU</b>	: Taux d'Utilisation
<b>TUM</b>	: Taux d'utilisation des machines
<b>TSM</b>	: Temps de Séjour Moyen
<b>TT</b>	: Temps de Transfert
<b>TTM</b>	: Temps de Transfert Moyen
<b>UE</b>	: Le nombre des éléments unitaires de la matrice
<b>UT</b>	: Unité de Temps
<b>VPs</b>	: Variables du Procédé de fabrication

## Anglais

<b>ART</b>	: Adaptative Resonance Theory
<b>BEA</b>	: Bond Energy Algorithm
<b>DCA</b>	: Direct Clustering Algorithm
<b>FCFS</b>	: First Coming First Served
<b>ISNC</b>	: Ideal Seed Non-hierarchical Clustering
<b>MIT</b>	: Massachusetts Institute of Technology
<b>ROC</b>	: Rank Order Clustering
<b>WIP</b>	: Work In Process

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1. Contexte et motivation de l'étude

Les évolutions successives du contexte industriel, telles que la grande variabilité des marchés et le besoin de satisfaire les clients, conduisent à la recherche de meilleures méthodes pour la conception et l'exploitation des systèmes de production. Ceci est notamment dû à l'évolution technologique des procédés, et à l'automatisation de leur mise en œuvre, ainsi que de la flexibilité et de la réactivité de leur exploitation.

Ces développements récents du domaine manufacturier et la course vers une productivité accrue ont fait émerger une panoplie de types d'aménagements des systèmes manufacturiers et en particulier de l'adoption de l'Aménagement Cellulaire (AC). En effet, ce dernier minimise le parcours des produits et entraîne une plus grande efficacité et améliore la productivité des ateliers. C'est pourquoi, plusieurs entreprises cherchent à appliquer les aménagements cellulaires pour bien maîtriser leurs systèmes de production (McAuley, 1972). L'étape la plus importante pour adopter un AC est la formation des cellules (ou îlots), c'est-à-dire savoir comment identifier les familles de produits et les groupes de machines.

La formation de cellules (FC) est définie classiquement, selon Burbidge (1975, 1992), comme une variante de la Technologie de Groupe. Son principe consiste à fabriquer un ensemble de produits similaires (familles de produits) au moyen d'un ensemble de machines partitionné en sous-ensembles. Par exemple, il est possible de grouper les produits en espérant profiter de leurs similarités fortes : mêmes composantes, mêmes opérations, etc. Les machines peuvent être groupées en fonction des gammes opératoires dans l'optique de limiter les mouvements intercellulaires et de réduire les manutentions. Par la même occasion, Burgess (1993) affirme que les temps de mise en route, les temps de cycle et les en-cours peuvent être réduits.

## 2. Problématiques et objectifs du travail

L'évolution constatée dans le domaine des systèmes de production cellulaires depuis une trentaine d'années est considérable, tant par l'augmentation de la finesse des objectifs poursuivis que par la sophistication des systèmes informatiques qui supportent la



technique de résolution adoptée. Aussi, d'un point de vue scientifique, on a assisté au cours de ces années à une floraison des travaux de recherche et des applications industrielles.

En analysant ces travaux de recherche pour la conception et l'implantation des systèmes de production cellulaires, nous avons constaté d'une part, que le problème de formation de cellules est ancien (depuis les années 60) en Technologie de Groupe (Burbidge, 1975). D'autre part, ce problème a été résolu par différentes techniques et méthodes, qui ont fortement augmenté ces dernières années. Néanmoins, nous constatons certaines limites à l'application de ces méthodes due à l'absence d'une démarche globale pour la conception des AC.

Nous avons constaté que plusieurs recherches pour résoudre le problème d'implantation et d'amélioration des performances des cellules supposent une indépendance entre les différentes cellules. C'est-à-dire qu'ils ne prennent pas en considération le problème de présence d'éléments exceptionnels (EE) dans leurs solutions finales. Cette hypothèse est restrictive et rend ces travaux de recherches difficilement applicables dans l'industrie.

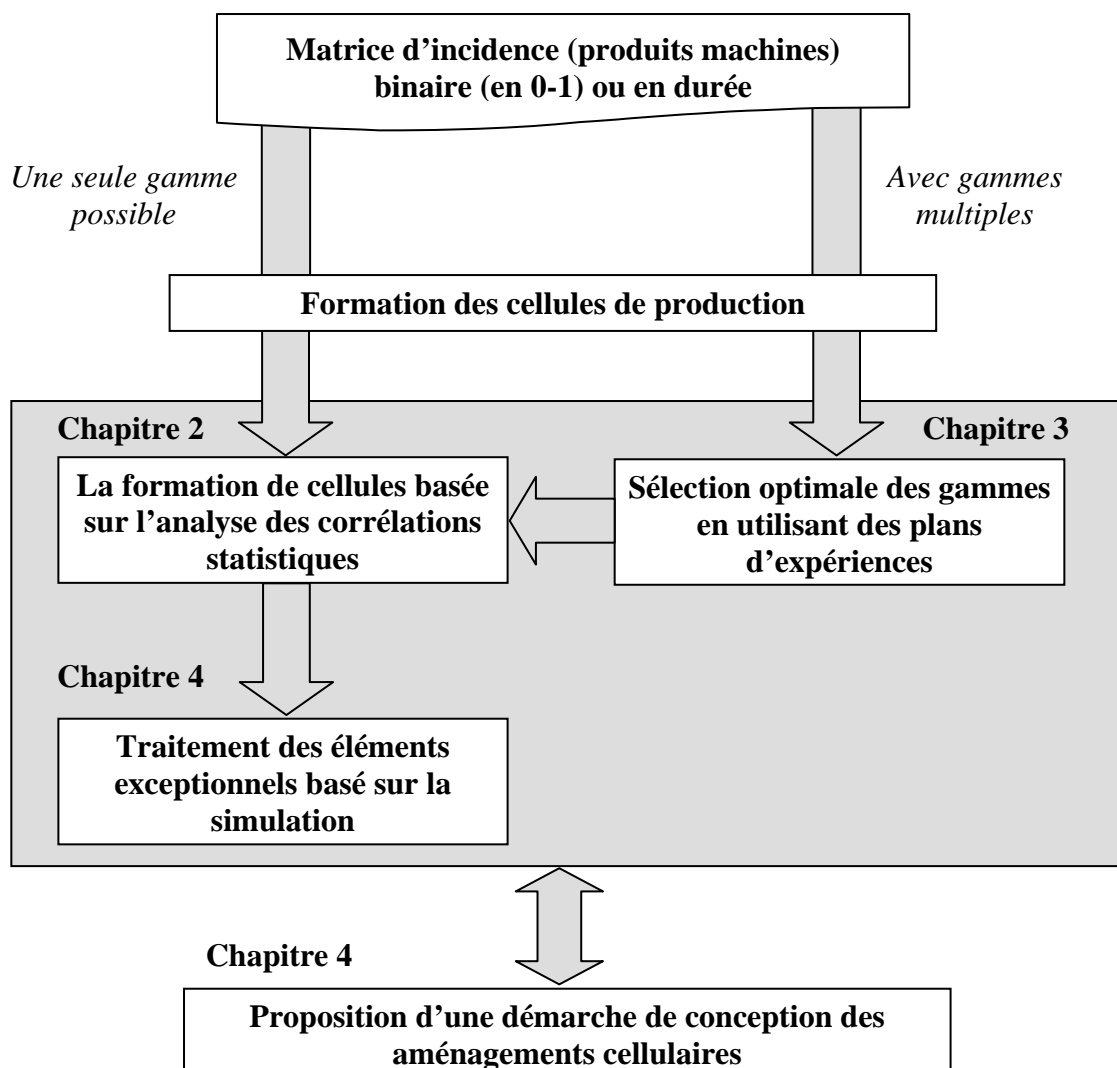
Pour aborder ce travail, nous nous sommes posés les questions suivantes :

- Quels sont les principes des méthodes proposées en littérature pour résoudre le problème de formation de cellules ?
- Comment analyser statistiquement les matrices d'incidence pour la formation de cellules ? (matrice d'incidence binaire et matrice d'incidence en durées opératoires).
- Comment traiter les éléments exceptionnels et leurs effets sur la performance des aménagements cellulaires ?
- Peut-on proposer une démarche globale pour la conception des aménagements cellulaires ?
- Comment envisager et traiter le problème de formation de cellules en présence de gammes alternatives ?

### **3. Organisation du rapport**

Pour répondre à ces questions de recherche, nous avons organisé notre travail en quatre principaux chapitres organisés de la manière suivante.

Le premier chapitre présente de manière plus détaillée le contexte de la thèse. Dans un premier temps, nous présentons les différents types d'aménagements des systèmes de production. Dans un second temps, nous avons détaillé l'état de l'art des méthodes de formation de cellules avec une seule gamme préférentielle. L'objectif est d'analyser des travaux de la communauté scientifique pour identifier les approches, les méthodes et les techniques utilisées pour la résolution de ce problème. Afin de présenter la suite logique des travaux décrits tout au long de ce mémoire, un schéma simplifié est proposé en la figure 1.



**Figure 1.** Architecture des travaux développés dans ce rapport de thèse

Dans le second chapitre, nous présentons notre nouvelle approche pour la formation simultanée des familles de produits et des groupes de machines. Cette démarche, basée sur l'analyse des corrélations statistiques comporte trois étapes. Dans une première étape, la matrice de corrélation est utilisée comme matrice de similarité pour les produits et les

machines. Dans une seconde étape, l'application de la méthode Analyse en Composantes Principales (ACP) et l'analyse graphique du plan principal, permettent d'une part la répartition des machines en groupes et des produits en familles et d'autre part, l'identification des machines et/ou produits exceptionnels. L'objectif de la troisième étape est d'affecter ces éléments exceptionnels (EE) aux cellules déjà formées, tout en maximisant la corrélation. L'avantage réside dans la simplicité, la rapidité de résolution ainsi que de la considération du nombre de cellules à former comme variable dépendante ou indépendante. Pour l'évaluation et la validation de l'approche proposée, nous l'avons appliqué sur des exemples reconnus de la littérature que nous avons comparé aux résultats d'articles plus récents. De plus nous avons illustré que la méthode proposée reste satisfaisante pour des problèmes définis par des matrices d'incidences en durées opératoires.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié une vision plus large du problème de formation de cellules en tenant compte de la présence de gammes alternatives pour chaque produit. Plusieurs travaux de recherche ont traité ce problème d'une manière séquentielle, itérative ou simultanée. L'inconvénient de ces approches réside dans la complexité des modèles proposés. En effet ils traitent en même temps le problème de choix de gammes et le problème de formation de cellules. L'approche que nous proposons dans ce chapitre consiste à les séparer en deux étapes. La première étape consiste à choisir pour chaque produit la gamme préférentielle qui assure la meilleure performance de mise en cellules. Dans cette étape, nous proposons d'utiliser la technique des plans d'expériences. Ce qui nous a permis d'introduire une analyse de sensibilité de la solution optimale selon les différentes gammes possibles. Dans une deuxième étape, nous proposons d'appliquer une des méthodes de formation de cellules présentées dans les deux chapitres précédents.

Toutes les méthodes de formation des cellules proposées dans la littérature, ainsi que les méthodes que nous avons développées dans les chapitres 2 et 3, répondent à une seule exigence fonctionnelle relative à un problème global de conception des AC. Il existe rarement, dans la littérature (Kulak et al. 2005), des travaux qui traitent le problème de conception des AC d'une manière globale, c'est-à-dire une démarche qui touche tout les aspects de l'AC. C'est dans ce cadre que s'inscrit le quatrième chapitre de ce mémoire de thèse. Nous avons développé une démarche de conception des AC basée sur la conception axiomatique et sur la technique des plans d'expériences.

Pour mettre en relief la démarche de conception que nous proposons, nous allons revoir, dans un premier temps, la problématique étudiée dans le troisième chapitre qui porte sur la formation de cellules avec gammes alternatives. Dans un second temps, nous allons présenter une étude de cas pratique relative à un problème de traitement des EE en se basant sur la technique de simulation.

Nous finirons ce rapport de thèse par une conclusion générale qui reprend les principaux résultats de notre recherche ainsi que les perspectives de ce travail.

# Chapitre 1

## L'AMÉNAGEMENT CELLULAIRE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION

### 1. Introduction

Le problème traité dans ce travail de thèse est l'aménagement appelé aussi l'agencement des systèmes de production cellulaire. Ce problème se pose lorsqu'il s'agit d'implanter ou de réimplanter un système de production. La réimplantation s'impose lorsque les caractéristiques de fabrication des produits évoluent de manière significative par une augmentation importante du volume à fabriquer ou par une modification de certaines caractéristiques des produits traités, ce qui entraîne souvent une évolution dans le nombre ou/et dans l'implantation des ressources utilisées.

Pour commencer, nous proposons de présenter les différents types d'aménagement des systèmes de production et l'intérêt que porte l'aménagement cellulaire par rapport aux autres aménagements. Nous ferons une analyse bibliographique des différentes méthodes de Formation de Cellules (FC) de production.

### 2. Les concepts d'aménagement des systèmes de production

L'analyse des systèmes de production montre l'existence de trois grandes typologies d'organisation de la production : la production unitaire, les industries de process et la production manufacturière. Dans les grandes entreprises, on peut trouver une juxtaposition de modes d'organisation différents, spécialisés dans la production de références différentes (produits finis ou semi-finis).

Pour chaque système de production, plusieurs structures logiques sont possibles et pour chacune, plusieurs dispositions physiques des machines, dites aménagements, sont possibles. L'aménagement doit, entre autres, optimiser la fluidité du flux de production (Dolgui et Proth, 2006). Ce qui nous intéresse dans ce travail est l'aménagement des ateliers de production manufacturière. C'est-à-dire les systèmes de production qui peuvent

être organisés principalement selon trois classes différentes : en ligne, fonctionnelle et en cellule.

Notons bien qu'il est possible de trouver des aménagements hybrides, c'est-à-dire une combinaison des différents aménagements classiques et cela pour des raisons de complexité de produits ou d'optimisation des moyens de production.

### **2.1 Production unitaire**

Principalement, la production de « type unitaire » est un cas où l'entreprise mobilise toutes ces ressources pour la réalisation d'un produit, et ce sur une « assez longue période ». Dans ce type de production, généralement le produit est immobilisé et les ressources sont orchestrées pour assurer le bon déroulement des opérations de transformation (construction d'un ouvrage d'art, la construction navale, etc.).

### **2.2 Les industries de process**

Ce mode d'organisation se trouve dans les industries lourdes de transformation de matières premières (sidérurgie, pétrochimie, certaines industries agro-alimentaires, etc.). Ce type d'organisation se caractérise par un flux important et régulier de matières premières arrivant dans le système productif pour y être transformé en une ou plusieurs matières premières.

### **2.3 La production manufacturière**

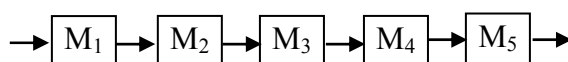
Les principales formes d'aménagement de la production manufacturière sont l'aménagement en flux unidirectionnel, aménagement en ateliers spécialisés (fonctionnel) et l'aménagement cellulaire.

#### **2.3.1 Aménagement en flux unidirectionnel**

Lorsque les équipements sont agencés pour permettre au flux de produits de transiter systématiquement par la même séquence de postes de travail nous parlons d'aménagement en flux unidirectionnel. Durant leurs passages devant les différents postes, les produits subissent un ensemble d'opérations de transformation ou d'assemblage, conduisant à la création d'un produit ou d'une famille de produits manufacturés. Cette logique de processus de fabrication résidant à l'implantation géographique des machines et à leur

couplage aux moyens de manutention automatisés. On trouve couramment de telles structures dans la production de masse (industrie automobile) et plus particulièrement au niveau de l'assemblage final (Arnould et Renaud, 2003).

Les machines sont placées, comme indiqué dans la figure 1.1, en ligne dans l'ordre de la gamme de fabrication. Il n'y a donc pas de points de rebroussement et les flux sont faciles à identifier. En revanche la flexibilité de ce type d'implantation est relativement faible. Ce type d'organisation d'ateliers, dit aussi de type *flow shop*, permet la fabrication d'un seul type de produit en grande série (production de masse).



**Figure 1.1** Aménagement en flux unidirectionnel

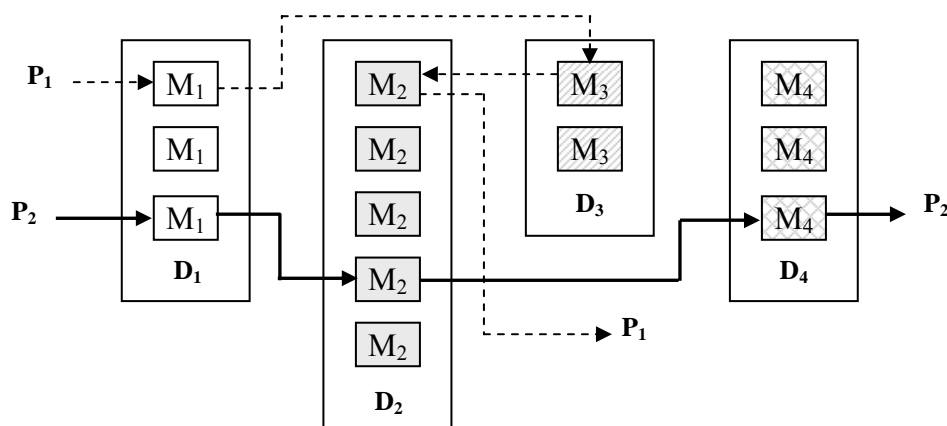
Ce mode d'organisation repose sur une parfaite maîtrise des gammes opératoires et une très grande régularité de circulation du flux. Néanmoins, l'optimisation des niveaux des stocks tampons ainsi que les problèmes liés à la fiabilité et à la maintenance du matériel sont fondamentaux puisque l'arrêt d'une machine provoque la paralysie de la chaîne.

Dans ce type de structure, les équipements sont spécialisés pour diminuer au maximum les temps opératoires unitaires. L'inconvénient de cette spécialisation (qui peut aller jusqu'à l'usage de machines spécifiques à la chaîne) est que les équipements peuvent ne plus être utilisables lorsque la ligne de production doit être transformée pour se spécialiser sur un autre produit. (Nollet et al. 1986) soulèvent un autre inconvénient de l'aménagement linéaire en le situant par rapport à la motivation des travailleurs et la qualité de leur travail qui s'y trouve affectée.

### 2.3.2. Aménagement fonctionnel

Généralement, lorsqu'une entreprise fabrique un grand nombre de produits différents et en petites quantités, l'aménagement fonctionnel est adopté et il se base sur les procédés et les fonctions. Dans ce cas, l'atelier se compose de plusieurs départements  $D_i$  (section homogène) dont chacun est formé de plusieurs machines  $M_i$  du même type. Dans un atelier de mécanique, on peut ainsi trouver, selon ce type d'aménagement, un département pour le fraisage, un second pour le tournage, un troisième pour le perçage etc. La figure 1.2 présente un exemple d'implantation fonctionnel comportant quatre départements.

Dans ce type d'organisation des ateliers, dit aussi de type *Job shop*, le transfert des produits entre les départements se réalise selon leurs gammes de fabrication.



**Figure 1.2** Aménagement fonctionnel

Contrairement à l'aménagement en flux unidirectionnel, l'aménagement fonctionnel qui fait appel à un flux de type *Job shop* permet de fabriquer une large variété de produits avec des lots de petites tailles, ce qui rend le système flexible. En plus, la panne d'une machine ne bloque plus la production. Par contre, le transfert des produits entre les départements se réalise par lots et selon leurs gammes de fabrication ce qui induit un flux complexe, des en-cours et des délais de production importants.

La main d'œuvre utilisée est plutôt qualifiée et les équipements sont polyvalents. Le problème de la gestion des approvisionnements est important dans ce type d'organisation (Arnould et Renaud, 2003). Ce dernier conduit inéluctablement à des coûts de manutention relativement importants. De plus, la multiplicité de routages des produits entre les postes de travail pose des problèmes complexes d'ordonnancement. Ils conduisent à des files d'attente plus ou moins grandes et à une mauvaise utilisation des ressources disponibles en hommes et en machines.

### 2.3.3. Aménagement cellulaire (en îlots)

L'aménagement fonctionnel implique des problèmes de logistique importants, puisqu'il faut gérer efficacement les transports d'encours entre les ateliers. Les techniques de localisation optimale des ateliers permettent de minimiser ces coûts de logistique, mais pas de les éliminer. Ces dépenses croissent en tout état de cause avec la taille de l'usine et l'on est là en présence de véritables « déséconomies d'échelle ». Le plus souvent, la taille d'une usine organisée en ateliers spécialisés s'explique par la diversité de sa production. Une parade a été imaginée pour contrer ces déséconomies d'échelle. Elle est connue sous

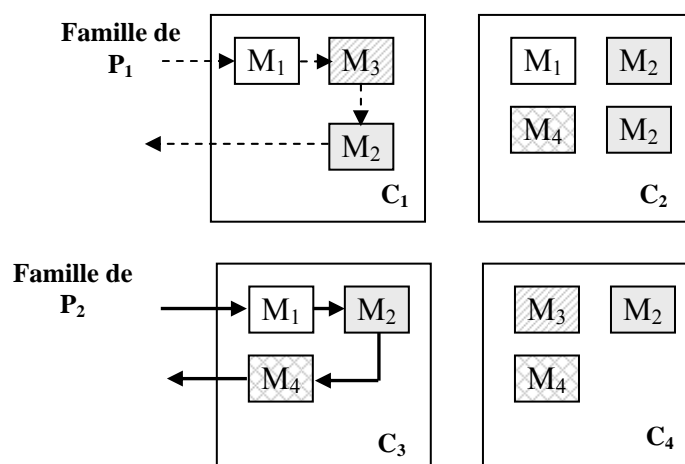


le nom de Technologie de Groupe et de formation des cellules de production que nous allons détailler dans les paragraphes suivants.

On scinde l'usine en un nombre limité de cellules correspondant à de véritables « sous usines ». Chaque cellule est spécialisée dans la fabrication d'une famille de produits, c'est-à-dire un sous-ensemble de références à produire. La réunion de ces familles donne la totalité des références que l'entreprise peut produire. Les familles de produits sont définies suivant une base technique (similitude des gammes de production, importance voisine des cellules, etc.). Cette définition et la détermination du nombre de cellules restent très empiriques même si certaines techniques, qui seront détaillées dans le second chapitre, sont utilisables pour résoudre certains problèmes de complexité plus ou moins limitée (Joines et al, 1996).

L'aménagement cellulaire est obtenu en se basant sur l'analyse des produits et de leurs gammes de fabrication. Les produits similaires de point de vue forme ou processus de production sont groupés pour former une famille de produits et les machines nécessaires au traitement de chaque famille sont à leur tour assemblées en groupes. Les couples « familles groupes » constituent les cellules de fabrication.

Ce type d'aménagement cellulaire est illustré à la figure 1.3 par un exemple qui comporte quatre cellules.



**Figure 1.3** Aménagement cellulaire

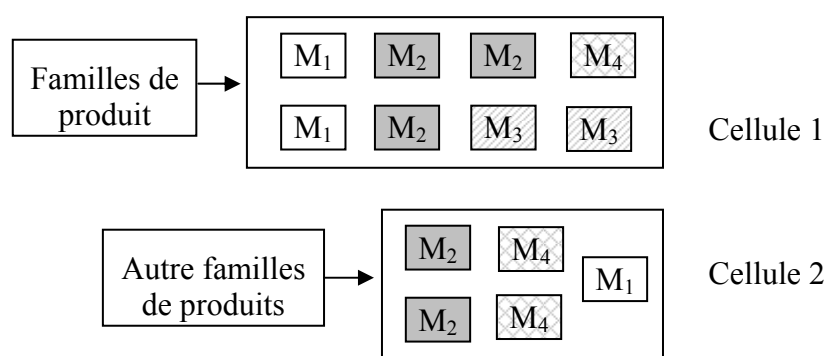
Une cellule peut produire des types de produits dont la variété et les volumes sont moyens. Cependant, toute cellule devrait être autonome. Sinon, tout mouvement de transfert intercellulaire pourrait engendrer la dégradation des performances de l'aménagement cellulaire.

Les principaux avantages de l'aménagement cellulaire sont de pouvoir améliorer la flexibilité, la productivité et le respect des délais dans les ateliers de production en petites et moyennes séries et de rendre plus aisé les tâches de pilotage. Les similarités de conception et de fabrication existant entre les produits appartenant à une même cellule permettent une réduction du temps de réglage des machines et une standardisation des outils. La concentration de la fabrication sur une cellule minimise le parcours des produits et entraîne une plus grande efficacité.

### 2.3.4. Aménagement cellulaire hybride

(Jensen et al. 1996) propose un aménagement hybride qui reprend l'aspect de l'aménagement fonctionnel et le mode de pilotage de l'aménagement cellulaire. En effet, les produits groupés en familles sont traités par des cellules qui peuvent comporter plusieurs machines du même type. De ce fait, cet aménagement se caractérise par un compromis entre la flexibilité de l'aménagement fonctionnel et la réduction du temps de réglage engendrée par la réservation de chaque cellule à une ou plusieurs familles de produits.

La figure 1.4 présente les mêmes ressources du système manufacturier traité au paravent dans les figures 1.2 et 1.3 et qui sont organisés en un aménagement cellulaire noté par RF (Jensen et al, 1996). Cet aménagement se compose de deux cellules. Chacune traite un nombre de familles de produits.



**Figure 1.4** Aménagement cellulaire RF

(Flynn et Jacobs, 1986) définissent un second type d'aménagement hybride qui est physiquement semblable à l'aménagement fonctionnel. En effet, les machines du même type sont groupées sauf qu'elles ne sont pas considérées interchangeables. Par contre, le pilotage de cet aménagement est semblable à celui pour l'aménagement cellulaire. En effet, chaque machine est réservée à la production de produits similaires. La réservation de

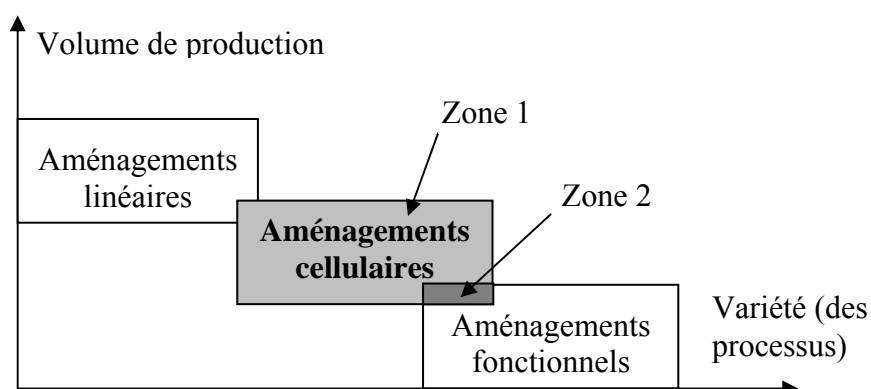
machine à la production d'une famille de produits annule toute la flexibilité qui caractérise l'aménagement fonctionnel, cependant elle permet de réduire les temps de réglage.

Depuis quelques années, nous trouvons des organisations dites en cellules virtuelles correspond à des agencements temporaires des ressources liées au portefeuille de commandes à exécuter, ce qui permet une plus grande flexibilité et une meilleure utilisation du système productif. En contre partie, le système d'information nécessaire est plus complexe.

## 2.4 Comparaison entre les types d'aménagement

Le problème qui se pose pour l'industriel est le choix d'un des types d'aménagement que nous venons de présenter. (Campagne, 2001) indique que deux critères conditionnent principalement le type d'aménagement retenu pour les systèmes de production manufacturière: la variété et les volumes de production. La figure 1.5 montre que le choix entre les types d'aménagement est essentiellement conditionné par ces deux critères. Il est à noter que, par le terme « variété », il convient d'entendre la variété des processus, et non des produits. Par exemple, dans l'industrie automobile, la variété des produits finis est très grande ; en revanche, le processus de réalisation est pratiquement identique pour tous ces produits, ce qui permet de travailler sur une ligne d'assemblage unique.

Par définition, les aménagements cellulaires (AC) présentent plusieurs avantages par rapport aux aménagements fonctionnels (AF). Dans ce cadre, plusieurs chercheurs ont effectué des études de comparaison entre ces deux types d'aménagements.



**Figure 1.5** Domaine d'application des différents types d'aménagement (Campagne, 2001)

(Flynn et Jacobs, 1986) ont effectué la simulation du modèle d'un atelier existant pour comparer l'AC avec AF tout en étudiant plusieurs modes de pilotage de ces deux

aménagements. Les résultats de cette simulation montrent que l'AC est meilleur dans toutes les situations. En effet, l'AC présente un temps de séjour et un niveau d'encours plus petits.

(Moris et Tersine, 1990) ont de leur côté introduit les effets des ratios de flux (temps de réglage/temps de fabrication) sur les performances relatives des systèmes manufacturiers AC et AF. L'objectif de cette étude est de rechercher un environnement idéal pour la supériorité de l'aménagement cellulaire par rapport à l'aménagement fonctionnel, ils ont pour cela effectué quatre expériences de simulation basées sur les ratios de temps de réglage/temps de fabrication, le temps de transfert du matériel, la stabilité de la demande et le flux des produits dans les cellules en analysant leurs influences sur le choix de l'aménagement. Les résultats de ces simulations montrent que les conditions idéales pour la supériorité de l'AC sont obtenues lorsque les temps de réglage sont élevés, la demande en pièces est prédictible, le flux des pièces à travers les cellules est unidirectionnel et le temps de transfert est élevé.

Quant à (Jensen et al. 1996), ils ont de leur côté étudié les effets de plusieurs facteurs dont la variabilité de la demande en produits, les niveaux de réduction du temps de réglage engendré par l'accoutumance des machines tout en introduisant dans leur comparaison la notion d'un aménagement cellulaire modifié (RF) combinant le fonctionnement des deux aménagements. Ils ont conclu que les aménagements RF et AC sont meilleurs que l'aménagement AF quand les niveaux de la variabilité de la demande et d'accoutumance des machines sont élevés.

En effectuant une série de simulations, (Faizul et al. 2001) ont quant à eux étudié les effets de la taille des lots et de la réduction du temps de réglage. Par cette étude, ils ont montré que pour certaines combinaisons des valeurs de taille de lots et de facteurs de réduction de temps de réglage, les performances de l'AC sont inférieures à celles de l'AF.

La majorité de ces études comparatives (Shambu et al. 1996), ont abouti à la supériorité de l'aménagement cellulaire par rapport à l'aménagement fonctionnel. Cependant dans quelques cas particuliers (Agarwl et Sarkis, 1998), on peut constater l'inverse et aboutir à des conclusions paradoxales. (Chtourou et al. 2008) ont expliqué les causes de ce paradoxe et indiquent qu'il provient généralement de la généralisation inappropriée de résultats qui ne sont valides que sous certaines conditions relatives aux caractéristiques du processus de fabrication. En effet, l'analyse de la figure 1.5 montre une zone de validité propre pour chaque type d'aménagement. Les zones qui nécessitent des études

comparatives entre les types d'aménagement sont celles des intersections où les deux types d'aménagements sont possibles.

Dans ce travail de thèse, le choix d'appliquer l'aménagement cellulaire est notre hypothèse principale. Ce choix peut être justifié soit principalement selon la variété et le volume de production (zone 1 de la figure 1.5), soit à l'éventuelle supériorité de l'aménagement cellulaire par rapport à l'aménagement fonctionnel (Zone 2).

### **3. La Technologie de Groupe**

Comme nous l'avons déjà vu précédemment, l'aménagement fonctionnel implique des problèmes importants de logistique, puisqu'il faut générer efficacement les transports d'encours entre les ateliers. Les techniques d'implantation ou de localisation optimale des ateliers permettent de minimiser les coûts de logistique, mais pas de les éliminer. Ces dépenses croissent en tout état de cause avec la taille de l'usine et l'on est là en présence de véritables « déséconomies d'échelle ». Le plus souvent, la taille d'une usine organisée en ateliers spécialisés s'explique par la diversité de sa production. Une solution a été imaginée pour contrer ces déséconomies d'échelles. Elle est connue sous le nom de technologie de groupe (TG) ou dans certain cas, technologie de groupe assistée par ordinateur (TGAO). La TGAO est une méthode qui consiste à regrouper les pièces pour les concevoir et les fabriquer en tirant profit de leurs analogies.

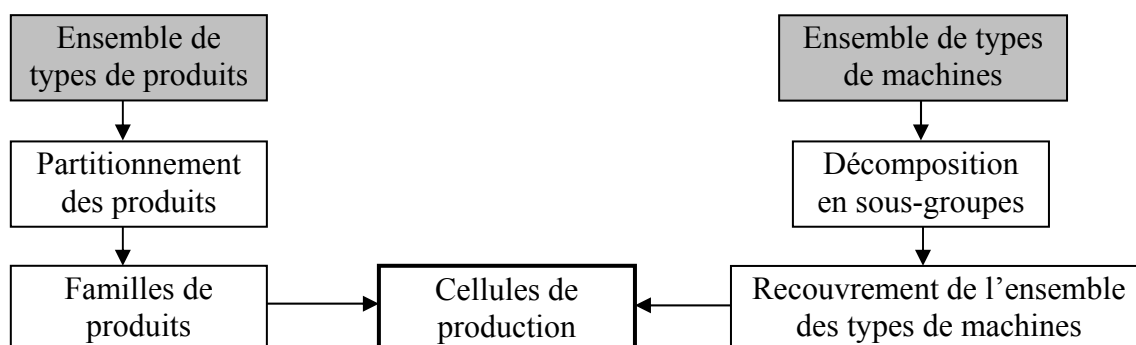
Le premier qui a proposé de manière formelle et scientifique la TG est le soviétique Mitrofanov en 1959 (McAuley, 1972). Il a défini le concept de « pièce composée » par une pièce imaginaire qui présente tous les détails géométriques existant dans les pièces qui composent une famille. Pour appliquer la TG, il est recommandé de faire une analyse géométrique des pièces et d'avoir les gammes d'usinage de chaque pièce. (Burbidge, 1992) est l'un des pionniers de la TG. En effet, il définit la fabrication cellulaire comme « une nouvelle approche pour la gestion de la production qui vise à obtenir des avantages économiques pour la production en batch, semblables à ceux déjà atteints dans une production en ligne ».

La TG, également nommée « groupement analogique », est un bon outil pour rationaliser et ordonner la production, des pièces aux différents stades de leur réalisation. La TG s'adresse aux entreprises qui :

- ont la maîtrise de la conception et de leur mise en œuvre,
- produisent des variétés de produits complexes,

- fabriquent des produits interdépendants (besoins communs et moyens spécifiques) dont la production est réalisée par lots répétitifs, etc.

En particulier, le passage d'un AF à un AC demande de décomposer l'ensemble des machines en sous-groupes. La décomposition sur les produits et sur les moyens de production est symétrique. Le processus de décomposition est présenté sur la figure 1.6. Le but est évidemment d'obtenir les cellules. La principale difficulté est que de nombreuses machines sont présentes en plusieurs exemplaires. L'affectation des produits se fait aux types de machines et non aux machines. Les données d'entrées sont donc des types de machines. La décomposition de l'ensemble des types de machines débouche donc sur un recouvrement, car un type de machine peut se trouver dans plusieurs cellules différentes. Or, si les méthodes permettant d'obtenir des partitions sont nombreuses, celles utilisées pour obtenir des recouvrements sont très rares. C'est pourquoi la majorité des méthodes cherche à partitionner l'ensemble des produits en familles de produits, et à laisser à un opérateur la charge de vérifier si les cellules correspondantes sont faisables ou non.



**Figure 1.6** Schéma de principe de la TG (Baptise et Baboli, 2001)

Les principaux avantages de cette approche sont de pouvoir améliorer la flexibilité, la productivité et le respect des délais dans des ateliers de production travaillant en Batch. Les similarités de conception et de fabrication existent entre les produits appartenant à une même cellule de production permettant une réduction du temps de réglage des machines et une standardisation des outils. La concentration de la fabrication sur une cellule minimise le parcours des produits et induit une diminution des temps non productifs de fabrication. De plus (Burgess et al. 1993) ajoute d'autres avantages qui se manifestent dans la plus grande spécialisation de la main d'œuvre et dans la réduction des stocks.

Pour créer les familles de produits, deux éléments-clefs doivent être considérés, le premier élément est le choix des données de départ utilisées pour la classification. Le second est la méthode même de classification utilisée.

#### 4. Les méthodes de formation de cellules : état de l'art

Ces méthodes sont, globalement, toutes des méthodes utilisées en classification automatique. Le problème est par essence, un problème d'apprentissage automatique non supervisé (les classes ne sont pas connues a priori). On cherche donc à obtenir simultanément les classes (cellules) et les fonctions d'appartenance (ou les fonctions discriminantes). Il est à noter que ces méthodes ne sont en aucun cas spécifiques à la TG, mais elles ont été utilisées dans ce contexte (Singh et Rajamani, 1996)

Ces méthodes partent d'une matrice appelée matrice d'incidence généralement binaire, ayant autant de lignes que de produits, et autant de colonnes que de machines, (voir figure 1.7).

Il y a deux façons de présenter la matrice d'incidence comme l'indiquent les éléments  $a_{ij}$ .

- Matrice d'incidence en binaire :  $a_{ij} = 1$  si le produit « i » est traité par la machine « j »  
et  $a_{ij} = 0$  sinon
- Matrice d'incidence en durées :  $a_{ij} =$  durée de l'opération subie par le produit « i » sur la machine « j »

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
P1	1	0	0	0	1	1
P2	1	1	0	0	1	1
P3	0	1	1	1	0	0
P4	1	1	0	1	0	0
P5	0	1	1	0	0	1
P6	0	1	0	1	0	0
P7	0	1	1	0	0	0

**Figure 1.7** Exemple d'une matrice d'incidence produits/machines (données initiales)

	M2	M4	M3	M1	M5	M6
P3	1	1	1	0	0	0
P6	1	1	0	0	0	0
P4	1	1	0	1	0	0
P5	1	0	1	0	0	1
P7	1	0	1	0	0	0
P1	0	0	0	1	1	1
P2	1	0	0	1	1	1

**Figure 1.8** Résultat de groupement en cellules

L'objectif des méthodes utilisées en TG est de constituer des blocs (voir figure 1.8). Chaque bloc correspond à une famille de produits et le groupe de machines nécessaires pour le traitement de ces produits, on obtient ainsi des cellules de production.

La constitution des cellules est rarement parfaite, car il est possible d'avoir des éléments  $a_{ij}$  égale à 1 et qui se trouve hors groupement des blocs voir figure 1.8, ils sont appelés des éléments exceptionnels « *exceptional elements* » (Shafer et al.1992). Les éléments nuls de la matrice qui sont situés dans les blocs, sont dits des éléments vides « *void elements* ».

Dans la littérature, plusieurs problèmes cités sont liés à l'implantation des systèmes de production cellulaire. Ils peuvent être principalement regroupés en trois familles :

1) La première famille s'oriente vers la conception ou la formation des cellules. Ce problème est de type combinatoire et comporte lui même trois variantes principales :

- le regroupement des machines en des sous groupes et les produits en familles : (*grouping machines into cells and parts into families*) ou (*machine-part cell formation problem*),
- la minimisation des mouvements intercellulaire : (*minimization of the inter-cells movements of parts*),
- le groupement des machines en sous groupes avec l'existence de gammes alternatives, c'est-à-dire lorsqu'il existe plusieurs scénarios de fabrication possibles pour un même produit : (*Cell formation problem with alternative routings*) ou (*Cell formation problem with multiple process plan*).

2) La seconde famille concerne l'implantation ou l'agencement des machines dans leurs cellules. Le problème peut s'intéresser aussi à l'implantation d'une cellule par rapport aux autres : (*Facility layout problem*).

3) La troisième famille concerne le dimensionnement des cellules et l'amélioration des performances : nombres de machines nécessaires par type de machine, la capacité de stockage nécessaire, etc. Ce type de problème peut être abordé pour minimiser les mouvements intercellulaires.

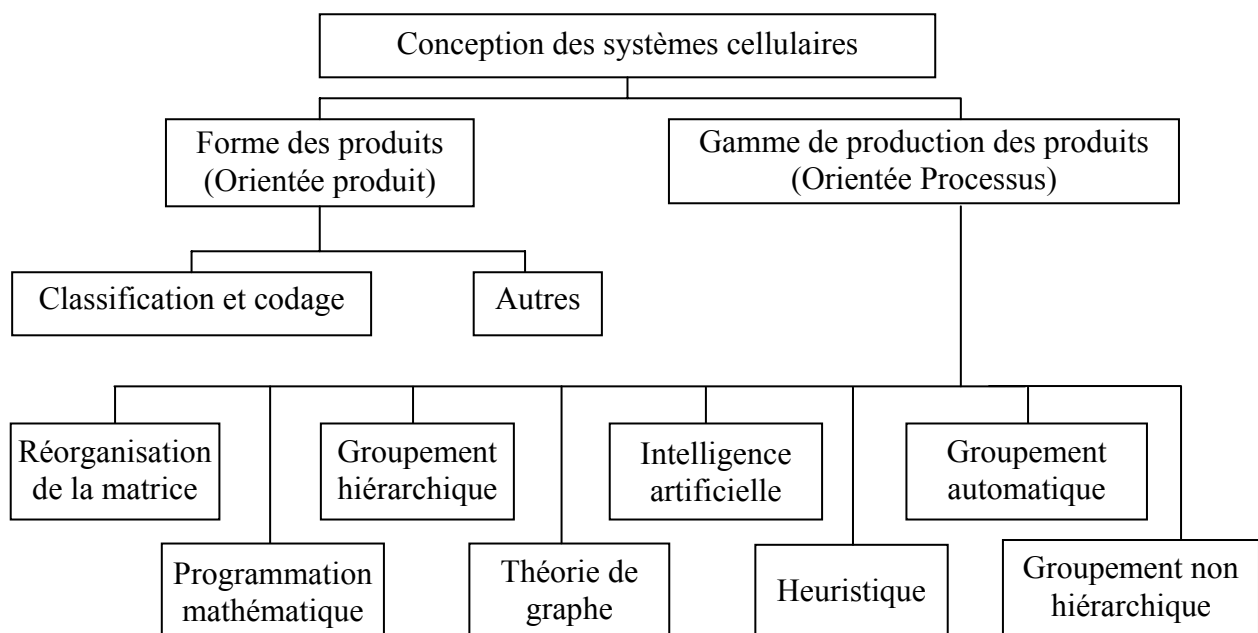
Dans ce chapitre nous traitons le problème de la première famille à savoir le problème de regroupement des machines en sous groupes et les produits en familles. Dans la littérature, plusieurs classifications de méthodes de résolution ont été proposées, comme dans (Joines et al. 1996), (Singh et Rajamani, 1996), (Shambu et al. 1996), (Slim et al. 1998), (Yin et Yasuda, 2005), (Yin et Yasuda, 2006), (Defersha et Chen, 2006), etc.



Ces travaux indiquent que les méthodes de conception des systèmes cellulaires peuvent être groupées en deux catégories. La première se base sur la forme des produits et exploite la ressemblance physique des produits pour les grouper en familles. La seconde, se base sur les gammes de production et exploite la similarité des opérations pour grouper les produits en familles. La figure 1.9 montre les principales méthodes composant ces deux catégories.

Une autre classification des méthodes de FC est fréquemment citée dans la littérature (Yin et Yasuda, 2006). On trouve trois démarches pour la FC la :

- classification des produits en familles seulement (Kusiak, 1987) ou l'identification des sous groupes de machines uniquement (Rajamani et al. 1990),
- classification des produits en familles puis identification des groupes de machines (Choobineh, 1988),
- identification simultanée des familles de produits et des groupes de machines (Adil et al. 1993). Cette classe est la plus avantageuse, par rapport aux deux autres, car elle exclut l'influence de l'ordre de formation des familles de produits et/ou groupes de machines.

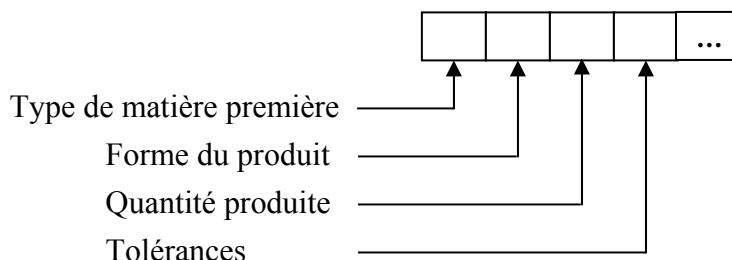


**Figure 1.9** La classification des méthodes de conception cellulaire (Joines et al. 1996)

#### 4.1 Méthodes basées sur la forme des produits

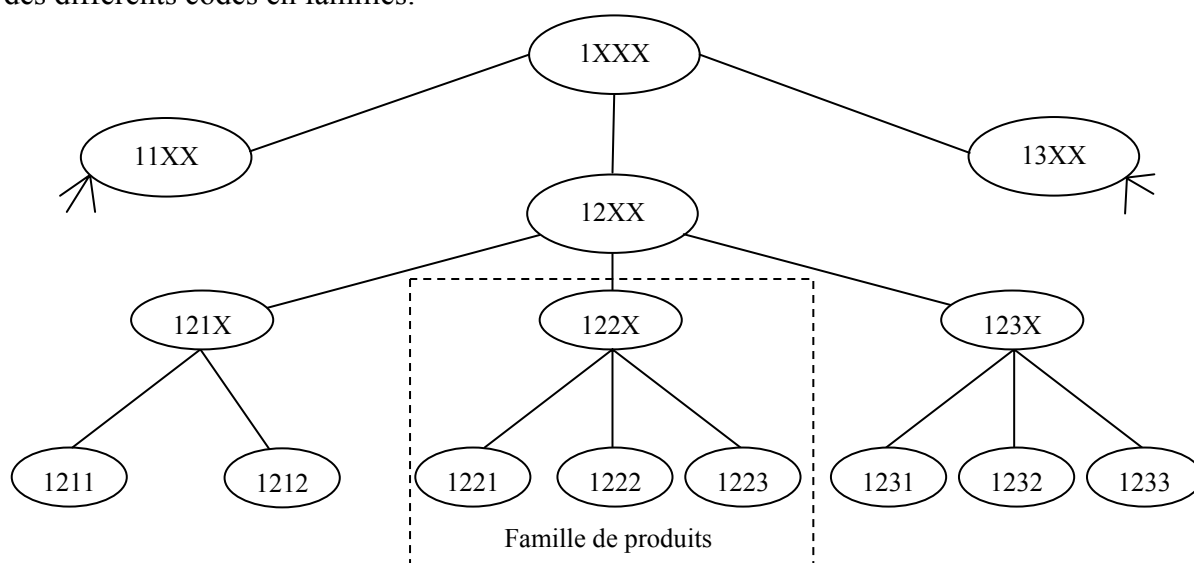
La méthode principale, appelée aussi méthode de classification et de codage, consiste à assigner des codes aux différents produits en se basant sur leurs aspects physiques (Singh

et Rajamani,1996). Elle est basée principalement sur la forme de l'objet (cylindrique, parallélépipédique, plat, creux, etc.), sur ses dimensions et sur d'autres critères propres au métier de l'entreprise (mode d'assemblage, type de l'opération de fabrication, matière, quantité produite, etc.).



**Figure 1.10** Exemple de structure d'un code de classification des produits

Comme l'indique la figure 1.10, ce code comporte plusieurs données concernant les caractéristiques de chaque produit, telles que la nature de la matière première utilisée, les formes, les tolérances, etc. Les produits présentant des aspects similaires possèdent les mêmes codes assurant ainsi une connexion entre les caractéristiques des produits et le groupement des machines. Dans la figure 1.11, on présente un exemple de classification des différents codes en familles.



**Figure 1.11** Exemple de classification de produits en familles basée sur une codification des produits

Les méthodes basées sur la classification sont les plus anciennes de la TG, en effet les méthodes basées sur les gammes de production ne sont en aucun cas spécifiques à la TGAO, mais elles ont été utilisées dans ce contexte (Singh et Rajamani,1996).

Plusieurs travaux ont proposé ou utilisé des coefficients de similarité pour résoudre le problème de formation des cellules. Ils emploient des coefficients de similarité, entre les

lots de pièces et/ou des machines, comme critère pour l'obtention des cellules de production. Le point de départ de ces méthodes est généralement une matrice de distance entre produits et/ou machines à classer. L'objectif est d'avoir un indicateur qui mesure la ressemblance ou la différence entre produits et/ou machines à classer. D'après (Baptise et Baboli, 2001), plusieurs indices et distances ont été proposés (indice de Jaccard, indice de Kullezynki, distance de Hamming, etc.).

Les coefficients de similarité entre les produits (ou machines) sont communément représentés par une matrice carrée de similarité. Il est à noter que les méthodes qui intègrent l'emploi de coefficients de similarité entre les machines font intervenir les gammes de production des différents produits. Par conséquent, ces méthodes appartiennent à la deuxième classe que nous allons étudier dans le paragraphe suivant.

#### **4.2 Méthodes basées sur la gamme de production des différents produits**

Durant le groupement des familles de produits et des cellules, la plupart des méthodes se basent sur les gammes de production. La plus simple de ces méthodes est celle de l'organisation de la matrice d'incidence produits/machines.

##### **4.2.1 Méthodes de la réorganisation de la matrice (Array-Based Clustering)**

La méthode de réorganisation de la matrice d'incidence consiste alors à arranger l'ordre des lignes et des colonnes afin d'obtenir une matrice formée de blocs tout le long de la diagonale. Ces blocs permettent d'identifier les groupes de machines formant les cellules ainsi que les familles de produits qui peuvent être fabriquées par ces cellules. Plusieurs travaux ont été développés pour la réorganisation de la matrice d'incidence dont notamment les plus connus ceux de la méthode proposée par Kuziak (Kuziak, 1987) et de celle proposée par King (King, 1980), (King et Nakornchai, 1982).

Les méthodes de la réorganisation de la matrice sont les plus simples méthodes basées sur les gammes de production des produits. L'avantage majeur de ces méthodes réside sur la formation simultanée des groupes de machines et des familles de produits.

##### **4.2.1.1 Algorithme de maximum d'énergie : Bond Energy Algorithm (BEA)**

Cette méthode est initialement proposée par McCormick en 1972 (Singh et Rajamani, 1996). Elle se base sur la liaison entre un élément de la matrice d'incidence et

ces quatre proches voisins. D'après McCormick, ces liaisons peuvent être considérées comme une énergie.

Pour une permutation d'une ligne L et une permutation d'une colonne C de la matrice, l'expression de l'énergie totale est donnée par l'équation (1).

$$TBE(L, C) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p a_{ij} * [a_{i,j-1} + a_{i,j+1} + a_{i-1,j} + a_{i+1,j}] \quad (1)$$

Avec  $a_{0,j} = a_{m+1,j} = a_{i,0} = a_{i,n+1} = 0$

m: le nombre de machines

p: le nombre de produits

La méthode BEA consiste à déterminer la valeur du TBE pour toutes les permutations possibles ( $m! \cdot p!$ ). La solution finale retenue est celle qui maximise le TBE. L'inconvénient de cette méthode est principalement le nombre très élevé des permutations possibles dans une matrice d'incidence.

#### 4.1.2.2 Classification par ordre: *Rank Order Clustering (ROC)*

C'est une méthode itérative proposée par King (King, 1980) qui consiste à limiter le nombre des permutations des lignes et des colonnes de la méthode BEA. Cette limitation est assurée par le calcul d'un poids à chaque itération.

Etape 1: pour chaque machine j (avec  $j = 1, 2, \dots, m$ ), affecter un poids de puissance de 2 à chacun des produits puis calculer l'équivalent décimal  $c_j$  en sommant les poids des

produits en utilisant la machine j. C'est-à-dire  $c_j = \sum_{i=1}^p 2^{p-i} a_{ij}$

Ordonner les colonnes dans l'ordre décroissant de l'équivalent décimal. En cas d'égalité, on respecte l'ordre des machines.

Etape 2: Pour chaque produit i (avec  $i = 1, 2, \dots, p$ ), affecter un poids de puissance de 2 à chacune des machines puis calculer l'équivalent décimal  $c_i$  en sommant les poids des

machines qui figurent dans la gamme du produit i. C'est-à-dire  $r_i = \sum_{j=1}^m 2^{m-j} a_{ij}$

Ordonner les lignes dans l'ordre décroissant de l'équivalent décimal. En cas d'égalité, on respecte l'ordre des produits.

Etape 3 : Si la nouvelle matrice d'incidence reste inchangée par ces itérations, alors arrêter la procédure de classification, sinon reprendre à l'étape 1.

Plusieurs chercheurs, comme (Chan et Milner, 1982), (Chu et Tsai, 1990), (King et Nakornchai, 1982), et en particulier King lui-même, ont identifié et expliqué des limites de cette méthode itérative. En effet, la qualité de la diagonalisation dépend fortement de la configuration initiale de la matrice d'incidence. Il est clair qu'un élément exceptionnel peut être affecté par un grand poids indépendamment de sa nature. (King et Nakornchai, 1982) proposent une amélioration de cette méthode sous le nom de ROC2.

#### 4.1.2.3 Algorithme de classification directe : *Direct Clustering Algorithm (DCA)*

Cette méthode itérative est développée par (Chan et Milner, 1982). Elle consiste à permuter les lignes et colonnes pour regrouper le maximum de nombre de « 1 ».

Etape 1 : Compter le nombre des « 1 » pour chaque colonne et pour chaque ligne de la matrice d'incidence initiale. Ordonner les lignes dans l'ordre croissant et les colonnes dans l'ordre décroissant.

Etape 2 : Commencer avec la première colonne de la matrice d'incidence. Mettre toutes les lignes en haut pour former des blocs. S'il y a des lignes avec des « 1 » qui ne figurent pas dans le bloc, déplacer ces lignes vers le bloc juste en bas. Une fois qu'une ligne est affectée à un bloc, elle reste inchangée (Il est à noter qu'il n'est pas nécessaire de procéder avec toutes les colonnes).

Etape 3 : Si la nouvelle matrice d'incidence reste inchangée, alors arrêter, sinon aller à l'étape 4.

Etape 4 : Commencer avec la première ligne de la matrice et placer toutes des colonnes à gauche (comme dans l'étape 2).

Etape 5 : Si la nouvelle matrice d'incidence reste inchangée, alors arrêter, sinon reprendre à l'étape 2.

#### 4.1.2.4 Comparaison entre les méthodes de la réorganisation de la matrice

Pour la comparaison entre les méthodes BEA, ROC et DCA, (Chu et Tsai, 1990) et (Shafer et Meredith, 1990) ont signalé que la méthode BEA est significativement meilleure que les deux autres avec des problèmes de formation de cellules avec ou sans éléments exceptionnels. Les trois méthodes sont efficaces et simples, mais elles présentent plusieurs inconvénients. D'une part, elles ne tiennent pas compte d'autres paramètres de

conception cellulaire comme la capacité maximale de chaque cellule et les durées opératoires des produits sur les machines. D'autre part, elles nécessitent une intervention et une inspection manuelle pour valider la composition finale des cellules de production. Il semble que la recherche scientifique pour le développement des méthodes de la réorganisation de la matrice d'incidence s'est arrêtée dans les années 90.

#### 4.2.2 Méthodes basées sur un groupement hiérarchique

Une méthode de groupement hiérarchique se base sur la définition d'un coefficient de similarité ou d'une distance entre les produits et les machines. L'objectif est de classer les éléments (produits et machines) similaires ensemble selon leurs similarité.

La classification hiérarchique a souvent été proposée en TGAO, principalement à cause de sa simplicité de mise en œuvre. Le point de départ de la méthode est une matrice distance entre produits à classer. Plusieurs indices ont été proposés et calculés à partir de la matrice d'incidence binaire (Baptise et Baboli, 2001)), citons par exemple :

- La distance de Hamming
- La distance de Hamming pondérée
- Les autres critères sont des indices de similarité, donc d'autant plus grands que les produits sont semblables.

Le tableau 1.1 présente la définition des distances et des indices de similarité les plus répondus en littérature. On note P : le nombre de coprésence, A : le nombre de co absence, N : nombre de non coïncidence et  $T = P + A + N$ . Ensuite, à partir de la matrice de distance, l'algorithme est le suivant :

Début

Faire une classe de produit

Tant qu'il reste plus d'une classe faire

    Début

    Chercher les deux classes les plus proches et les regrouper en une seule

    Recalculer les distances de cette nouvelle classe

    Fin

Fin.

**Tableau 1.1** Les principales distances et indices proposés en classification hiérarchique

Distances et indices de similarité	Expressions
Distance de Hamming	$\frac{N}{T}$
Distance de Hamming pondérée	$\frac{N}{N + P}$
Indice de Jaccard	$\frac{P}{P + N}$
Indice de Kullezynki	$\frac{P}{N}$
Indice de Dice	$\frac{2P}{2P + N}$
Indice de Sokal et Sneath	$\frac{P}{P + 2N}$
Indice de Roger et Tanimoto	$\frac{P + A}{P + A + 2N}$

La difficulté repose sur le calcul de la distance d'une classe A donnée à un regroupement B-C déjà constitué tout en connaissant les distances  $D(A, B)$  et  $D(A, C)$ . Le cas idéal se produit lorsque les deux distances  $D(A, B)$  et  $D(A, C)$  sont égales. Dans ce cas, il est clair que le plus simple consiste à étendre  $D(A, B - C) = D(A, B) = D(A, C)$ . Une distance telle que, dans tout triangle, les deux plus grands cotés sont identiques, est appelée une distance ultramétrique.

La plupart des distances obtenues à partir des matrices d'incidence ne sont pas évidemment pas des distances ultramétriques. Il faut donc faire une approximation de la distance par une ultramétrique. Pour cela, il y a une infinité d'ultramétriques possibles (Baptise et Baboli, 2001)

Plusieurs chercheurs ont proposé des définitions et formulations de coefficients de similarité. (McAuley 1972) est le premier à avoir défini un coefficient de similarité entre deux machines basé sur l'indice de Jaccard (voir tableau 1.2).

Andrew Kusiak (Kusiak, 1987) a donné une autre définition de coefficient de similarité entre deux produits. Ce coefficient de similarité est présenté par l'équation 2.

$$S_{ij}^p = \sum_{k=1}^m \delta(a_{ki}, a_{kj}), \quad i \neq j, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad \text{et} \quad S_{ii}^p = 0, \quad (2)$$

Avec  $\delta$  : la fonction de Kronecker.

$S_{ij}^p$  : le coefficient de similarité entre le produit  $i$  et le produit  $j$ ,

$p$  : le nombre de produits,

$a_{ik}$  : l'élément de la ligne  $i$  et la colonne  $k$  de la matrice d'incidence binaire

$m \times p$  machines-produits,

et  $m$  : le nombre de machines.

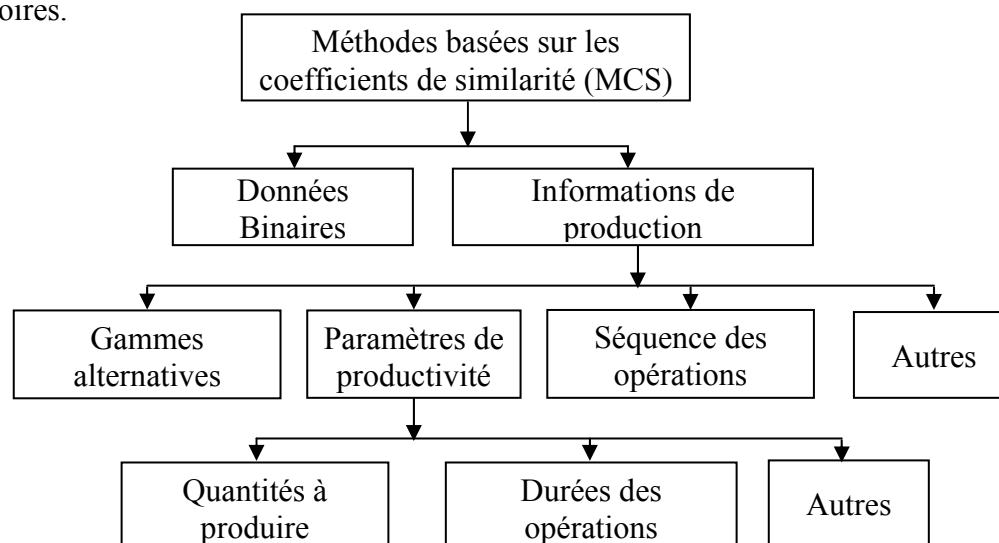
(Kern and Wei, 1991) ont utilisé la définition de coefficient de Kusiak pour l'étendre aux produits :

$$S_{ij}^p = \sum_{k=1}^m \Gamma(a_{ki}, a_{kj}) \quad (3)$$

Où

$$\Gamma(a_{ik}, a_{jk}) = \begin{cases} p-1 & \text{si } a_{ik} = a_{jk} = 1 \\ 1 & \text{si } a_{ik} = a_{jk} = 0 \\ 0 & \text{si } a_{ik} \neq a_{jk} \end{cases} \quad (4)$$

D'autres propositions de coefficients de similarité ont été introduites. Quelques travaux de recherche ont exposé une revue de ces coefficients comme par exemple (Shambu, 1996), (Singh et Rajamani, 1996), (Joines et al.1996), (Yin et Yasuda, 2006), etc. La proposition de plusieurs définitions de coefficients de similarité a rendu les méthodes hiérarchiques très variées. Ce sont les méthodes basées sur des coefficients de similarité (MCS). La figure 1.12 détaille les différentes catégories de MCS (Yin et Yasuda, 2006). Le premier critère est la nature de la matrice d'incidence : matrice binaire ou matrice en durées opératoires.

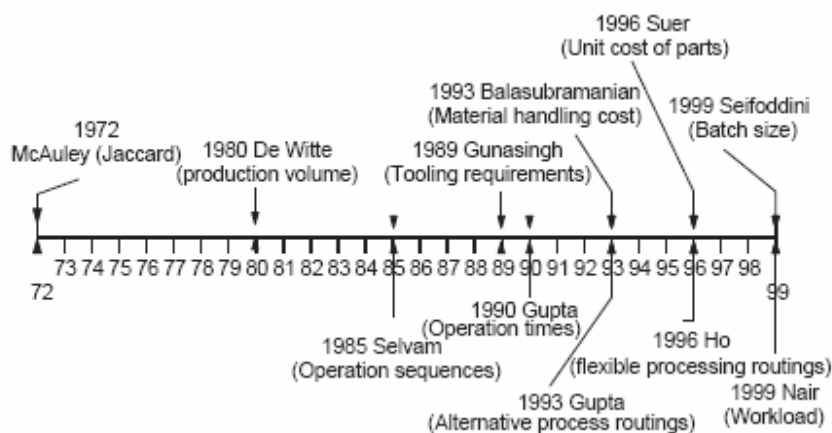


**Figure 1.12** Classification des MCS (Yin et Yasuda, 2006).



Plusieurs paramètres de production sont possibles à intégrer dans le problème de formation de cellules. C'est pourquoi, une autre classification est nécessaire : Méthodes basées sur des coefficients de similarité en tenant compte des gammes alternatives, des paramètres de productivité (quantités à produire, durées opératoires, taille des lots, etc.), des séquences des opérations, etc.

La figure 1.13 présente l'évolution des principales définitions des coefficients de similarité. Gupta (Gupta and Saifoddini, 1990) est le premier à avoir proposé des coefficients de similarité entre produits en tenant en compte des durées opératoires de ces produits dans les diverses machines utilisées.



**Figure 1.13** L'évolution des coefficients de similarité dans le temps (Yin et Yasuda, 2006)

(Seifoddine et Djassemi, 1995) ont proposé une expression du coefficient de similarité en tenant en considération la demande et la taille des lot des produits à lancer. (Gupta, 1993) est le premier chercheur à avoir intégré la séquence du produit dans la formulation des coefficients de similarité.

(Genwook et al. 1998) ont défini un coefficients de similitraté entre deux produits en se basant sur les différentes séquences possibles. Ils ont intégré des paramètres de pannes machines dans le coefficient de similarité entre les différentes machines.

#### 4.2.3 Méthodes basées sur la programmation mathématique

Les méthodes de formation de cellules consistent principalement en des heuristiques. Le nombre de cellules et le nombre de machines et de produits affecté pour chacune des cellules sont déterminés suite à des manipulations matricielles.

Kusiak (1987) a proposé le modèle *n-centre* comme l'un des premiers modèles mathématiques pour la formation des familles de produits. La matrice d'incidence et la valeur de *n* constituent l'entrée du modèle. La procédure de résolution consiste à évaluer à

chaque itération, la somme des coefficients de similarité de chaque famille comportant  $n$  produits. L'objectif est de maximiser le coefficient de similarité tout en minimisant les distances. Le modèle  $n$ -centre est un 0-1 programmation en nombres entiers. Il est défini par la fonction objectif donnée par l'équation (4).

$$\text{Max} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p S_{i,j}^p x_{ij} \quad (5)$$

$$\text{Sous les contraintes} \quad \sum_{j=1}^p x_{ij} = 1 \text{ pour } i = 1, 2, \dots, p \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^p x_{jj} = n \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \text{ pour } i, j = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \text{ pour } i, j = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

Avec  $S_{ij}^p$  : le coefficient de similarité entre le produit  $i$  et le produit  $j$  donné par l'équation (3)

$x_{ij} = 1$  si le produit  $i$  est affecté dans la famille où la produit  $j$  constitue son centre  
et  $x_{ij} = 0$ , sinon.

$n$  : nombre de familles désiré

Il est à noter que la contrainte (6) permet de s'assurer que chaque produit est affecté à une et une seule famille. La contrainte (7) sert à limiter le nombre de familles à  $n$ . La contrainte (8) permet de s'assurer que chaque produit  $i$  est affecté à la famille  $j$  seulement si produit  $i$  est un groupe représentatif.

Plusieurs travaux de recherches, comme (Boctor, 1991), (Won, 2000), (Wang, 2003), (Won et Lee, 2004) et d'autres, ont amélioré le modèle  $n$ -centre : soit en modifiant l'expression du coefficient de similarité, soit en améliorant la fonction objectif et/ou les contraintes. La principale amélioration consiste à remplacer la contrainte (8) par la contrainte (10).

$$\sum_{i=1}^p x_{ij} \leq u_p x_{jj} \text{ pour } j = 1, 2, \dots, p \quad (10)$$

Avec  $u_p$  : est le nombre maximal de produits par famille.

La contrainte (10) peut être vue comme une contrainte de capacité. A l'origine, Kusiak (1987) a proposé ce modèle *n-centre* pour la formation des familles des produits. Avec le même principe, le modèle peut aussi servir à former les machines en groupes.

(Kusiak et al. 1993) proposent un autre modèle de programmation quadratique pour la formation de cellules. Il est défini par la fonction objectif donnée par l'équation (11). Dont  $f$  est l'indice des familles de produits et  $F_f$  est le nombre maximum de produits dans une famille. L'élément «  $x_{if}$  » est égal à 1, si le produit d'indice  $i$  est affecté à la famille d'indice  $f$ .

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j=i+1}^p \sum_{f=1}^F S_{i,j}^p x_{if} x_{jf} \quad (11)$$

$$\text{Sous les contraintes} \quad \sum_{f=1}^F x_{if} = 1 \text{ pour } i = 1, 2, \dots, p \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^p x_{jf} \leq F_f \text{ pour } f = 1, 2, \dots, F \quad (13)$$

$$x_{jf} \in \{0, 1\} \text{ pour } j = 1, 2, \dots, p \text{ et } f = 1, 2, \dots, F \quad (14)$$

La fonction objectif du modèle quadratique constitue la somme des coefficients de similarité entre chaque couple de produits dans chaque famille ou bien entre chaque couple de machines dans chaque cellule.

(Rajamani et al. 1990) sont parmi les premiers à avoir proposé des modèles de programmation mathématique en nombres entiers pour le problème de groupement des machines (lorsqu'il existe des gammes alternatives).

(Panchalavarapua et Chankong, 2005) ont proposé un modèle de programmation mathématique linéaire en nombres entiers pour des cas spécifiques à une phase finale d'assemblage.

#### 4.2.4 Méthodes basées sur la théorie des graphes

La matrice d'incidence peut être, également représentée selon la théorie des graphes. Deux types principaux de graphes sont utilisés dans la littérature pour la résolution des problèmes de formation de cellules : les graphes de bipartition (*Bipartite graph*) et les approches basées sur des réseaux de flux (*The network Flow approach*) (Joines et al. 1996).

L'essentiel dans la solution finale de formation des cellules, est d'avoir une matrice diagonale par bloc. En utilisant la représentation par les graphes, on s'intéresse aussi à la décomposition du réseau en sous réseaux plus ou moins indépendants. Le problème est formulé comme un problème dit  $k$ -décomposition en théorie de graphe. Dans les graphes bipartition (Singh et Rajamani, 1996), un type de noeud représente les produits et l'autre type présente les machines. Un arc reliant deux noeuds de types différents indique l'utilisation de la machine  $j$  pour la fabrication du produit  $i$ . Suite à des itérations progressives, on supprime les arcs (les plus faibles) et on obtient  $k$  réseaux indépendants. Il est à noter que le paramètre  $k$  est équivalent à  $n$  dans la formulation mathématique  $n$ -centre (méthode basée sur la programmation mathématique).

(Al-quattan, 1990) a utilisé l'algorithme séparation et évaluation « *branch and bound* » (méthode basée sur la programmation mathématique) pour la formation des cellules. La démarche utilisée se base sur l'analyse d'un graphe de bipartition.

(Vohra et al. 1990) ont présenté un algorithme pour la formation de cellules pour des matrices d'incidence avec des durées opératoires. L'utilisation des réseaux de flux est la phase la plus importante de leur algorithme pour la classification simultanée des machines et des produits et ceci pour minimiser les mouvements intercellulaire.

#### 4.2.5 Méthodes basées sur un groupement non hiérarchique

Les méthodes basées sur un groupement non hiérarchique sont faciles à implémenter. (Chandrasekharan et Rajagopalan, 1986) ont proposé cette méthode pour le groupement des produits et des machines. Dans la littérature, cette méthode est notée par : *Ideal Seed Non-hierarchical Clustering (ISNC)* qu'on peut traduire en français par « la méthode de la graine idéale » pour les groupements non hiérarchiques. Les auteurs ont utilisé un indicateur de performance appelé efficacité de groupement qui mesure les mouvements intercellulaires et le taux d'utilisation des machines. Pour surmonter l'inconvénient de la fixation du nombre de groupes à obtenir avant de commencer la résolution du problème de formation, la méthode consiste à appliquer en première étape la théorie des graphes. En seconde étape, ils ont proposé de fixer, une valeur initiale de  $k$  des groupes à former qu'ils ont nommée graine « *seed* ». En troisième étape, ils ont appliqué une analyse multi variée de la matrice d'incidence.

Un an plus tard, les mêmes auteurs (Chandrasekharan et Rajagopalan, 1987) ont proposé le modèle ZODIAC. Ce modèle constitue une amélioration du modèle initial ISNC. Ils ont

ajouté une limite critique pour l'indicateur d'efficacité minimum qu'il faut respecter durant toutes les étapes de classification.

Selon (Joines et al. 1996), la méthode GRAFICS qui a été proposée par les chercheurs Srinivasan et Narendran a amélioré le résultat de groupement. Elle consiste à choisir la graine initiale  $k$  qui maximise la somme des coefficients de similarité entre les machines.

#### 4.2.6 Méthodes basées sur la classification automatique

Ces méthodes sont appelées aussi les méthodes non hiérarchiques. De nombreux algorithmes de type « plus proche voisin » ont été utilisés en TGAO. Ils consistent à créer des agrégats de produits en réunissant les produits qui sont considérés comme des points dans l'espace des machines. Il faut alors disposer d'une métrique dans cet espace et avoir la possibilité de définir de nouveaux points.

L'algorithme le plus simple est celui des nuées dynamiques. Il suppose connu le nombre  $n$  de classes à créer :

```

Début
    Choisir  $n$  centres de classes parmi les  $N$  produits à classer (aléatoirement)
    Affecter chaque produit au centre dont il est le plus proche (faire  $n$  classes)
    Calculer le centre de gravité des  $n$  classes
Répéter
    Affecter chaque produit au centre dont il est le plus proche
    Calculer le centre de gravité des  $n$  classes
    Jusqu'à stabilité
Fin
```

Cet algorithme consiste à créer aléatoirement des classes, puis à les faire évoluer jusqu'à stabilité. Curieusement, il se stabilise très vite, même si sa convergence théorique n'est pas prouvée. Par contre, le résultat dépend du choix des points initiaux. Pour l'utiliser correctement, il faut donc essayer plusieurs points de départ et rechercher les classes qui apparaissent indépendamment des centres initiaux (les formes fortes). De la même façon, il faut essayer différentes valeurs de  $p$  en comparant des indicateurs comme la cohésion (distance moyenne d'un point au centre de sa classe) et la discrimination (distance moyenne interclasse).

#### 4.2.7 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

Le problème de formation de cellules fait partie des problèmes d'affectation généraux, qui représentent une classe importante des problèmes d'optimisation combinatoire. Pour ces derniers, la plupart des cas, trouver la solution optimale est très complexe ; en effet, à quelques exceptions près, la seule méthode connue pour résoudre le problème de manière exacte serait de faire une énumération complète de toutes les solutions possibles (comme dans le cas de la méthode BEA). On parle dans ce cas de problème NP-complet. Ainsi, dans ces conditions, il est nécessaire de trouver un mode de résolution qui fournisse une solution de bonne qualité dans un laps de temps raisonnable : c'est ce que font les méthodes heuristiques.

##### 4.2.7.1 Les métaheuristiques

Les métaheuristiques jouent, aujourd'hui, un rôle primordial dans la résolution des problèmes d'optimisation difficile souvent issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle (Teghem et Pirlot, 2002).

Il existe trois classes principales de métaheuristiques, à savoir les méthodes constructives, celles dites de recherche locale et celles considérées comme évolutives (algorithmes évolutionnistes). D'après notre recherche bibliographique, principalement les méthodes de résolution appartenant au deux dernières classes sont utilisées pour résoudre le problème de formation de cellules (Geonwook et Leep, 2006).

Toutes les métaheuristiques s'appuient sur un équilibre entre l'intensification de la recherche et la diversification de celle-ci. D'un coté, l'intensification permet de rechercher des solutions de plus grande qualité en s'appuyant sur les solutions déjà trouvées et de l'autre, la diversification met en place des stratégies qui permettent d'explorer un plus grand espace de solutions et d'échapper à des minima locaux. Les méthodes de recherche locale sont des algorithmes itératifs qui explorent l'espace des solutions admissibles en se déplaçant pas à pas d'une solution à une autre. Le passage d'une solution admissible à une autre se fait sur la base d'un ensemble de modifications élémentaires qu'il s'agit de définir de cas en cas.

##### - *Le recuit simulé « Simulated annealing »*

Les origines de la méthode du *Recuit Simulé* remontent aux expériences de Metropolis en 1953 (Teghem et Pirlot, 2002). Le principe est de simuler l'évolution d'un système physique instable vers un état d'équilibre thermique à une température fixée. Fayez Boctor

a été parmi les premiers à appliquer une telle méthode pour résoudre le problème de formation de cellules de production. Dans son article (Boctor, 1991), a proposé un algorithme de programmation linéaire en nombres entiers qui a pour fonction objectif la minimisation du nombre d'éléments exceptionnels. Il a appliqué ensuite la méthode de recuit simulé sur dix problèmes de formation de cellules avec des matrices d'incidence binaire 0-1. Ces problèmes seront plus détaillés dans le deuxième chapitre (voir figure 2.28).

(Caux et al. 2000) ont proposé un algorithme qui a pour fonction objectif la minimisation du trafic intercellulaire en tenant compte de la contrainte des capacités disponibles des différentes machines du problème. Leur amélioration consiste à intégrer l'approche *Branch and bound* à la méthode de *recuit simulé* et ceci pour choisir la meilleure séquence de chaque produit qui donne une meilleure solution. Les matrices d'incidences des différents problèmes demeurent encore binaires.

(Xambre et Vilarinho, 2003) et (Wu, et al. 2008) ont proposé des améliorations pour l'utilisation de la méthode du *Recuit Simulé*. En effet, ils ont intégré le problème de machines multiples et le pourcentage d'utilisation des différentes machines dans le problème de formation des cellules.

### **- La méthode Tabou**

Tant que l'on ne se trouve pas dans un optimum local, toute méthode itérative se comporte donc comme la méthode de descente et améliore à chaque étape la valeur de la fonction objectif. Lorsque l'on atteint par contre un optimum local, la règle de déplacement donnée ci-dessus permet de choisir le moins mauvais des voisins, c'est-à-dire celui qui donne un accroissement aussi faible que possible de la fonction objectif. Ainsi, la méthode *Tabou* s'appuie sur un second principe qui consiste à garder en mémoire les dernières solutions visitées et à interdire le retour vers celles-ci pour un nombre fixé d'itérations, le but étant de donner assez de temps à l'algorithme pour sortir d'un minimum local.

L'utilisation de la méthode *Tabou* est très récente pour la formation de cellules de production. (Cao et Chen, 2004) ont proposé un modèle de programmation non linéaire en nombres entiers qui a pour fonction objectif la somme des différents coûts fixes et variables d'exploitation des cellules de production. Ils ont résolu ce modèle par l'application de la méthode *Tabou*.

(Adenso-Diaz et al. 2005) ont introduit des coefficients de similarité dans la formulation du problème puis ils ont appliqué la méthode *Tabou* pour les différents problèmes cités dans (Boctor, 1991). Ils ont amélioré légèrement les résultats.

(Fould et al. 2006) ont développé un algorithme de la méthode *Tabou*, en tenant compte du nombre de machines nécessaires par type (capacité des différentes machines). Ils ont essayé de minimiser les mouvements intercellulaires à travers une fonction coût et de changer si nécessaire la séquence des produits exceptionnels dans les différentes cellules.

#### 4.2.7.2 Les approches évolutives

Ces vingt dernières années, les méthodes évolutionnistes ont suscité un intérêt grandissant de la part de nombreuses communautés scientifiques (Paris et al. 2003). Les modèles utilisés, leur principe inspiré de la nature, leur capacité à prendre en compte un large spectre de problèmes, la raisonnable complexité des algorithmes mis en œuvre et les performances atteintes ont indubitablement contribué à leurs succès. Plusieurs chercheurs ont utilisé les algorithmes évolutionnistes (AE) pour la conception, la configuration et la conduite des systèmes de production et en particulier des systèmes de production cellulaires.

Chaque individu représente un point dans l'espace de recherche des solutions potentielles au problème donné. Quand on optimise un système de production, une solution peut être, par exemple, représentée par une liste de paramètres (liste de machines par cellules, liste de produits par famille, etc.). D'autres représentations possibles peuvent être un tableau de codes binaires par exemple (Caux et al. 1995), une liste de données par exemple (Chan et al. 2006), une expression, etc.

(Falkenauer, 1994) a été parmi les premiers à appliquer les algorithmes génétiques pour résoudre le problème de formation de cellules de production. Dans (Pierreval et al. 2003) les auteurs présentent une revue de la littérature de l'utilisation des AE soit pour la conception ou pour la configuration des systèmes de production cellulaire.

(Caux et al. 1995) ont proposé une méthode pour former des cellules en prenant en compte les machines et les opérateurs. Ils évitent au maximum d'affecter des opérateurs sur des machines dépassant leur compétence. Si c'est le cas, un coût d'apprentissage intervient. L'objectif est donc de minimiser les coûts de formation au regard des quantités de produits. L'algorithme évolutionniste gère une population où chaque solution est un ensemble de cellules sur lesquelles sont affectés des opérateurs ; l'affectation des



opérateurs étant réalisée par une méthode tirée de la théorie des graphes. (Mak et al. 2000) ont proposé des améliorations intéressantes à la formulation de l'algorithme génétique au niveau prise en compte de plusieurs paramètres de production.

(Stawowy, 2006) a utilisé l'algorithme génétique pour la formation des cellules de production. Il a utilisé l'indice efficacité de groupement comme nouveau critère d'arrêt. Par contre, (Chan et al. 2006) ont proposé l'application d'un algorithme génétique pour la résolution du problème de groupement des machines lorsqu'il existe des gammes alternatives, c'est-à-dire lorsqu'il existe plusieurs scénarios de fabrication possibles pour un même produit. Ils ont défini au départ un algorithme de programmation en nombres entiers qui a comme fonction objectif la minimisation du nombre des éléments exceptionnels et des éléments vides.

#### 4.2.7.3. Réseaux de neurones : (*Neural Networks*)

De nombreux chercheurs travaillant sur l'intelligence artificielle reprochent aux réseaux neuronaux de ne servir qu'à la reconnaissance des formes. Il est vrai qu'ils ont été créés pour résoudre ce problème, mais la technologie s'est développée bien au-delà des objectifs d'origine. Le principe de réseaux de neurones est aussi utilisé pour la conception de production et en particulier la conception des systèmes de production cellulaires.

(Carpenter et al. 1991) ont développé la théorie ART1 (*Adaptive Resonance Theory*) qui se base sur un apprentissage non supervisé. Cet apprentissage permet de décomposer les vecteurs d'entrée en groupes en se basant sur des coefficients de similarité. Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles qui se basent sur le principe des réseaux de neurones et en particulier (Venkumar et Noor-ul-Haq, 2005) qui ont amélioré le modèle ART 1. Ils ont affirmé que les résultats de formation des cellules sont identiques à ceux obtenus par les algorithmes évolutionnistes.

#### 4.2.7.4 Logique floue : (*Fuzzy logic*)

(Xu et Wang, 1989) sont parmi les premiers chercheurs à avoir utilisé la logique floue pour la formation des cellules de production. Ils ont appliqué plusieurs vecteurs qui décrivent les différentes entités des produits. Le nombre de familles à former étant fixe d'avance. Un nouveau type de produit est affecté à l'une des familles les plus proches en utilisant une technique de reconnaissance. Cette méthode n'est applicable que pour des matrices d'incidence binaire. (Lozano et al. 2002) ont amélioré les résultats de formation et ils ont rendu la méthode capable d'estimer le nombre de cellules à former.

#### 4.2.8 Méthodes basées sur des heuristiques

Une heuristique est utile lorsque l'espace de recherche, c'est-à-dire le nombre de possibilités cherchant à former les cellules, est trop grand pour être entièrement exploré : elle permet de réduire ce nombre et aboutir à une solution plus rapidement. Il existe plusieurs heuristiques pour résoudre le problème de formation de cellules en littérature.

(Akturk et Balkose, 1996) ont proposé une heuristique pour la formation des cellules tout en optimisant plusieurs critères de performance : minimiser les éléments exceptionnels, maximiser l'utilisation des machines dans leurs cellules.

(Kitaoka et al. 1999) ont proposé une méthode d'analyse multivariée pour la formation des cellules de production en trois phases. Dans les deux premières phases, ils ont adopté la définition du coefficient de similarité de Kusiak pour les machines et les produits. En une troisième phase, ils ont appliquée une double classification de la matrice d'incidence selon les lignes puis selon les colonnes.

(Cheng et al. 2001) proposent des règles pour la classification des machines et des produits et pour le traitement des éléments exceptionnels. Ces règles sont appliquées dans un ordre bien précis en proposant des heuristiques

(Mukattash et al. 2002) ont proposé une heuristique pour la résolution du problème de groupement des machines lorsqu'il existe des gammes alternatives (plusieurs scénarios de fabrication possibles pour un même produit). L'entrée de cette heuristique est une matrice d'incidence avec des durées opératoires.

### 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en avant plusieurs techniques et méthodes pour la formation des cellules. Le nombre de travaux de recherche dans ce domaine a fortement augmenté ces dernières années, notamment par l'utilisation de nouvelles approches. Ces travaux sont de plus en plus complexes mais aussi de plus en plus efficaces. Les modèles utilisés permettent des optimisations statiques et dynamiques, voire les deux conjointement. Toutefois, nous constatons certaines limites à l'application de ces méthodes de formation de cellules. D'une part, la qualité d'une solution est parfois difficile à évaluer. D'autres part, le problème de présence d'éléments exceptionnels dans la solution finale n'est pas totalement maîtrisé. L'absence d'outils informatiques simples et accessibles ne rend pas la majorité des méthodes pratique.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la méthode que nous avons développée pour la formation des cellules de production sans ou avec l'intégration de paramètres de production. La méthode proposée consiste à combiner le principe des méthodes de classification automatique avec celui des méthodes hiérarchiques en se basant sur une définition originale de coefficients de similarité.

## Chapitre 2

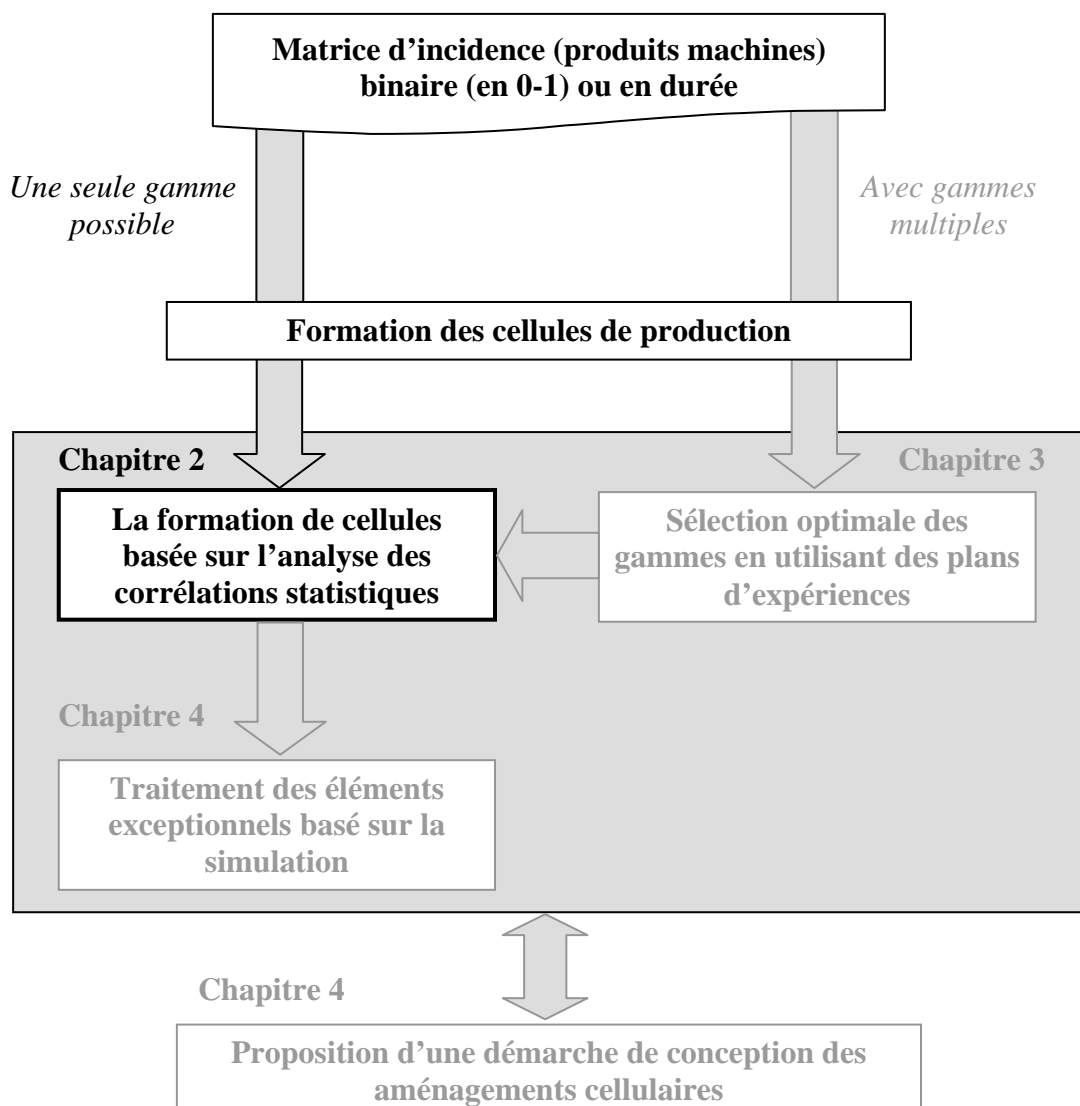
# LA FORMATION DES CELLULES BASÉE SUR L'ANALYSE DES CORRÉLATIONS

### 1. Introduction

L'objet de ce second chapitre est de présenter la méthode que nous avons développée pour la formation de cellules (FC) dans le cas où chaque produit est défini par une et une seule gamme. Cette méthode consiste à appliquer une analyse des corrélations statistiques entre les différentes machines et les différents produits. Elle en résulte une formation simultanée des familles de produits et des groupes de machines. Cette approche consiste à combiner le principe des méthodes de classification automatique avec celui des méthodes hiérarchiques en se basant sur une définition d'un nouveau coefficient de similarité.

La démarche que nous avons proposée se compose de trois étapes. Dans une première étape, la matrice de corrélation est utilisée comme une matrice de similarité pour les produits et les machines. Dans une seconde étape, l'application de la méthode Analyse en Composantes Principales (ACP) et l'analyse graphique du plan principal permettent d'une part, le groupement des machines en groupes et des produits en familles et d'autre part, l'identification machines et/ou produits exceptionnels. Le but de la troisième étape est d'affecter ces éléments exceptionnels aux cellules tout en maximisant la corrélation entre les différents éléments (produits et machines).

Après avoir présenté les indicateurs de performances des solutions de formation des cellules, ce chapitre s'articule autour de quatre autres parties. Dans une première partie, nous proposons une description des méthodes d'analyse des données et principalement la méthode ACP. Dans une seconde partie, décrivons l'approche proposée pour la formation de cellules pour des matrices d'incidence binaires (Hachicha et al. 2008a). En troisième partie nous traitons l'évaluation et la validation de l'approche proposée à travers des exemples reconnus dans la littérature. Finalement, nous étudions l'extension de cette approche pour des problèmes de formation de cellules qui prennent en considération des paramètres de production comme les durées opératoires (Hachicha et al. 2006).



**Figure 2.1** Place du deuxième chapitre dans les travaux de thèse

Les hypothèses retenues dans l'approche de formation de cellules proposée sont :

- Le problème de formation des cellules est posé sous forme d'une matrice d'incidence binaire (0/1) traduisant pour chaque produit l'utilisation ou non de chaque machine. Cette hypothèse est identique à celle de grand nombre de méthodologies existantes en littérature comme dans : (King, 1980), (Chandrasekharan, et Rajagopalan, 1987), (Kusiak, 1987), (Boctor, 1991), (Cheng et al. 2001), (Wang, 2003), (Wu, 2004), (Albadawi et al. 2005), (Wu, et al. 2007) et d'autres.
- Le problème peut être aussi posé sous forme d'une matrice d'incidence en durées opératoires, comme dans (Gupta et Saifoddini, 1990), (Vohra et al.,1990), (Chen et Guerrero,1994), (Sarker et Balan, 1996), et d'autres.
- Les machines seront considérées comme différentes dans le modèle proposé, même si elles possèdent un fonctionnement analogue.

- Chaque produit est présenté par une seule gamme de fabrication.

Comme présenté dans le premier chapitre, il existe dans la littérature plusieurs méthodes pour la formation de cellules. Pour pouvoir comparer deux ou plusieurs méthodes, il est nécessaire de définir des critères de performance d'une solution (Chan et Milner, 1982).

## 2. Les critères de performance des solutions

Plusieurs indicateurs sont proposés en littérature, nous allons citer les plus importants et les plus utilisés. (Gupta et Saifoddini, 1990) ont noté que ces indicateurs sont utilisés principalement dans le cas où la matrice d'incidence est binaire. En effet, ces indicateurs sont indépendants des paramètres de production comme la durée des opérations, la capacité des machines, la séquence des produits, etc. Dans le cas où le problème est posé sous forme d'une matrice d'incidence en durées opératoires.

### 2.1 Pourcentage d'éléments exceptionnels

Le pourcentage d'éléments exceptionnels (PEE) est défini comme le rapport du nombre des éléments exceptionnels (NEE) avec le nombre d'éléments unitaires (UE) de la matrice d'incidence. Plus petite la valeur de PEE, donc la solution est meilleure.

$$PEE = \frac{NEE}{UE} \times 100 \quad (15)$$

Mathématiquement, un élément «  $a_{ij}$  » de la matrice d'incidence est un élément exceptionnel si et seulement si ( $a_{ij} = 1$ ) et ( $\exists k, x_{jk} \neq y_{ik}$ ). On peut écrire NEE par l'équation (16)

$$NEE = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^F \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^p a_{ij} |x_{if} - x_{jf}| \quad (16)$$

Il est évident qu'on peut écrire UE selon l'expression (17)

$$UE = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (17)$$

## 2.2 Taux moyen d'utilisation des machines

Le taux d'utilisation des machines (TUM) est défini par (Chandrasekharan et Rajagopalan, 1986). Il indique le pourcentage de temps où les machines sont utilisées dans leur cellule. La solution est meilleure dans le cas où le TUM est grand.

$$\text{TUM} = \frac{N}{\sum_{k=1}^F m_k p_k} \times 100 \quad (18)$$

Avec  $N$  : le nombre d'éléments unitaires dans les blocs diagonaux.

$F$  : nombre de cellules formées

$m_k$  : nombre de machines regroupées dans la  $k^{\text{ième}}$  cellule

$p_k$  : nombre de produits affectés à la  $k^{\text{ième}}$  cellule

## 2.3 Premier indicateur d'efficacité de groupement

Ce critère de performance intègre le NEE et le TUM. Il est défini par (Chandrasekharan et Rajagopalan, 1986) comme l'indique l'expression (19)

$$\text{EG}_1 = \alpha \cdot \frac{\text{UE} - \text{NEE}}{\sum_{k=1}^F m_k p_k} + (1 - \alpha) \left( 1 - \frac{\text{NEE}}{m \cdot p - \sum_{k=1}^F m_k p_k} \right) \quad (19)$$

Avec  $\alpha \in [0,1]$  un coefficient de poids à choisir selon l'importance qu'on veut attribuer à l'un des deux termes.

## 2.4 Deuxième indicateur d'efficacité de groupement

(Kumar et Chandrasekharan, 1990) ont proposé une autre définition d'un critère de performance qui peut mesurer l'efficacité de groupement (EG) et qui fait intervenir le nombre d'éléments vides (NEV) :

$$\text{EG}_2 = \frac{\text{UE} - \text{NEE}}{\text{UE} + \text{NEV}} \quad (20)$$

Mathématiquement, un élément «  $a_{ij}$  » de la matrice d'incidence est un élément vide si et seulement si ( $a_{ij} = 0$ ) et ( $\exists k, x_{jk} = y_{ik}$ ). On peut écrire le NEV par l'expression (21)

$$NEV = \sum_{k=1}^F \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^p (1 - a_{ij}) x_{if} x_{jf} \quad (21)$$

### 3. Analyse de données

#### 3.1 Objectifs de l'analyse des données

L'analyse de données est apparue dans les années trente grâce à H. Hotteling, qui initialisait le principe de l'analyse en composantes principales et de l'analyse canonique en s'inspirant des travaux de C. Spearman et de K. Pearson datant du début du siècle (Labordere, 1977).

La statistique classique ne s'intéresse qu'à un nombre limité de caractères mesurés sur un ensemble restreint d'individus. Elle s'appuie sur des estimations ou des tests très restrictifs. Les hypothèses émises sont souvent très approximatives et les lois de distribution très théoriques. Dans la réalité, les individus sont le plus souvent décrits par de très nombreux paramètres, qui n'obéissent pas à des lois connues à priori. La différence essentielle de l'analyse de données, par rapport à la statistique classique, est qu'elle réalise une étude globale du couple individus/caractères en s'appuyant sur des représentations graphiques beaucoup plus lisibles que de volumineux tableaux de mesures (Gnanadesikan, 1997). Les ressemblances ou les dissemblances entre individus ou entre caractères, leurs corrélations positives ou négatives sont à la base de l'analyse, qui peut s'effectuer suivant plusieurs points de vue.

#### 3.2 Méthodes d'analyse de données

Les données sont consignées dans une matrice rectangulaire appelée matrice de croisement, qui croise les individus et les variables. Le tableau 2.1 présente une matrice de croisement de  $m$  variables quantitatifs sur  $p$  individus distincts. Les lignes représentent les individus  $I_i$  et les colonnes représentent les variables  $V_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$  et  $j = 1, 2, \dots, m$ .

De plus, la méthode de modélisation sera ici linéaire puisque chaque facteur synthétique sera la combinaison linéaire des caractères initiaux. Les principales méthodes issues de cette démarche seront :

- l'analyse en composantes principales,



- l'analyse factorielle des correspondances,
- l'analyse factorielle discriminante.

**Tableau 2.1** *Modèle de matrice de croisement pour des données multivariées*

	$V_1$	$V_2$	$\dots$	$V_j$	$\dots$	$V_m$
$I_1$	$x_{11}$	$x_{12}$		$x_{1j}$		$x_{1m}$
$I_2$	$x_{21}$	$x_{22}$		$x_{2j}$		$x_{2m}$
$\cdot$				$\cdot$		
$\cdot$				$\cdot$		
$I_i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	$\dots$	$x_{ij}$		$x_{im}$
$\cdot$						
$\cdot$						
$I_p$	$x_{p1}$	$x_{p2}$		$x_{pj}$		$x_{pm}$

Les individus peuvent représenter des entités comme des personnes, des entreprises, des pays, des journaux, etc. Sur ces individus nous allons réaliser des observations ou des mesures. Les individus peuvent représenter l'ensemble d'une population ou simplement une partie qui n'est pas nécessairement sensée être. Les variables sont des caractères relatifs à ces individus. Elles peuvent être quantitatives (elle prend des valeurs sur une échelle numérique) ou qualitatives.

### 3.3 Méthode d'Analyse en Composantes Principales

Longtemps affaire de spécialistes, la méthode ACP s'est répandue principalement grâce à la diffusion de l'informatique dont les capacités actuelles permettent de réaliser les calculs importants qu'implique le recours à cette méthode. Toutes les entreprises disposent maintenant, à un coût abordable, d'une puissance de traitements informatiques sans commune mesure avec celles dont disposaient les plus grosses entreprises, il y a une vingtaine d'années (Zohhad, 1998). Son usage s'est étendu à des domaines aussi divers que la sociologie, la médecine, la biologie, la métrologie, l'économie ou la gestion (Delagarge, 2000). De façon générale, l'ACP concerne les domaines ou les problèmes mettent en jeu une masse importante de données et de variables, dont les représentations sous forme de tableaux ne permettent pas d'en cerner les principales caractéristiques et celles sous forme graphique sont le plus souvent impossibles.

Le principe de la méthode est d'obtenir une représentation approchée du nuage des  $p$  individus dans un sous-espace de dimension plus faible. Ceci s'effectue par projection. Le choix de l'espace de projection s'effectue selon le critère suivant qui revient à déformer le moins possible les distances en projection : le sous-espace de dimension  $k$  recherché est tel que la moyenne des carrés des distances entre projections soit la plus grande possible. (En effet, en projection les distances ne peuvent que diminuer). Le but est d'obtenir une représentation du nuage dans un espace de dimension réduite de telle manière que l'inertie expliquée dans cet espace soit la plus grande possible. Pour cela, il est nécessaire dans un premier temps de rechercher les plus grandes valeurs propres de la matrice et de déterminer, par les vecteurs propres associés, les axes de plus forte inertie du nuage des individus dans l'espace des paramètres. Ceci réalisé, une carte factorielle permettra de montrer les caractéristiques essentielles du jeu de données étudié. Ceci pourra être complété par une carte représentant le cercle de corrélation des paramètres, afin de pouvoir faire le lien entre la position des points (individus) dans l'espace et la cause principale de cette position.

#### **4. Description de l'approche proposée**

##### **4.1 Cas des matrices d'incidence binaires**

Chaque entreprise gère des quantités d'informations, certaines liées à la conception du produit, aux moyens de fabrication, et d'autres aux procédés de fabrication. Les projets industriels deviennent de plus en plus complexes. Rechercher et manipuler une information parmi des masses de documents relève parfois de l'exploit même si on dispose d'un système informatique performant. De ce fait, on a pensé à analyser la masse de données présentée par la matrice d'incidence et à comprendre leurs éventuelles liaisons. Une méthode d'analyse de données pourra-t-elle répondre à ce besoin ?

(Arvindeh et Irani, 1994) ont répondu à cette question positivement. Ils sont les premiers à utiliser la méthode ACP pour étudier la faisabilité de formation de cellules. Ils proposent d'utiliser cette méthode comme une première étape pour le classement de plusieurs produits en familles. La deuxième étape consiste à appliquer l'une des méthodes de diagonalisation de matrice pour résoudre le problème de formation des cellules.

(Albadawi et al. 2005) ont proposé une démarche en deux étapes. La première consiste à utiliser l'ACP en se basant sur l'indice de similarité de Jaccard, pour la formation des

groupes de machines seulement. Dans une seconde étape, ils ont proposé un algorithme pour l'affectation des produits aux cellules ainsi formées.

Dans ce travail de thèse, nous avons proposé une nouvelle définition du coefficient de similarité qui nous a permis d'appliquer la méthode ACP (Hachciha et al. 2008a) d'une autre manière que dans (Arvinth et Irani, 1994) et (Albadawi et al. 2005). L'intérêt consiste à obtenir simultanément les familles de produits et les sous groupes de machines. L'approche proposée se déroule en trois phases comme l'indique la figure 2.2.

#### 4.1.1 Matrice des coefficients de similarité

Soit un atelier possédant  $m$  machines et  $p$  produits. L'objectif est de former des cellules. Soit  $A^0$  la matrice d'incidence binaire du problème. Cette matrice  $p \times m$  est représentée dans l'équation 22.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & & & & a_{2m} \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & \\ a_{p1} & a_{p2} & & & & a_{pm} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Avec  $a_{ij} = 1$  si le produit  $i$  passe dans la machine  $j$  sinon  $a_{ij} = 0$

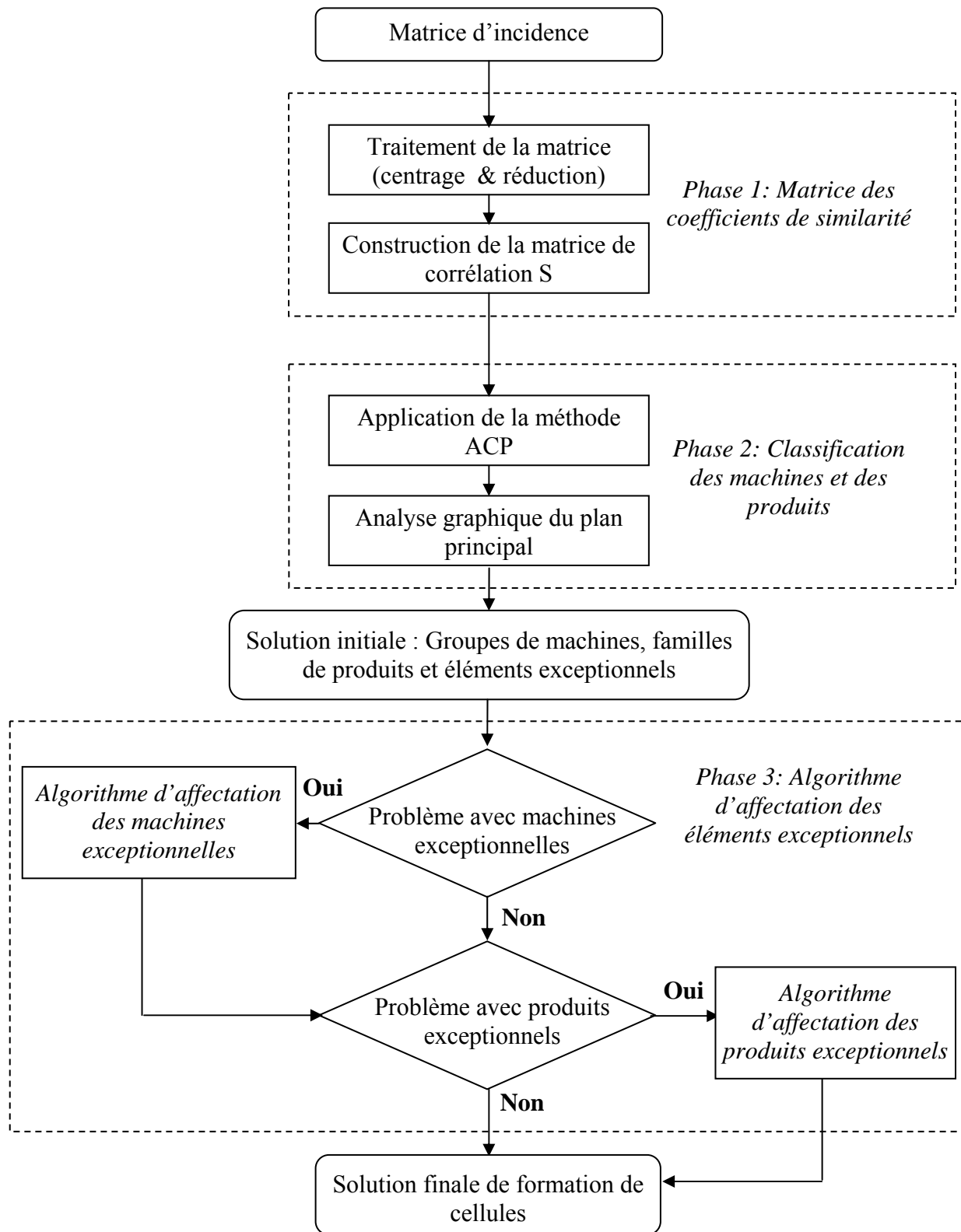
$M_j$  est le vecteur machine déduit de la matrice d'incidence  $A$ :  $M_j^A [a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{pj}]$ . Dans la méthode proposée, chaque machine est considérée comme une variable qui correspond à un point de  $p$  coordonnées (dans un espace euclidien de dimension  $p$ ) relatif au vecteur  $M_j$ .

La matrice d'incidence obtenue présente une masse d'informations difficilement accessible telles quelles. L'approche que nous avons développée se base sur l'analyse de cette matrice, pour savoir et expliquer la liaison éventuelle qui existe entre les différents machines et produits.

Afin de rendre le résultat indépendant des charges affectées pour chaque machine, un prétraitement indispensable consiste à centrer et réduire les variables machines (comme l'indique l'équation 23). Cette opération permet de mieux voir les différences relatives. Le centre de gravité des variables (points) machines sont alors confondus à l'origine (Zohhad et al. 1998).

$$M_j^B = \frac{M_j^A - E_j}{\sigma_j} \quad (23)$$

Avec  $E_j$  est la moyenne des éléments du vecteur machine  $M_j$ . Elle est donnée par :



**Figure 2.2** Architecture de l'approche proposée pour la formation de cellules

$$E_j = \frac{\sum_{k=1}^p a_{kj}}{p} \quad (24)$$

et

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (a_{kj} - E_j)^2 \quad (25)$$

La matrice de similarité proposée est basée sur la matrice de corrélation des vecteurs machines.

$$\text{Elle est définie par } S = \frac{1}{p} B' B \quad (26)$$

Un élément  $S_{ij}$  de la matrice de dimension  $(m \times m)$  est donné par :

$$S_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p b_{ik} b_{jk} \quad (\text{en particulier } S_{ii} = 1) \quad (27)$$

#### 4.1.2 Classification des machines et des produits

Nous avons utilisé la méthode ACP qui permet une recherche des ressemblances et des différences, une transformation des données initiales pour les « visualiser » et finalement, une réduction sans trop perdre d'informations en éliminant les redondances et en exhibant des liaisons.

Le problème général de ACP est la réduction du nombre initial de dimension de manière à conserver le plus possible d'information et à rendre les données plus facilement significatives à l'analyse. Pour cela, on cherche de nouvelles variables, combinaisons linéaires des anciennes variables, et « résumant » le mieux possible les anciennes variables. Le principe de cette méthode se base sur la recherche des valeurs propres et des vecteurs propres associés de la matrice de corrélation  $S$ . Cette matrice est par définition symétrique, définie positive. Elle admet donc  $m$  valeurs propres réelles (Ledauphin et al. 2004). Ces valeurs propres, (notées  $\lambda_i$ ) sont les solutions de l'équation (28)

$$\det(S - \lambda_i I_d) = 0 \quad ; \quad i \in \langle 1, m \rangle \quad (28)$$

Les valeurs propres sont présentées dans un ordre croissant  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$  et pour chaque  $\lambda_i$  est associé un vecteur propre noté  $C_i$ .  $I_d$  étant la matrice identité de dimension ( $m \times m$ ).

Dans notre approche, les produits sont considérés comme les individus et les machines sont considérées comme les variables. Par la suite, l'approche consiste à projeter les points « machines » et les points « produits » dans le plan principal. Le plan principal formé par les premiers axes principaux des vecteurs unitaires respectifs ( $C_1, C_2$ ). Le pourcentage d'inertie expliqué par le plan principal (pourcentage de conservation des données de la matrice d'incidence) est le pourcentage cumulé (PC) des deux premières valeurs propres :  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

$$PC = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{m} \quad (29)$$

Le plan principal donne les projections des produits et des machines. Il reflète les distances entre les produits et les corrélations entre les machines.

On peut se demander à quoi on aurait abouti si on avait effectué le calcul à l'envers, c'est-à-dire au lieu de former la matrice  $S = B^T B$  de dimensions ( $m, m$ ), on avait formé la matrice  $W = B B^T$  de dimensions ( $p, p$ ) pour ensuite la diagonaliser. On montre dans (Auray et al. 1990) et dans (Lagarge, 2000) que la réponse à cette question est qu'on aurait abouti au même résultat, car parmi les  $p$  valeurs propres de la matrice  $W$ , toutes sont nulles à l'exception des  $m$  premières qui sont celles de la matrice  $S$  (il est à noter que généralement  $m \leq p$ ). Les matrices  $S$  et  $W$  qui sont totalement différentes au départ se présentent après diagonalisation d'une manière quasi-identique. Les matrices  $S$  et  $W$  représentent deux images d'une même réalité.

Il existe donc une dualité entre les deux démarches d'utilisation des deux matrices  $S$  et  $W$ . L'utilisation de la matrice  $W$  permet la représentation des produits et d'utiliser la même démarche pour les rassembler en famille. Le fait qu'il existe une dualité entre les deux matrices, on peut déterminer simultanément les groupes de machines et les familles de produits. Il suffit pour chaque produit, de tracer des flèches reliant l'origine avec le point correspondant et d'appliquer les mêmes règles utilisées dans l'analyse d'affectation des machines.

### 4.1.3 Algorithme d'affectation des éléments exceptionnels

Une solution de FC contient généralement des éléments exceptionnels (Présence de 1 en dehors des blocs diagonaux) qu'il faut les réduire pour améliorer les performances de l'AC. En effet, un élément exceptionnel engendre un ou plusieurs mouvements intercellulaires (Singh et Rajamani, 1996). En littérature, un élément exceptionnel désigne principalement une machine exceptionnelle (ou machine goulot). Réciproquement, il pourra désigner un produit exceptionnel (Shafer et al. 1992). En effet, un produit exceptionnel est vu comme un produit qui nécessite une ou plusieurs machines exceptionnelles. Dans l'approche proposée, nous avons distingué entre les machines exceptionnelles et les produits exceptionnels.

Pour l'affectation des machines exceptionnelles, nous avons proposé un algorithme qui doit affecter une machine exceptionnelle pour chaque itération. Soit  $e_m$  le nombre de machines exceptionnelles.

Début

De  $k = 1$  jusqu'à  $e_m$  faire

Etape 1 : calculer l'angle  $\theta_{ik}$  entre chaque machine  $M_i$  (différente de  $M_k$  et ne constitue pas une autre machine exceptionnelle)

$$\theta_{ik} = \min(|\theta_i - \theta_k|, 2\pi - |\theta_i - \theta_k|) \quad (30)$$

Avec  $\theta_{ik}$  l'angle entre la machine  $M_i$  et le premier axe principal,  $\theta_i \in ]-\pi, \pi]$

Etape 2 : Trouver la petite valeur des  $\theta_{ik}$  et affecter, par conséquence, la machine  $M_k$  à la cellule de la machine  $M_i$

Fin

Pour l'affectation des produits exceptionnels, nous avons établi un autre algorithme qui doit traiter un produit exceptionnel pour chaque itération. Soit  $e_p$  le nombre de produits exceptionnels.

Début

De  $k = 1$  jusqu'à  $e_p$  faire

Etape 1 : calculer la distance euclidienne entre chaque produit  $P_i$  (différente de  $P_k$  et ne constitue pas un autre produit exceptionnel)

$$d(P_k, P_i) = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \quad (31)$$

Avec  $x_i$  et  $y_i$  sont les coordonnées de  $P_i$  dans le plan principal

Etape 2 : Trouver la petite valeur  $d(P_k, P_i)$  et affecter, par conséquence, le produit  $P_k$  à la cellule du produit  $P_i$

Fin

#### 4.1.4 Exemple de résolution

La méthodologie est bien expliquée à travers un exemple simple. Le problème traité de formation de cellules est celui qui a été présenté par (Boctor, 1991). Soit un atelier disposant de 7 machines pour fabriquer 11 produits.

#### Phase 1 : Matrice des coefficients de similarité

La figure 2.3, présente la matrice d'incidence correspondante A. Après centrage et réduction en utilisant les équations (23), (24) et (25) on obtient la matrice B qui est présentée dans la figure 2.4.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} M1 & M2 & M3 & M4 & M5 & M6 & M7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \\ P6 \\ P7 \\ P8 \\ P9 \\ P10 \\ P11 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

**Figure 2.3** Matrice d'incidence initiale du problème de Boctor

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} M1 & M2 & M3 & M4 & M5 & M6 & M7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \\ P6 \\ P7 \\ P8 \\ P9 \\ P10 \\ P11 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1,32 & 1,63 & -0,61 & -0,61 & -0,47 & -0,61 & -0,61 \\ -0,76 & 1,63 & 1,63 & -0,61 & -0,47 & -0,61 & -0,61 \\ 1,32 & -0,61 & -0,61 & -0,61 & 2,12 & 1,63 & -0,61 \\ -0,76 & -0,61 & -0,61 & 1,63 & -0,47 & 1,63 & -0,61 \\ -0,76 & -0,61 & -0,61 & 1,63 & -0,47 & -0,61 & 1,63 \\ -0,76 & 1,63 & 1,63 & -0,61 & -0,47 & -0,61 & -0,61 \\ 1,32 & -0,61 & -0,61 & -0,61 & 2,12 & -0,61 & -0,61 \\ -0,76 & -0,61 & -0,61 & -0,61 & -0,47 & -0,61 & 1,63 \\ -0,76 & -0,61 & 1,63 & -0,61 & -0,47 & -0,61 & -0,61 \\ -0,76 & -0,61 & -0,61 & 1,63 & -0,47 & -0,61 & 1,63 \\ 1,32 & -0,61 & -0,61 & -0,61 & -0,47 & 1,63 & -0,61 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

**Figure 2.4** Matrice d'incidence centrée réduite relative au problème de Boctor



La matrice S est une matrice carrée (7,7) dont tous les éléments ne sont autres que les coefficients de corrélation des machines prises deux à deux. En conséquence, tous les éléments de la diagonale principale sont égaux à 1 (ce sont les sommes des carrés de chaque colonne). Tous les autres éléments sont des sommes de produits croisés. Ces éléments sont calculés soit en application de l'écriture matricielle de l'équation (26), soit l'équation (27). La matrice de similarité est présentée dans la figure 2.5.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
M1	1,00						
M2	-0,04	1,00					
M3	-0,46	0,54	1,00				
M4	-0,46	-0,38	-0,38	1,00			
M5	0,62	-0,29	-0,29	-0,29	1,00		
M6	0,39	-0,38	-0,38	0,08	0,24	1,00	
M7	-0,46	-0,38	-0,38	0,54	-0,29	-0,38	1,00

**Figure 2.5** Matrice S de similarité relative au problème de Boctor

## Phase 2 : Classification des machines et des produits

Les points machines forment un cercle centré sur l'origine. Le rayon de ce cercle (où se trouvent les points machines) est totalement arbitraire. La distance d'un point-machine à l'origine ne signifie rien. En revanche, la direction de la machine (vecteur machine) joignant l'origine à ce point est très significative en termes de corrélation. Leurs positions respectives sur le cercle nous renseignent à propos de leurs corrélations. En effet, le coefficient de corrélation de deux machines (vecteurs machines) est égale au carré du cosinus de l'angle qu'elles font entre elles.

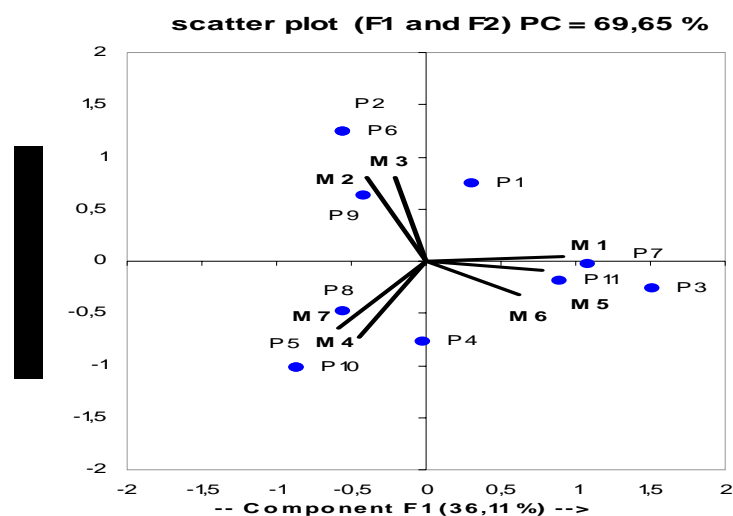
Soit  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_7$  ces valeurs propres tel que  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_7$  et  $C_1, C_2, \dots, C_7$  les vecteurs propres respectivement associés à ces valeurs prises dans l'ordre. Les valeurs propres et les vecteurs propres sont présentés dans le tableau 2.2. Algébriquement, la matrice de S, dans la base formée de vecteurs propres ( $C_1, C_2, \dots, C_7$ ), est une matrice diagonale.

**Tableau 2.2** Les valeurs propres relatives au problème de (Boctor, 1991)

Composant	Valeur propre	Taux d'explication (%)	Pourcentage cumulé (%)
1	2,53	36,11	36,11
2	2,35	33,54	<b>69,65 = PC</b>
3	0,92	13,17	82,83
4	0,61	8,77	91,59
5	0,38	5,46	97,05
6	0,16	2,27	99,32
7	0,05	0,68	100,00
Somme	7,00	100	

Les deux premiers axes expliquent PC = 69,65 %. Le plan principal est schématisé par la figure 2.6. Pour l'analyse du plan principal, quatre situations typiques peuvent exister :

- Deux machines sont voisines sont corrélées entre elles. Ceci explique leurs appartenances à une même cellule. C'est le cas ici pour les couples de machines (M<sub>2</sub> et M<sub>3</sub>) et pour (M<sub>4</sub> et M<sub>7</sub>) qui représentent une corrélation maximale par rapport aux autres couples.
- Deux machines pratiquement opposées ( $\pi$ ) seraient aussi très corrélées, mais négativement. Elles ne doivent pas appartenir à une même cellule. C'est le cas ici pour le couple de machines (M<sub>3</sub> et M<sub>4</sub>).
- Deux machines à angle approximativement droit ( $\pi/2$ ) l'un de l'autre sur le cercle sont indépendantes (corrélations nulles). C'est le cas ici pour les couples de machines (M<sub>1</sub> et M<sub>3</sub>) et (M<sub>4</sub> et M<sub>6</sub>) qui ne doivent pas être regroupées ensemble. En appliquant la même règle, les deux axes principaux sont évidemment indépendants.

**Figure 2.6** Illustration du plan principal relatif au problème de Boctor

- Si aucune des trois dernières situations n'est pas applicable (hésitation), la machine considérée sera alors une machine exceptionnelle qu'il faut affecter à l'une des cellules en appliquant l'algorithme de la troisième phase.

En tenant compte des résultats d'analyse de ces règles, on affirme simplement que l'atelier doit comporter trois cellules : une première cellule comportant les machines  $M_2$  et  $M_3$  et une seconde cellule comportant les machines  $M_1$ ,  $M_5$  et  $M_6$  et finalement une troisième cellule comportant les machines  $M_4$  et  $M_7$ .

De la même manière, on groupe les produits en familles. Dans certains cas, on peut rapidement décider le groupage des produits. Pour les situations typiques suivantes :

- Deux ou plusieurs produits sont très proches les uns des autres. Ceci explique le grand rassemblement de leurs gammes de production. Par la suite, il est impératif de les rassembler dans une même famille de produits. C'est le cas ici pour les couples de produits ( $P_2$  et  $P_6$ ) et ( $P_3$  et  $P_{11}$ ).
- Un produit est très proche de l'axe orienté positivement d'une machine. Ceci explique sa forte utilisation de cette machine. Le produit sera affecté à la cellule qui compose la machine correspondante. C'est le cas ici, par exemple pour les couples ( $P_7$  et  $M_1$ ) et pour ( $P_8$  et  $M_7$ ).

S'il y a ambiguïté pour un produit, il sera considéré comme produit exceptionnel. Cette ambiguïté se manifeste quand les cellules à former possèdent des éléments exceptionnels.

	M2	M3	M1	M5	M6	M4	M7
P2	1	1					
P6	1	1					
P9	0	1					
P3			1	1	1		
P7			1	1	0		
P11			1	0	1		
P5						1	1
P8						0	1
P10						1	1
P1	1		1				
P4					1	1	

**Figure 2.7** Solution initiale du problème de Boctor

### Phase 3 : Algorithme d'affectation des éléments exceptionnels

D'après la deuxième phase, on remarque l'éloignement des produits  $P_1$  et  $P_4$  dans la figure 2.6. Pour affecter ces deux produits, il est nécessaire d'appliquer l'algorithme de la troisième phase. Le produit  $P_1$  est plus proche aux produits de la première cellule, par conséquent il sera affecté à cette cellule. De la même manière le produit  $P_4$  sera affecté à

la troisième cellule. Le résultat final du problème de formation de cellule est donné dans figure 2.8.

	M2	M3	M1	M5	M6	M4	M7
P1	1	0	1				
P2	1	1					
P6	1	1					
P9	0	1					
P3			1	1	1		
P7			1	1	0		
P11			1	0	1		
P4					1	1	0
P5						1	1
P8						0	1
P10						1	1

**Figure 2.8** Solution finale du problème de Boctor

## 4.2 Cas des matrices d'incidence en durées

### 4.2.1 Cas des demandes identiques de produits

En littérature, il n'existe pas assez de travaux de recherche qui traitent le problème de formation de cellules pour des matrices d'incidence en durées opératoires (Gupta, Saifoddini, 1990). L'objectif de cette partie est de vérifier la validation de l'approche proposée pour ce type de problème (Hachicha et al. 2006). Prenons le cas de l'exemple présenté par (Chen, Guerrero, 1994) qui est donné par la figure 2.9. Ce problème consiste à répartir 10 produits et 6 machines.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
P1	0	7	8	1	0	0
P2	0	4	7	5	0	0
P3	0	6	4	1	0	0
P4	0	8	5	5	0	0
P5	2	0	0	4	3	1
P6	0	9	6	0	0	3
P7	0	1	0	0	0	0
P8	3	0	0	0	0	1
P9	0	0	0	0	7	6
P10	0	0	0	0	0	9

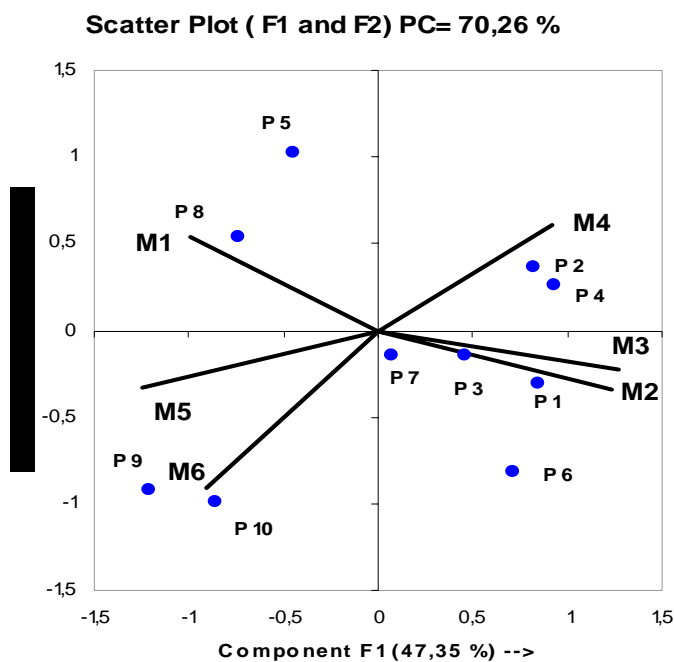
**Figure 2.9** Matrice d'incidence initiale du problème de Chen (Chen et Guerrero, 1994)

En appliquant la démarche proposée, on obtient en première phase, la matrice des coefficients de similarité présentée dans la figure 2.10.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
M1	1,00					
M2	-0,49	1,00				
M3	-0,47	0,87	1,00			
M4	0,00	0,28	0,37	1,00		
M5	0,04	-0,45	-0,43	-0,09	1,00	
M6	-0,17	-0,41	-0,45	-0,46	-0,38	1,00

**Figure 2.10** Matrice S de similarité relative au problème de Chen

On obtient en deuxième phase, le plan principal relatif au problème de (Chen et Guerrero, 1994) présenté par la figure 2.11.



**Figure 2.11** Illustration du plan principal relatif au problème de Chen

En analysant le plan principal de la figure 2.11 et en appliquant l’algorithme d’affectation des produits exponentiels pour les produits P<sub>5</sub> et P<sub>6</sub>, on obtient la solution finale donnée dans la figure 2.12

	M2	M3	M4	M1	M5	M6
P1	7	8	1			
P2	4	7	5			
P3	6	4	1			
P4	8	5	5			
P6	9	6	0			3
P7	1	0	0			
P5			4	2	3	1
P8				3	0	1
P9				0	7	6
P10				0	0	9

**Figure 2.12** Solution finale proposée du problème de Chen (temps opératoire en dehors des cellules =  $3 + 4 = 7$  UT)

	M4	M2	M3	M6	M1	M5
P2	5	4	7			
P4	5	8	5			
P3	1	6	4			
P1	1	7	8			
P6		9	6	3	0	0
P5	4			1	2	3
P8				1	3	0
P7		1		0	0	0
P9				6	0	7
P10				9	0	0

**Figure 2.13** Solution finale du problème de Chen par l'application de la méthode de King (temps opératoire en dehors des cellules =  $9 + 6 + 4 + 1 = 20$  UT)

(Chen et Guerrero, 1994) ont appliqué la méthode de King pour le même problème et ils ont trouvé le résultat présenté dans la figure 2.13. En comparant les deux solutions des figures 2.12 et 2.13, nous constatons que la solution de l'approche proposée (figure 2.12) est meilleure que celle de King en terme de nombre d'éléments exceptionnels et de durée totale des opérations en dehors des cellules.

Il est à rappeler que parmi les hypothèses de résolution de ce problème est : l'égalité des demandes des différents produits. La question qui se pose maintenant est d'étudier l'efficacité de l'approche proposée pour différentes demandes de produits.

#### 4.2.2. Influence de la demande sur la solution de formation des cellules

Nous supposons en plus de la matrice d'incidence donnée par la figure 2.9, une demande variable des produits comme l'indique le tableau 2.3.

**Tableau 2.3** Demandes des différents produits du problème de (Chen et Guerrero, 1994)

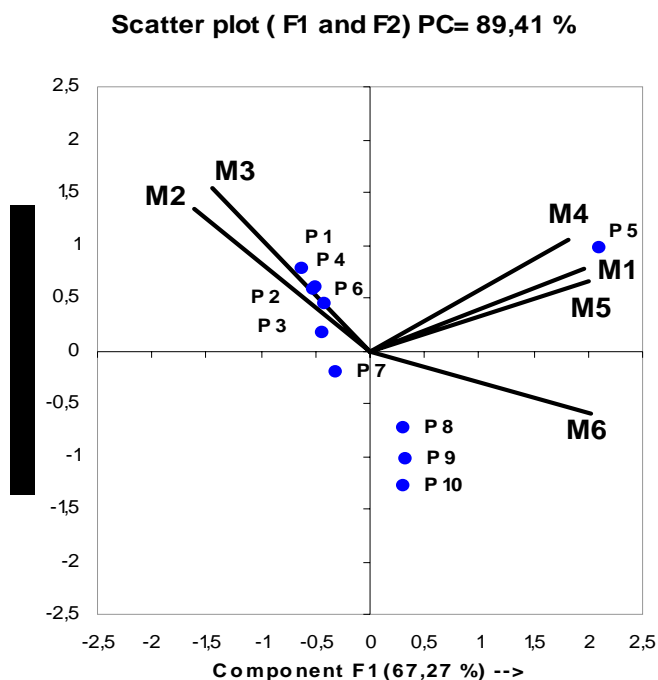
Produits	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Production volume	10	10	10	10	100	10	60	10	10	10

De ce fait, on peut écrire la nouvelle matrice d'incidence en durées opératoire qui est présentée dans la figure 2.14.

0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
P1	0	70	80	10	0	0
P2	0	40	70	50	0	0
P3	0	60	40	10	0	0
P4	0	80	50	50	0	0
P5	200	0	0	400	300	100
P6	0	90	60	0	0	30
P7	0	60	0	0	0	0
P8	30	0	0	0	0	10
P9	0	0	0	0	70	60
P10	0	0	0	0	0	90

**Figure 2.14** Matrice d'incidence du problème de Chen avec demande variable

En appliquant la démarche proposée à cette matrice d'incidence, nous obtenons en première étape, le plan principal associé à ce problème présenté par la figure 2.15. En seconde étape, la solution finale du problème qui est présentée dans la figure 2.16. Nous remarquons un changement radical dans le résultat de formation des cellules.



**Figure 2.15** Illustration du plan principal du problème de Chen avec demande variable

	M2	M3	M4	M1	M5	M6
P1	70	80	10			
P2	40	70	50			
P3	60	40	10			
P4	80	50	50			
P6	90	60				30
P7	10	0				
P5			400	200	300	100
P8			0	30	0	10
P9			0	0	70	60
P10			0	0	0	90

**Figure 2.16** Solution finale proposée du problème de Chen avec demande variable (temps opératoire en dehors des cellules = 150 UT)

	M2	M3	M4	M1	M5	M6
P1	70	80	10			
P2	40	70	50			
P3	60	40	10			
P4	80	50	50			
P6	90	60	0			30
P7	10	0	0			
P5			400	200	300	100
P8				30	0	10
P9				0	70	60
P10				0	0	90

**Figure 2.17** Solution finale du problème de Chen avec demande constante selon la figure 2.12 (temps opératoire en dehors des cellules = 430 UT)

En comparant les solutions des figures 2.16 et 2.17, nous constatons l'effet de l'hypothèse de variabilité de la demande des différents produits. En effet, nous remarquons que si nous prenons en considération cette hypothèse après la formation de cellules, le temps opératoire en dehors des cellules sera 430 UT et le nombre des EE est de 2. Par contre, si nous prenons en considération cette hypothèse avant la formation de cellules, la solution finale change et le temps opératoire en dehors des cellules sera en conséquence 150 UT et le nombre des EE est de 5. C'est au concepteur de choisir entre ces alternatives de conception.

## 5. Validation de l'approche proposée

### 5.1 Première étude comparative

Le tableau 2.4 résume quelques tests qui ont été réalisés en appliquant l'approche proposée sur des matrices d'incidence binaires reconnues en littérature de taille différente. La source de ces problèmes est indiquée dans la colonne de droite.

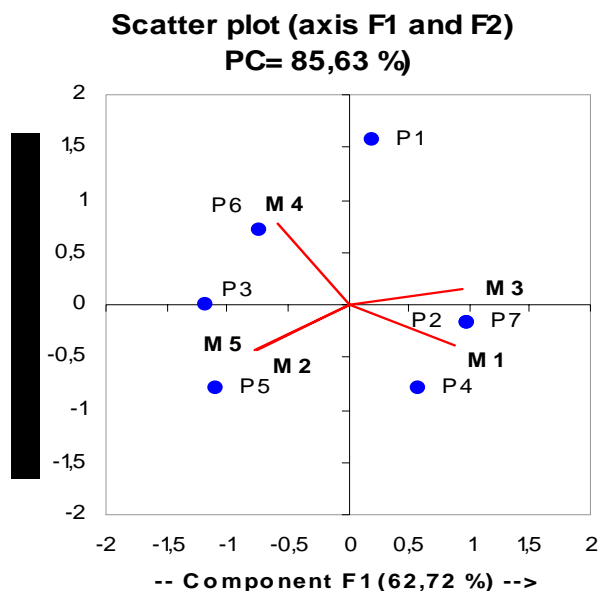
**Tableau 2.4** Les différents problèmes de validation

No.	Taille (m x p)	F	Référence
1	5 x 7	2	(Waghodekar et Sahu, 1984)
2	7 x 11	3	(Boctor, 1991)
3	8 x 20	3	(Chandrasekharan et Rajagopalan, 1986)
4	11 x 22	3	(Chan et Milner, 1982)
5	14 x 24	4	(King, 1980)
6	16 x 43	5	(King et Nakornchai, 1982) introduit initialement par Burbidge en 1973 comme une étude de cas industriel



**Problème 1 : exemple de problème de taille faible**

Les résultats de l'approche proposée pour le problème (5x7) sont présentés dans les figures 2.18, 2.19 et 2.20. Il est à noter que la solution de deuxième phase indique que les produits P1 et P4 sont des produits exponentiels



**Figure 2.18** Illustration du plan principal du problème (5 x 7)

	M2	M4	M5	M3	M1
P3	1	1	1		
P5	1	0	1		
P6	0	1	1		
P7				1	1
P2				1	1
P4			1	1	1
P1		1		1	

**Figure 2.19** Solution de deuxième phase du problème (5 x 7)

	M2	M4	M5	M3	M1
P3	1	1	1		
P5	1	0	1		
P6	0	1	1		
P1		1		1	0
P2				1	1
P4			1	1	1
P7				1	1

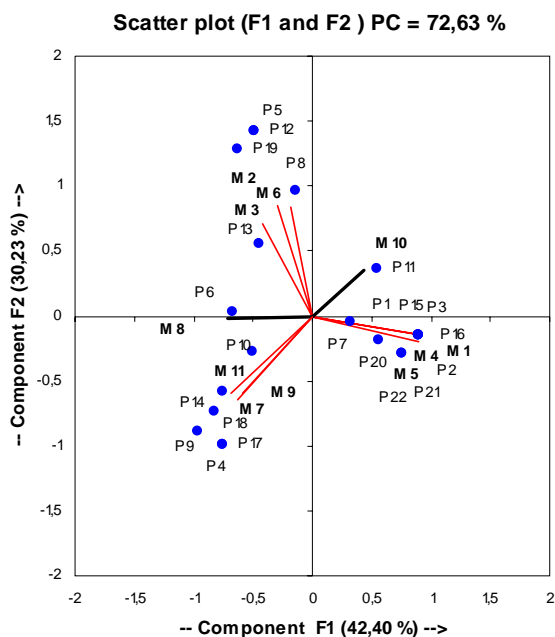
**Figure 2.20** Solution finale du problème (5 x 7)

**Problème 4 : exemple de problème de taille moyenne**

Le problème est donné dans la figure 2.21. Les résultats de l'approche proposée pour le problème (11x 22) sont présentés dans les figures 2.22, 2.23 et 2.24.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
P1	1			1	1					1	
P2	1			1	1					1	
P3	1			1	1					1	
P4							1		1		1
P5		1	1			1		1		1	
P6			1				1	1			
P7					1					1	
P8		1				1				1	
P9							1	1	1		1
P10								1			1
P11	1	1		1						1	
P12		1	1			1		1		1	
P13			1					1			
P14							1	1	1		
P15	1			1	1					1	
P16	1			1	1					1	
P17							1		1		1
P18							1	1	1	1	1
P19		1	1			1		1			
P20	1			1	1				1		
P21	1			1	1				1		
P22	1			1	1				1		

**Figure 2.21** La matrice d'incidence du problème (11 x 22)



**Figure 2.22** Illustration du plan principal du problème (11 x 22)

	M1	M4	M5	M2	M3	M6	M7	M9	M11	M8	M10
P1	1	1	1								1
P2	1	1	1								1
P3	1	1	1								1
P15	1	1	1								1
P16	1	1	1								1
P20	1	1	1							1	
P21	1	1	1								
P22	1	1	1								
P7	0	0	1								1
P5				1	1	1				1	1
P8				1	0	1					1
P12				1	1	1				1	1
P19				1	1	1				1	
P13				0	1	0				1	
P4							1	1	1		
P9							1	1	1	1	
P10							0	0	1	1	
P14							1	1	0	1	
P17							1	1	1		
P18							1	1	1	1	1
P11	1	1	0	1							1
P6					1		1	0	0	1	

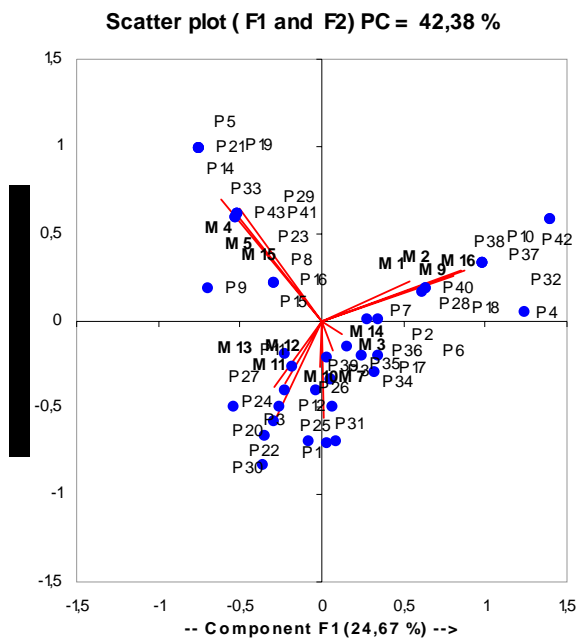
**Figure 2.23** Solution de deuxième phase du problème (11 x 22)

	M1	M4	M5	M10	M2	M3	M6	M7	M9	M11	M8
P1	1	1	1	1							
P2	1	1	1	1							
P3	1	1	1	1							
P15	1	1	1	1							
P16	1	1	1	1							
P20	1	1	1	0							1
P21	1	1	1	0							
P22	1	1	1	0							
P7	0	0	1	1							
P11	1	1	0	1							
P5				1	1	1	1				1
P8				1	1	0	1				
P12				1	1	1	1				1
P19					1	1	1				1
P13					0	1	0				1
P4								1	1	1	0
P9								1	1	1	1
P10								0	0	1	1
P14								1	1	0	1
P17								1	1	1	0
P18				1				1	1	1	1
P6					1			1	0	0	1

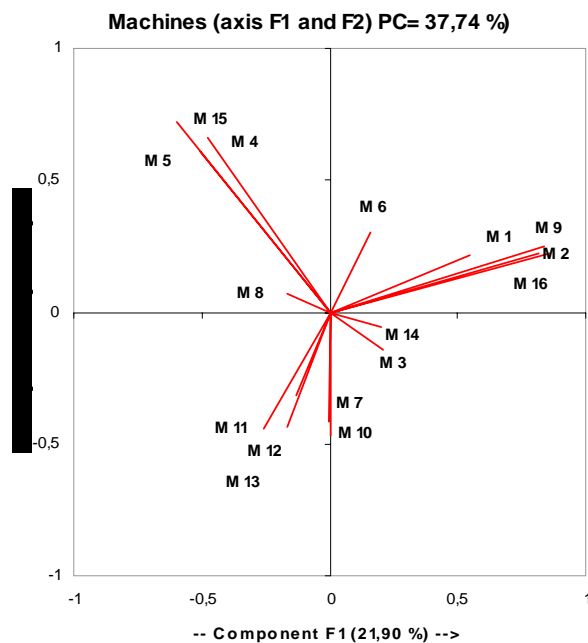
**Figure 2.24** Solution finale du problème (11 x 22)

**Problème 6 : exemple de problème de grande taille**

Le plan principal relatif au problème (16 x 43) est présenté dans la figure 2.25.a. L'analyse de ce plan est un peu délicate. C'est pourquoi, nous avons retiré les produits pour faciliter l'interprétation.



**Figure 2.25.a** Illustration du plan principal du problème (16 x 43)



**Figure 2.25.b** Illustration du plan principal du problème (16 x 43) pour les machines seulement.

Les résultats de la seconde étape de l'approche proposée pour le problème (16 x 43) sont présentés dans la figure 2.26. La solution finale du problème (16 x 43) est présentée dans la figure 2.27.

	M1	M2	M9	M16	M34	M11	M11	M11	M11	M11	M7	M4	M5	M15	M6	M8
P4	0	0	1	0											0	0
P10	0	0	1	1											0	0
P18	0	0	1	1											0	0
P28	0	1	1	0											0	1
P32	0	1	1	1											1	0
P37	1	1	1	1											1	1
P38	0	1	1	1											0	1
P40	0	1	1	0											1	0
P42	1	1	1	1											1	0
P34					1	0									1	0
P35					1	1									0	0
P36					1	0									0	0
P6					0	1									1	0
P17					1	1									1	0
P3							1	0	1						0	1
P11							0	1	0						0	1
P20							1	0	0						0	1
P22							0	1	0						0	0
P24							1	1	1						0	1
P27							1	1	0						0	1
P30							1	1	0						0	0
P13										1	1				1	0
P25										1	1				0	0
P1										1	1				1	1
P12										1	0				1	1
P26										1	0				0	0
P39										1	0				1	0
P31										1	0				0	1
P5												1	1	1	1	0
P14												1	1	1	1	0
P19												1	1	1	1	1
P21												1	1	1	0	1
P23												1	1	0	1	1
P9												1	1	0	0	1
P29												1	1	0	0	0
P43												0	1	1	1	1
P41												0	1	1	0	1
P8												0	1	0	1	1
P15												0	0	0	1	1
P16												0	1	0	0	0
P31												0	0	0	0	1
P33												0	1	1	1	0
P3														1	1	0
P11														1	0	1
P20														1	1	0
P22														0	1	0
P24														1	1	1
P27														1	1	0
P30														1	1	0
P34													1			1
P35																1
P36																1
P6													1			0
P7													1			1
P17													1			1
P13													1			1
P25																1
P1														1	1	1
P12														1	1	0
P26																1
P39																1
P2		1	1	1		1										1
P7				1	1											0
P9						1					1	1				0

Figure 2.26 Solution de deuxième phase du problème (16 x 43)

	M1	M2	M9	M16	M4	M5	M15	M6	M8	M11	M11	M11	M3	M14	M10	M7
P2	0	1	1	1					1	1						1
P4	0	0	1	0												
P10	0	1	1	1												
P18	0	0	1	1												
P28	0	1	1	0					1							
P32	0	1	1	1					1							
P37	1	1	1	1					1	1						
P38	0	1	1	1					1							
P40	0	1	1	0					1							
P42	1	1	1	1					1							
P5					1	1	1	0	0							
P14					1	1	1	1	0							
P19					1	1	1	1	1							
P21					1	1	1	0	1							
P23					1	1	0	1	1							
P9					1	1	0	0	1	1						
P29					1	1	0	0	0							
P43					0	1	1	1	1							
P41					0	1	1	0	1							
P8					0	1	0	1	1							
P15					0	0	0	1	1							
P16					0	1	0	0	0							
P31					0	0	0	0	1							1
P33					0	1	1	1	0							
P3									1	1	0	1				
P11									1	0	1	0				
P20									1	1	0	0				
P22										0	1	0				
P24										1	1	1				
P27										1	1	1	0			
P30										1	1	0				
P34									1					1	0	
P35														1	1	
P36														1	0	
P6									1					0	1	
P7				1					1					1	0	
P17									1					1	1	
P13									1							1
P25																1
P1										1	1					1
P12										1	1					0
P26																0
P39										1						0

Figure 2.27 Solution finale du problème (16 x 43)

Afin d'évaluer l'approche proposée et de la comparer avec les autres méthodes. Les résultats obtenus sont évalués en se basant sur des indicateurs de performance que nous avons présentés au début de ce chapitre. Le tableau 2.5 présente les résultats de l'approche proposée ainsi que les meilleurs résultats connus dans les articles récents qui ont proposé des méthodes plus efficaces que les méthodes connues de formation de cellules comme ROC, DCA, BEA, GRAFICS, n-centre, ART1, etc.

**Tableau 2.5** Les résultats de l'approche proposée pour la FC

No.	Taille	F	Les résultats de l'approche proposée			Les meilleurs résultats connus à ce jour			
			PEE	TUM	EG <sub>1</sub>	PEE	TUM	EG <sub>1</sub>	Référence du résultat
1	5 x 7	2	12.50	82.35	85.61	12.5	82.35	85.61	(Wang, 2003)
2	7 x 11	3	09.52	76.00	86.10	09.52	76.00	86.10	(Stawowy, 2006)
3	8 x 20	3	14.80	100.00	95.80	14.80	100.00	95.80	(Albadawi et al. 2005)
4	11 x 22	3	14.10	80.72	86.90	14.10	80.72	86.90	(Cheng et al. 2001)
5	14 x 24	4	03.28	68.60	83.90	03.30	68.60	83.60	(Wang, 2003)
6	16 x 43	5	22.22	63.22	79.00	23.01	64.23	79.40	(Chan, F.T.S et al. 2006)

En examinant les résultats du tableau 2.5, nous pouvons conclure que l'approche proposée donne les mêmes résultats que des approches récentes proposées dans la littérature. Nous constatons que l'approche proposée est valable, simple à appliquer et ne requiert pas un temps de résolution élevée.

### 5.2 Deuxième étude comparative

Ces vingt dernières années, l'utilisation des métaheuristiques pour la formation des cellules de production a suscité un intérêt grandissant de chercheurs. Les modèles utilisés, leur principe inspiré de la nature, leur capacité à prendre en compte un large spectre de contraintes, la raisonnable complexité des algorithmes mis en œuvre et les performances atteintes ont indubitablement contribué à leur succès.

C'est pourquoi nous avons choisi de comparer l'approche proposée avec les approches basées sur les métaheuristiques. La comparaison concerne en particulier la technique de recuit simulé (Boctor, 1991) et la technique de la recherche Tabou (Adenso-Diaz et al, 2005). Ce choix est justifié, d'une part, par ce que F. Boctor a proposé dix problèmes de même taille (30 produits et 16 machines), indiqués dans la figure 2.28, avec leurs solutions optimales. Ceci pour mesurer l'efficacité de la technique du recuit simulé. D'autre part, (Adenso-Diaz et al, 2005) ont repris les mêmes problèmes avec la technique de recherche Tabou.



Problème 4

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
P1	1				1		1			1						
P2		1		1			1				1					
P3			1					1				1				
P4				1		1							1			
P5					1						1				1	
P6	1			1			1			1						1
P7	1										1					
P8					1							1		1		
P9					1								1			
P10					1		1			1						
P11					1										1	
P12						1						1		1	1	
P13		1						1					1			
P14							1							1		1
P15															1	1
P16	1			1		1							1			1
P17				1			1						1			
P18		1						1						1	1	1
P19	1				1	1						1				
P20																1
P21					1						1				1	
P22				1								1				1
P23						1	1			1			1			
P24	1					1								1		
P25			1								1			1	1	
P26		1								1			1		1	1
P27	1	1				1						1				
P28			1			1			1				1			
P29	1	1		1	1	1				1						
P30							1					1		1		

Solution du problème 4

	M2	M4	M8	M10	M11	M13	M14	M15	M16	M1	M3	M5	M6	M7	M9	M12	
P2	1	1	0	0	1	0	0	0	0						1		
P5	0	0	0	0	1	0	0	1	1								
P7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1							
P8	0	0	0	0	1	1	0	1	0								
P9	1	1	0	1	0	0	0	0	0								
P13	1	0	1	0	1	0	0	0	0								
P14	1	0	0	0	0	1	0	0	1					1			
P15	0	0	0	0	0	0	1	0	0								
P18	1	1	1	0	1	0	1	1	1								
P20	0	0	0	0	0	0	0	1	0								
P21	1	0	0	1	0	0	1	0	0								
P22	1	0	0	1	0	0	0	1	0								
P25	0	0	0	0	1	0	1	1	0						1		
P26	1	0	0	1	0	1	0	1	1								
P27	1									1	0	0	0	1	0	0	
P1											1	1	1	1	0	1	0
P3											0	0	0	0	1	0	1
P4											0	1	1	1	0	0	1
P6											1	1	1	0	1	1	0
P10											0	0	0	1	1	1	0
P11											0	1	1	1	0	0	0
P12											0	0	0	1	0	0	1
P16											1	1	1	0	1	0	1
P17											0	1	0	0	1	0	1
P19											1	0	1	1	0	0	0
P23											0	0	1	1	0	1	1
P24											1	0	1	0	0	0	1
P28											1	1	0	1	0	1	1
P29											1	1	1	1	1	0	0
P30											0	0	0	0	1	1	1

Problème 5

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
P1					1					1				1		
P2						1								1	1	
P3			1					1	1				1	1	1	
P4				1						1	1					
P5			1	1									1			
P6														1		1
P7			1	1						1				1		
P8					1						1	1				
P9			1							1						
P10					1	1								1	1	1
P11			1	1				1	1					1	1	1
P12						1								1	1	1
P13					1									1		1
P14			1	1					1	1						
P15						1									1	
P16		1														1
P17	1				1		1									
P18	1	1			1	1										
P19			1												1	
P20														1	1	1
P21						1								1	1	1
P22						1								1	1	1
P23							1							1	1	1
P24	1													1	1	1
P25	1	1			1				1							1
P26		1													1	1
P27														1		1
P28	1	1												1	1	1
P29								1						1	1	1
P30										1	1	1		1	1	1

Solution du problème 5

	M3	M12	M4	M8	M3	M14	M16	M6	M13	M11	M5	M10	M2	M1	M15	M7	
P7	1	1	1	0	1												
P5	1	1	1	1	1												
P11	1	1	1	1	1												
P3	1	1	0	1	1												
P14	1	1	1	1	1												
P9	1	1	0	0	1												
P29						1	1	0	0								
P27							0	1	0	1							
P10							1	1	1	1					1		
P21							1	1	1	1							
P23							0	1	1	1							
P22							1	1	1	0							
P20							1	1	0	1							
P13							0	1	1	1							
P2							1	0	1	1							
P6							0	1	0	1							
P12							1	1	1	1							
P15							1	0	0	0						1	
P19							1	0	1	1							
P1											0	1	1	0	0	0	0
P4											1	1	1	0	0	0	0
P8											1	1	1	0	0	0	0
P25											0	1	0	1	1	1	1
P24											0	0	0	0	1	1	1
P28											0	0	0	1	1	1	1
P17											0	1	0	0	1	1	1
P26											0	0	0	1	0	1	1
P18											0	0	0	1	1	0	1
P16											0	0	0	1	0	1	0
P30											1	1	1	0	0	0	0

Problème 6

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
P1						1				1						
P2							1							1	1	
P3						1								1		
P4	1												1			
P5	1	1				1		1	1				1			
P6	1					1		1	1							
P7													1	1		
P8				1			1	1			1					
P9				1			1	1								
P10				1												
P11	1													1		
P12														1		
P13	1													1		
P14																

Problème 7

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
P1	1		1	1	1		1			1		1		1		
P2		1						1								
P3		1			1	1								1	1	
P4							1				1					
P5		1						1			1					1
P6	1			1			1			1				1		
P7	1				1	1			1		1					
P8	1			1			1				1					
P9			1	1	1			1						1		
P10		1														1
P11																1
P12						1					1	1				
P13	1		1							1				1		
P14	1				1	1				1				1	1	
P15	1		1							1						
P16	1	1			1	1			1					1		
P17			1		1	1			1					1		
P18					1	1				1	1					
P19										1	1					
P20				1	1											1
P21				1					1							1
P22						1					1					
P23		1												1	1	
P24		1												1	1	
P25									1					1	1	
P26				1										1	1	
P27		1												1	1	
P28				1												
P29		1						1						1	1	
P30		1												1	1	

Solution du problème 7

	M10	M3	M13	M6	M1	M5	M8	M15	M9	M4	M2	M16	M14	M7	M11	M12	
P7	1	0	1	1	1	1	1										
P1	1	1	1	1	1	1	1										
P17	1	1	1	1	0	1	1										
P16	1	0	1	1	1	1	1										
P9	1	1	1	1	0	1	1				1						
P13	1	1	1	1	1	0	0										
P6	1	0	1	0	1	1	1										
P14	1	0	1	1	1	1	1								1		
P8	0	1	1	0	1	1	1										
P15	1	1	0	0	1	0	1										
P2	0	0	0	1	0	1	1										
P11								0	0	0	0	0	1	0			
P28								0	1	1	0	0	0	0			
P30								0	0	0	1	1	1	1			
P20								1	1	1	0	0	0	0			
P29								0	0	0	1	1	1	1			
P24								0	0	0	1	1	1	1			
P3								1	0	0	1	0	1	0			
P26								1	0	1	0	1	0	0			
P10								0	0	0	1	1	1	0			
P23								0	0	0	1	1	1	1			
P21								1	1	1	0	0	0	0			
P27								1	0	1	1	0	1	0			
P25								1	1	0	0	0	0	1			
P5								0	0	0	1	1	0	0			
P18															1	1	1
P19															1	1	1
P4															1	1	0
P12															1	1	1
P22															1	1	0

Problème 8

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
P1				1			1	1								
P2	1		1													
P3												1		1		
P4							1			1						
P5						1				1						
P6		1			1							1		1		1
P7						1		1								
P8	1		1							1						1
P9				1												
P10					1							1		1	1	
P11				1		1		1	1	1						
P12				1		1						1		1		
P13	1			1							1					
P14	1									1						1
P15	1			1							1					1
P16	1										1			1		1
P17	1		1									1		1		1
P18	1										1			1		1
P19	1				1							1		1		1
P20	1									1		1				1
P21		1				1		1								
P22					1		1					1		1		
P23					1			1						1		
P24		1				1						1				
P25		1			1	1								1	1	
P26		1					1					1				
P27		1			1		1							1		
P28	1		1							1						1
P29	1		1		1					1				1		1
P30	1		1							1				1		1

Solution du problème 8

	M4	M6	M8	M10	M1	M3	M9	M11	M13	M15	M16	M2	M5	M7	M12	M14	
P1	1	1	1	0									1				
P4	0	0	1	1													
P5	0	1	0	1												1	
P9	1	0	0	1													
P11	1	1	1	1							1						
P13	1	1	0	1													
P2					1	1	0	0	0	0	0	0	0				
P6					1	1	1	0	0	0	0	1					
P14					1	0	1	1	0	1	1	1					
P15					1	1	0	1	0	0	0	1					
P16					1	0	0	1	1	0	1	0					
P17					1	1	0	0	0	1	1	1					
P18					0	1	0	1	1	0	1	0				1	
P19					1	1	0	1	1	1	0	0					
P20					1	0	1	1	0	0	1	1					
P28					1	1	0	1	0	0	1	1					
P29					1	1	1	0	1	1	0	1				1	
P30					1	1	1	0	0	0	0	1				1	
P3													0	0	0	1	1
P6													1	1	0	1	1
P7													0	0	0	0	0
P10													0	0	1	1	1
P12													0	1	1	1	1
P21													1	1	1	0	0
P22													0	1	1	1	1
P23													0	1	0	0	1
P24													1	0	1	1	0
P25													1	1	0	1	1
P26													1	0	1	1	0
P27													1	1	1	0	1

Problème 9

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
P1											1		1			
P2		1													1	
P3		1	1									1	1		1	
P4		1	1									1	1			1
P5			1													
P6				1												
P7				1												
P8				1												
P9	1							1			1					1
P10				1								1	1		1	
P11																



Problème 10

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
P1																
P2		1								1						
P3				1	1								1			1
P4					1								1			1
P5	1	1														
P6								1								
P7				1			1					1			1	1
P8	1									1				1		1
P9		1							1				1			
P10	1				1				1				1			
P11			1		1		1	1				1				1
P12	1		1	1	1				1	1	1					
P13		1	1	1	1							1				1
P14			1				1									1
P15		1		1	1				1		1	1	1			
P16				1		1	1	1	1	1	1					1
P17		1										1				1
P18			1					1				1				
P19															1	1
P20	1	1												1		1
P21		1				1					1					
P22	1	1	1	1	1			1								
P23	1			1		1						1	1			1
P24								1		1						1
P25		1						1				1	1			1
P26	1	1			1								1			1
P27		1				1						1				1
P28						1			1							1
P29	1				1								1			1
P30			1		1			1		1						1

Solution du problème 10

	M2	M5	M13	M14	M16	M1	M3	M11	M3	M4	M5	M7	M8	M10	M12	M15
P2	1	0	0	0	0	0	1	0								
P8	0	0	0	1	1	1	0	1								
P9	1	0	1	0	0	0	1	1								
P22	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1					
P24	0	0	0	0	1	0	1	1								
P28	0	1	0	0	1	0	1	1								
P30	0	1	0	0	1	0	1	1								
P5	1	0	0	0	0	0	1	0	0							
P10	0	1	1	0	0	1	1	0								
P12	0	0	0	0	0	1	1	1		1	1			1		
P17	1	0	1	0	1	0	0	0								
P20	1	0	0	1	1	1	0	0								
P21	1	1	0	0	0	0	0	0								1
P23	0	1	1	1	1	1	0	0		1						
P25	1	0	1	1	1	0	1	0								
P26	1	1	1	0	1	1	0	0								
P27	1	1	1	0	1	0	0	0								
P29	0	1	1	0	1	1	0	0								
P1									0	0	0	0	1	1	1	1
P3									0	1	1	0	0	0	0	1
P4									0	0	1	0	0	0	0	1
P6									0	0	0	0	1	0	0	0
P7									0	1	0	1	0	0	0	1
P13									1	1	1	0	0	0	0	1
P11									1	0	1	1	1	0	0	1
P14									0	1	0	1	0	0	0	1
P15									1	0	1	1	0	1	1	0
P16									0	0	1	1	1	1	1	1
P18									1	0	0	0	1	0	1	0
P19									0	0	0	0	0	0	0	1

Figure 2.28 Les solutions trouvées pour les dix problèmes de (Boctor, 1991)

5.2.1 Etude comparative avec la méthode de Recuit Simulé

Pour la première étude comparative, nous avons limité la comparaison aux pourcentages des éléments exceptionnels (PEE). En effet, Boctor (1991) a présenté seulement les NEE de chaque problème.

Tableau 2.6 Tableau comparatif avec la méthode de Recuit Simulé

N° Problèmes	F	Approche proposée			Recuit simulé (Boctor, 1991)			Solution Optimale (Boctor, 1991)		
		UE	NEE	PEE	UE	NEE	PEE	UE	NEE	PEE
1	3	108	8	<b>7,4</b>	108	14	<b>13,0</b>	108	8	7,4
2	3	106	6	5,7	106	6	5,7	106	6	5,7
3	4	92	8	8,7	92	NA	NA	92	NA	NA
4	2	111	13	11,7	111	13	11,7	111	13	11,7
5	3	107	9	8,4	107	9	8,4	107	8	7,5
6	3	101	6	<b>5,9</b>	101	8	<b>7,9</b>	101	6	5,9
7	3	113	5	4,4	113	5	4,4	113	5	4,4
8	3	114	<b>13</b>	<b>11,4</b>	114	<b>14</b>	<b>12,3</b>	114	<b>14</b>	<b>12,3</b>
9	3	118	12	10,2	118	12	10,2	118	12	10,2
10	2	121	11	9,1	121	11	9,1	121	11	9,1

Avec F : le nombre de cellules à former

Pour les problèmes 1, 2, 4, 6, 7, 9 et 10, nous avons retrouvé la solution optimale. En d'autre terme l'approche proposée fournit la solution optimale dans 77,8 %. Par contre, la méthode du recuit simulé atteint la solution optimale seulement dans 66,7 % (problèmes 2,

4, 7, 8, 9, 10). Pour les problèmes 1, 6 et 8, l'approche proposée a fourni un meilleur résultat que la méthode de recuit simulé, et pour le problème 8 nous avons obtenu une solution meilleure que celle proposée par Boctor comme la solution optimale. Ceci met en question la méthode utilisée pour déterminer la solution optimale.

### 5.2.2 Etude comparative avec la méthode de Recherche Tabou

Pour la deuxième étude comparative, nous avons limité la comparaison aux pourcentages des éléments exceptionnels (PEE) et à l'efficacité de groupement (EG<sub>2</sub>).

Pour les problèmes 1, 2, 5 et 8, l'application de l'ACP a fourni un meilleur résultat que la méthode de Recherche Tabou en terme de pourcentage d'éléments exceptionnels. En effet pour ces problèmes, nous avons trouvé respectivement 7,4 ; 5,7 ; 8,4 et 9,6 de pourcentage d'éléments exceptionnels par contre (Adenso-Diaz et al, 2005) a trouvé respectivement 9,3 ; 9,4 ; 10,3 et 13,2 de pourcentage d'éléments exceptionnels. Pour les problèmes 3, 4, 6, 7 et 9, l'approche proposée et la technique de recherche Tabou ont donnée les mêmes résultats. Seulement pour le problème 9, l'approche proposée a fournit un PEE plus élevé que (Adenso-Diaz et al, 2005).

**Tableau 2.7** Tableau comparatif avec la méthode de Recherche Tabou

N° problèmes	F	Approche proposée					Recherche Tabou (Adenso Diaz et al. 2005)				
		UE	NVE	NEE	PEE	EG <sub>2</sub>	UE	NVE	NEE	PEE	EG <sub>2</sub>
<b>1</b>	3	108	55	8	<b>7,4</b>	61	108	54	10	<b>9,3</b>	60
<b>2</b>	3	106	67	6	<b>5,7</b>	57	106	64	10	<b>9,4</b>	56
<b>3</b>	4	92	30	8	8,7	69	92	27	8	8,7	71
<b>4</b>	2	111	143	13	11,7	39	111	143	13	11,7	39
<b>5</b>	3	107	61	9	<b>8,4</b>	58	107	56	11	<b>10,3</b>	59
<b>6</b>	3	101	69	6	5,9	56	101	68	6	5,9	56
<b>7</b>	3	113	68	5	4,4	60	113	68	5	4,4	60
<b>8</b>	3	114	67	13	11,4	55,8	114	54	15	13,2	59
<b>9</b>	3	118	54	12	10,2	62	118	56	12	10,2	61
<b>10</b>	2	121	130	11	9,1	44	121	133	10	8,3	44

En faisant la comparaison à l'aide de l'indicateur de l'efficacité de groupement, l'approche proposée a fournit un meilleur résultat que la méthode de Recherche Tabou pour les problèmes 1, 2, et 9. En effet pour ces problèmes, nous avons trouvé respectivement 61, 57 et 62 de EG<sub>2</sub> par contre (Adenso-Diaz et al, 2005) a trouvé respectivement 60, 56 et 61 de EG<sub>2</sub>. Pour les problèmes 3, 5 et 8, la technique de

recherche Tabou donne des meilleures efficacités de groupement que l'approche proposée. Pour les autres problèmes (4, 6, 7 et 10) nous avons retrouvé les mêmes performances.

## 6. Conclusion

L'approche proposée présente plusieurs points forts. L'avantage réside dans la simplicité, la rapidité de résolution et la considération du nombre de cellules à former (F) comme une variable dépendante ou indépendante. En plus, elle est accessible gratuitement pour les industriels à travers la disponibilité de plusieurs logiciels d'analyses de données dans le marché comme SPSS, SPAD, S+, XLSTAT, etc. pour la formation et la configuration des différentes cellules formées.

Durant ce second chapitre, nous avons constaté pour n'importe quelle méthode utilisée, qu'il est rare de trouver des cellules complètement indépendantes. C'est-à-dire, il est très fréquent de trouver des éléments exceptionnels (EE) dans la solution finale. La majorité de la littérature spécifique à la conception des cellules de production suggère que le traitement des EE est indispensable pour atteindre les avantages de la TG. Pour cela, plusieurs scénarios de traitement sont ainsi proposés : la duplication des machines exceptionnelles, la modification du routage des produits exceptionnels, la sous-traitance des produits exceptionnels, etc. Tous ces scénarios exigent un changement dans la structure du système cellulaire, sauf la modification du routage des produits exceptionnels. Cette dernière est possible si par hypothèse il existe au départ, plusieurs gammes possibles pour chaque produit. Dans ce cas, le problème serait donc comment sélectionner la meilleure gamme pour chaque produit qui permet d'éliminer les EE dans la solution finale. Ceci nous amène à une autre problématique reconnue en littérature par le problème de formation de cellules avec gammes alternatives que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

## Chapitre 3

# EXTENSION POUR LA FORMATION DES CELLULES AVEC GAMMES ALTERNATIVES

### 1. Introduction

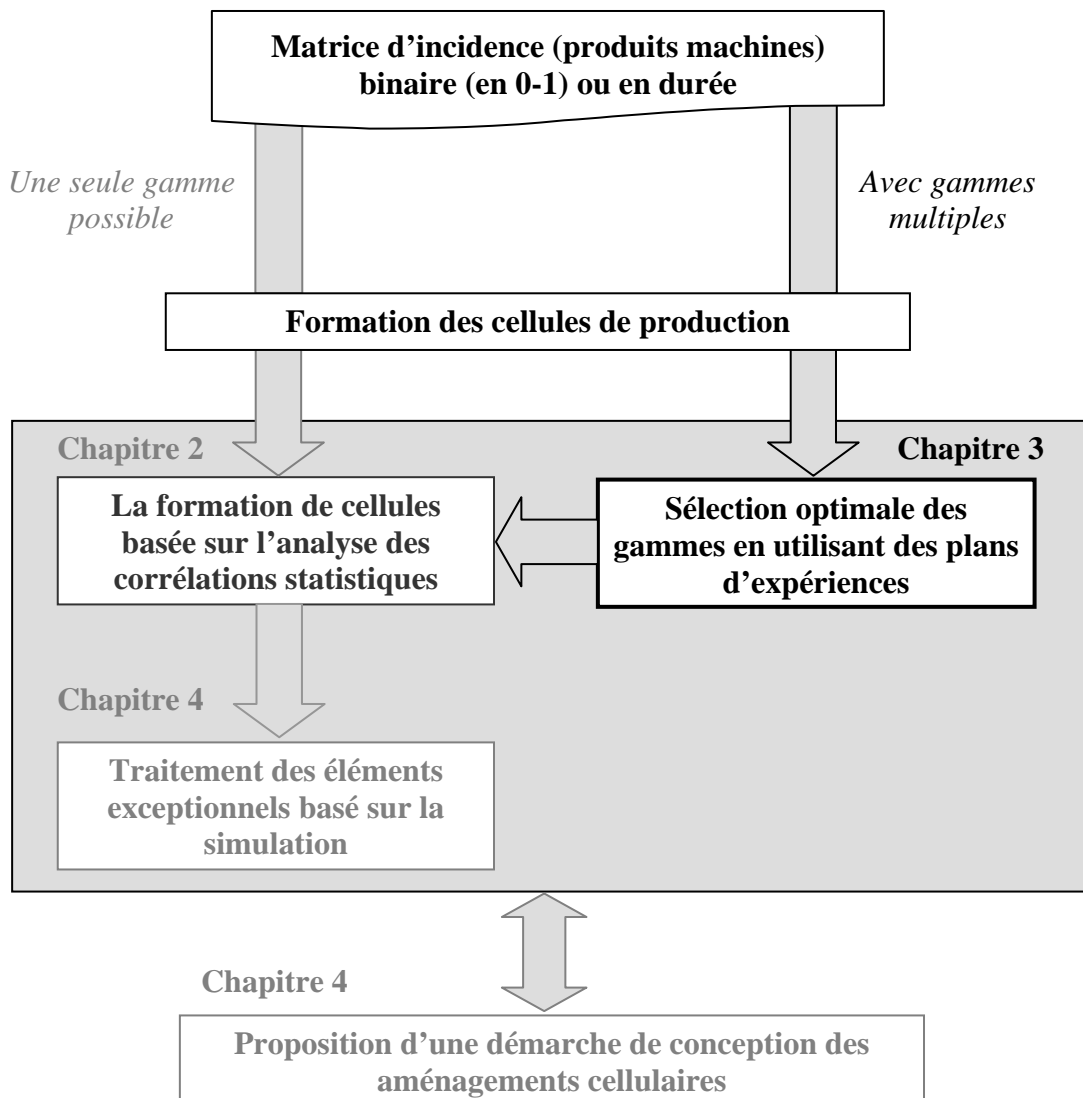
Comme nous l'avons déjà signalé, la formation des cellules de production se traduit par le groupement des produits en familles et le partage des machines en sous groupes. Le traitement de ce problème devient plus complexe en présence de gammes alternatives, c'est à dire lorsqu'il existe plusieurs scénarios de fabrication possibles pour un même produit. Le choix des gammes va influencer certainement les performances des cellules formées.

L'approche que nous proposons ici porte sur le choix de la gamme optimale pour chaque produit qui engendre une meilleure mise en cellules, en se basant sur la technique des plans d'expériences (Hachicha et al. 2008b, 2008c). Ce qui nous a permis d'introduire une analyse de sensibilité de la solution optimale selon les différentes gammes possibles. Ceci nous amène à la première catégorie des problèmes de formation de cellules présentées dans les deux chapitres précédents comme l'indique la figure 3.1.

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans une première partie, un état de l'art spécifique aux méthodes de formation de cellules avec gammes alternatives. L'objectif de la seconde partie est de faire une présentation succincte de la méthode des plans d'expériences (plan factoriel, plan fractionnaire, méthode Taguchi) afin de pouvoir présenter leur mise en œuvre dans le cadre de la formation de cellules. Afin de valider l'approche proposée, quelques problèmes reconnus en littérature ont été résolus et comparés avec les résultats antérieurs.

## 2. Etat de l'art

De nombreux auteurs proposent différentes approches pour la résolution du problème de FC avec gammes alternatives depuis Kusiak (Kusiak, 1987) qui a proposé le terme « Technologie de Groupe généralisée » pour ce type de problèmes.



**Figure 3.1** Place du troisième chapitre dans les travaux de thèse

Ces approches peuvent être classées en trois catégories principales comme l'indique (Adenso-Diaz et al, 2001) : méthodes séquentielles, méthodes itératives et méthodes simultanées. Dans (Gupta, 1993) et (Ho et Moodie, 1996), les auteurs ont proposé des méthodes de la première catégorie en deux étapes. Pendant la première étape, une gamme est déterminée définitivement pour chaque produit en respectant les contraintes de capacité des machines. Dans cette étape les produits seront groupés en familles selon les gammes choisies. Dans la deuxième étape, les machines seront affectées aux familles de

produits ainsi obtenus. L'inconvénient de cette méthode réside dans son caractère purement séquentiel. La sélection des gammes n'est améliorée qu'une fois au début du traitement et la flexibilité donnée par les gammes alternatives n'est plus utilisée pour réduire le trafic intercellulaire. En plus, une fois la solution optimale trouvée, les données des différentes gammes possibles ne seront pas exploitables ultérieurement.

(Nagi et al, 1990) proposent une méthode itérative résolvant deux sous problèmes distincts : le sous problème de la FC à l'aide d'une heuristique et le sous problème concernant la sélection des gammes par l'algorithme du Simplex. Cette méthode est limitée par l'utilisation de la méthode du Simplex car le nombre de contraintes devient très important quand la taille des problèmes augmente. De plus, l'utilisation d'une heuristique ne garantit pas la convergence vers un optimum global. (Rajamani et al .1990) ont proposé trois programmes linéaires en nombres entiers pour la résolution simultanée du problème de FC avec gammes alternatives. D'autres auteurs tels que (Kusiak, 1987, Caux et al, 2000; Adenso-Diaz et al, 2001; Vin et al, 2003 et Chan, F.T.S et al, 2006) ont proposé aussi des méthodes de résolution simultanée pour la FC en présence de gammes alternatives. Diverses techniques sont ainsi proposées, (Kusiak, 1987) a généralisé le programme n-centre pour former simultanément les cellules en choisissant pour chaque produit la gamme qui donne la meilleure mise en cellules. (Caux et al, 2000) ont combiné une approche basée sur la technique du recuit simulé et sur l'algorithme de Séparation et Evaluation «*branch-and-bound*» pour améliorer simultanément la sélection des gammes et la minimisation du flux intercellulaire.

Dans la dernière décennie, la tendance des chercheurs s'est orientée vers le développement des méthodes mathématiques exactes ou approchées pour résoudre le problème de FC avec gammes alternatives. Pour les méthodes exactes (Won, 2000), (Malkooti et al. 2004), (Defersha et Chen, 2006), (Subramaniam et al. 2006) et (Jabalamei et Arkat, 2008) ont proposé des méthodes basées sur la programmation linéaire. Pour les méthodes approchées et plus particulièrement les métaheuristiques (Adenso-Diaz et al, 2001) et (Wu et al. 2004) ont proposé des algorithmes basés sur la technique de type recherche Tabou, (Zhao et Wu, 2000), (Uddin et Shanker, 2002), (Vin et al.2005), (Chan, F.T.S et al. 2006), (Nsakanda et al. 2006) et (Pattanaik, et al. 2007) ont proposé divers algorithmes génétiques et enfin, (Caux et al. 2000), (Wu et al. 2008) ont utilisé la technique du recuit simulé pour résoudre ce problème. (Mukattash, et al. 2002) ont proposé des heuristiques pour la formation des cellules sans ou avec gammes alternatives.

Comme indiqué par les auteurs eux-mêmes, les différentes méthodes itératives ou simultanées, ne sont pas pratiques pour résoudre des problèmes de FC de grandes tailles. Nous suggérons pour résoudre, d'une manière efficace, ce type de problème une approche séquentielle modifiée comme recommandé par (Gangan et al.1987), (Hwang et Ree 1996), (Kazerooni et al. 1997), (Kizil et Ozbayrak, 2004), etc. Dans cette catégorie d'approches non indiquée par (Adenso-Diaz et al, 2001), le problème de FC avec gammes alternatives est subdivisé en deux sous problèmes en cascade. Le premier sous problème porte sur le choix pour chaque produit une gamme préférentielle qui assure une meilleure mise en cellules ultérieurement. Le second sous problème consiste à appliquer l'une des méthodes classiques (chaque produit possède une seule gamme) de FC.

Dans ces travaux de thèse, nous avons proposé, pour la première fois en littérature, d'utiliser la méthode d'optimisation basée sur les plans d'expériences pour résoudre le premier sous problème. Nous allons décrire brièvement dans la section suivante le principe, la démarche et quelques notions relatives aux méthodes des plans d'expériences.

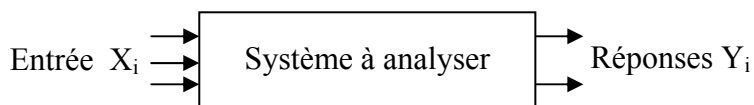
### **3. La méthode des plans d'expérience**

La méthode des plans d'expérience propose une approche expérimentale pour étudier le comportement d'un système considéré comme une « boîte noire » et en déduire un modèle empirique approximatif à défaut d'un modèle formel plus précis. Ils ont été formalisés par le statisticien Fisher (Box et al. 1978) puis développés et adaptés ensuite par Taguchi au domaine de la qualité (Taguchi, 1987). Leur première utilisation concernait le domaine agronomique. Ils ont été ensuite appliqués dans une multitude de domaines : la gestion de la qualité comme (Montgomery, 1991), (Montgomery, 1997), (Pillet, 1994), etc. Le choix optimale des paramètres des procédés technologiques telque le procédé de soudage, les procédés chimiques, etc. (Macodiyo et Soyama, 2006), (Hou et al. 2007). L'évaluation des performances par simulation (Law et Kelton, 2000), (Tsai, 2002), etc.

#### **3.1 Généralités**

Les plans d'expériences permettent d'organiser, de planifier et d'optimiser la réalisation d'expériences dans un domaine quelconque. Ils répondent au besoin de comprendre et de modéliser un système considéré, comportant des entrées, appelées facteurs, notées  $X_i$  sur la figure 3.2 et des sorties, appelées réponses, notées  $Y_i$ . En l'absence de méthode structurée, l'approche empirique et intuitive consiste à faire varier un seul facteur à la fois.

Cette méthode est simple mais inefficace car elle suppose que les effets des facteurs sur la réponse sont indépendants, ce qui est très rare dans la pratique.



**Figure 3.2** Système étudié « Boîte noire »

Dans le contexte des plans d'expériences, il est nécessaire que la réponse s'exprime de manière quantitative et que les facteurs soient des grandeurs contrôlables. En outre, un facteur est de type quantitatif ou qualitatif, dans ce dernier cas, il doit être discrétisé pour être exploitable.

Trois types de problématique sont abordés par les plans d'expériences (Pillet, 1994) :

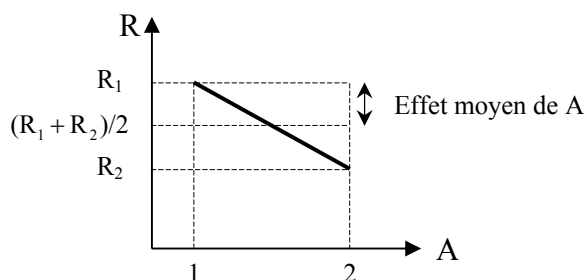
- **Quantification ou évaluation** : le but est de quantifier et hiérarchiser l'influence des facteurs. La question de la signification des effets peut également être prise en compte par les plans d'expériences. Il s'agit alors de décider si les variations de la réponse sont dues aux variations des facteurs ou à des fluctuations aléatoires provoquées par la variabilité naturelle des facteurs. L'analyse de la variance et les tests statistiques sont utilisés pour répondre à ce type de question ;
- **Optimisation** : elle vise à ajuster un modèle de régression qui permet de prédire le comportement du système. Ce modèle est dans le cas le plus courant un modèle linéaire du premier ordre. La recherche d'un réglage optimal des facteurs est alors possible ;
- **Robustesse** : l'objectif vise à rendre la réponse insensible aux perturbations « bruits ». La particularité de cette approche développée par Taguchi consiste à prendre en compte non seulement le comportement moyen du système mais aussi la variabilité de celui-ci.

### 3.2 Vocabulaire

Trois termes propres au vocabulaire des plans d'expériences sont développés ci-dessous :

- **Niveaux** : ce sont les valeurs possibles d'un facteur ;
- **Effet** : d'un facteur A sur une réponse R, est la variation de R en fonction des niveaux du facteur A. Soit, par exemple, un facteur A à deux niveaux notés 1 et 2, l'effet de ce facteur sur la réponse notée R est représenté en figure 3.3;

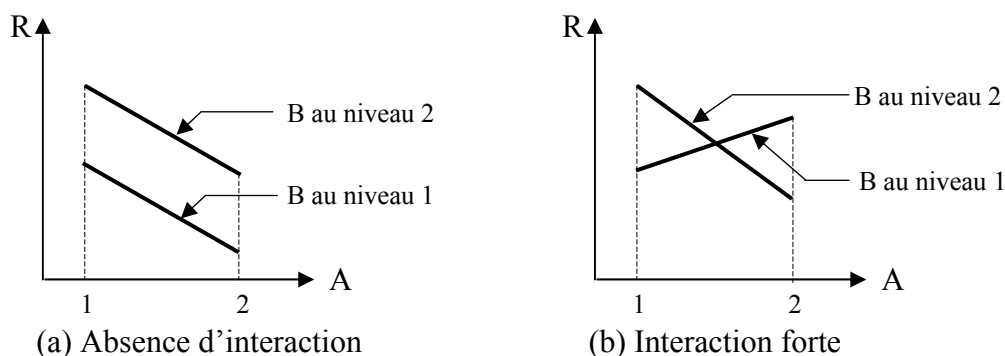




**Figure 3.3** Graphe des effets du facteur A

L'effet de A au niveau  $i$ , noté par  $E_{Ai}$  est par définition la différence entre la moyenne des réponses lorsque A est au niveau  $i$  et la moyenne générale des réponses.

- **Interaction** : deux facteurs A et B sont en interaction si l'effet de A dépend du niveau de B. A titre d'exemple, l'ajout d'un catalyseur dans une réaction chimique représente une interaction qui engendre un effet additif. La figure 3.4 représente graphiquement une interaction entre deux facteurs A et B, chacun à deux niveaux (1 et 2). Dans la figure 3.4 (a), les droites représentant les effets sont parallèles, il n'y a donc pas d'interaction entre A et B. Par contre, dans la figure 3.4 (b), ces droites se croisent, les facteurs A et B sont en interaction.



**Figure 3.4** Interactions entre deux facteurs A et B

L'interaction  $I_{AiBj}$  sera recherchée à partir des résultats moyens des essais réalisés lorsque le facteur A se trouve au niveau  $i$  et le facteur B au niveau  $j$ . Mais dans tous ces essais, l'effet principal  $E_{Ai}$  joue sur la réponse, de même que l'effet  $E_{Bj}$ .

### 3.3 Type de plans

Un plan d'expériences est un tableau ou une matrice dont les colonnes représentent des facteurs et les lignes des essais. La dernière colonne représente la réponse mesurée du

système en se fixant un seul niveau de chaque facteur étudié. Il existe trois propriétés importantes des plans d'expériences :

- **Complet** : ils contiennent toutes les combinaisons des facteurs dans tous les niveaux possibles. Le nombre d'essais à réaliser devient rapidement non maîtrisable c'est-à-dire qu'il correspond au produit du nombre de niveaux de chaque facteur. C'est l'inconvénient majeur qui justifie la théorie de construction des plans.
- **Fractionnaire** : c'est une fraction du plan complet. Le nombre d'essais est réduit par rapport au plan complet. En contrepartie il ne permet d'analyser qu'un sous-ensemble du modèle complet car des effets peuvent être mélangés. Les plans d'expériences de Taguchi font partie de ces plans fractionnaires, mais avec un avantage important, la facilité de mise en pratique de ces plans grâce à quelques astuces qui simplifient la tâche de l'expérimentateur.
- **Orthogonal** : tous les niveaux de chaque facteur sont associés avec le même nombre de fois à tous les niveaux des autres facteurs. Cette propriété entraîne que chacun des effets peut être estimé sans que les autres biaisent cette estimation. Autrement dit, la contribution sur la réponse de chaque facteur du plan est indépendante des autres. De ce fait, un plan orthogonal devra être le plus petit commun multiple (PPCM) du produit du nombre de niveaux de toutes les actions disjointes prises deux à deux.

Un plan complet est nécessairement orthogonal. Cependant, un plan d'expériences fractionnaire doit être conçu de manière à respecter la propriété d'orthogonalité pour équilibrer les effets des différents facteurs considérés et permette ainsi une exploitation non biaisée des expériences réalisées sur le système. La construction d'un plan fractionnaire orthogonal n'est pas évidente dès que le nombre d'essais dépasse quatre. C'est pourquoi, des tables standards et des techniques d'adaptation à des situations spécifiques ont été élaborées pour simplifier la mise en œuvre des plans d'expériences : il s'agit principalement des tables de Taguchi.

### 3.4 Méthode Taguchi

Le docteur Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, il a notamment mis au point une méthode nommée « méthode Taguchi » qui permet de maîtriser la qualité dès

la conception des produits. L'utilisation du plan fractionnaire permet de diminuer considérablement le nombre d'expériences à réaliser pour identifier les coefficients d'un modèle. La mise au point de plans fractionnaires adaptés à un modèle est une procédure longue et peut s'avérer complexe. Taguchi a mis au point une méthode originale permettant, à partir de quelques tables standard, de résoudre facilement la plupart des problèmes industriels en matière de plan d'expériences (Taguchi, 1993). Ces tables standards de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées. Et les interactions d'ordre supérieur à deux seront toujours considérées comme négligeables (Pillet, 2005).

#### **3.4.1** *La démarche de la méthode Taguchi*

La démarche de Taguchi se présente en six phases (Taguchi, 1987) :

**Phase 1** : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.

**Phase 2** : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.

**Phase 3** : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.

**Phase 4** : réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignnant les réponses dans un tableau.

**Phase 5** : analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).

**Phase 6** : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.).

### 3.4.2 Le choix d'une table de Taguchi

Afin de choisir une table existante, il faut calculer le nombre d'essais minimum à effectuer. Ce calcul est basé sur la notion de degré de liberté (ddl) qui est défini mathématiquement comme suit :

- ✓ le ddl d'un facteur est égal au nombre de ces niveaux moins un ;
- ✓ le ddl d'une interaction est égal au produit des ddl des facteurs la composant ;
- ✓ le ddl d'un modèle est égal à la somme des ddl des facteurs et des interactions ;
- ✓ le ddl d'un plan est égal au nombre d'essais moins un.

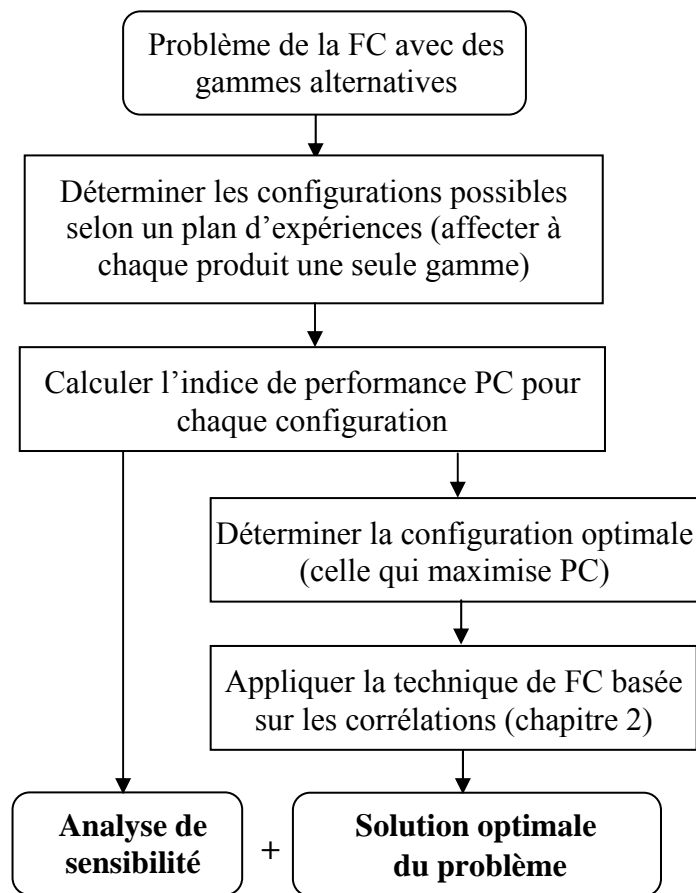
Il s'agit alors de choisir la plus petite matrice d'expériences compatible avec le modèle choisi, c'est-à-dire le nombre de ddl du plan doit être supérieur ou égal à celui du modèle. Les tableaux de Taguchi sont désignés par trois symboles. Par exemple, la table  $L_8 (2^7)$  comporte 8 essais pour étudier un problème possédant au maximum 7 facteurs avec deux niveaux chacun. La table  $L_{36} (2^{11} \times 3^{12})$  comporte 36 essais pour étudier 11 facteurs à deux niveaux et 12 autres facteurs à trois niveaux.

## 4. Approche proposée

### 4.1 Architecture de l'approche proposée

L'approche proposée considère le problème de la FC avec gammes alternatives comme un ensemble de plusieurs sous problèmes dont le traitement est basé sur la matrice d'incidence Produits-Machines.

La démarche de l'approche proposée est illustrée dans la figure 3.5 en deux phases. La première phase porte sur l'application de la méthode des plans d'expériences. En effet, chaque combinaison du plan (expérience) constitue une solution possible du problème de la FC avec gammes alternatives. La réponse du modèle du plan d'expériences est le pourcentage cumulé (PC) présenté dans le chapitre précédent qui permet de mesurer une solution de la FC. La seconde phase de la démarche proposée consiste à appliquer la méthode de FC basée sur l'analyse des corrélations statistiques que nous avons proposée dans le chapitre précédent.



**Figure 3.5** Architecture de l'approche proposée pour la FC avec gammes alternatives

## 4.2 Application du plan factoriel

### 4.2.1 Sélection des gammes

La méthodologie de l'approche proposée est appliquée à un exemple de formation de cellules. Soit un atelier disposant de 8 machines pour fabriquer 6 types de produits :

Le produit P1 peut avoir deux gammes possibles.

Le produit P3 possède trois gammes alternatives

Le produit P5 dispose de deux gammes alternatives.

Les produits P2, P4 et P6 possèdent chacun une seule gamme.

Le tableau 3.1 présente la matrice d'incidence de ce problème. La présence d'un « 1 » dans la matrice d'incidence désigne que la gamme du produit demande la machine correspondante. Dans le cas contraire, on met « 0 ».

**Tableau 3.1** Les données de l'exemple illustratif

Produit	Gamme	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
P1	1	0	0	1	0	1	0	1	0
	2	0	0	1	0	1	1	0	1
P2	1	1	0	1	0	0	0	1	0
P3	1	1	0	0	0	1	0	0	1
	2	1	0	1	1	0	0	1	0
	3	1	1	0	0	1	0	1	1
P4	1	0	1	0	0	0	1	0	1
P5	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	1	0	1	0	1	0	1
P6	1	0	1	0	1	0	1	0	1

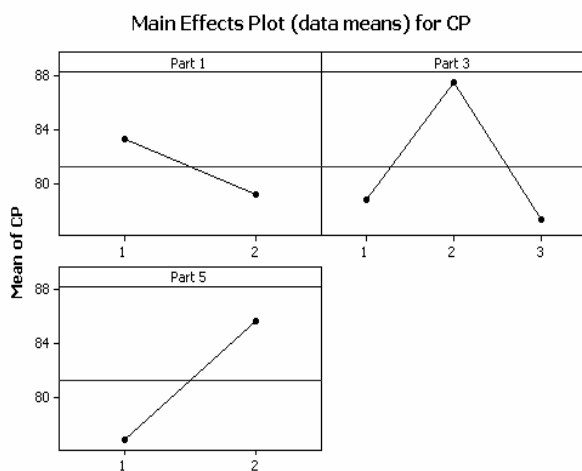
Le problème consiste à choisir pour chaque produit la gamme qui donnera le meilleur groupement des machines en cellules. En appliquant la démarche de la figure 3.5, l'étude du plan complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des gammes de chaque produit. Le nombre d'expériences nécessaires pour l'ensemble des combinaisons qu'on note par N, est simplement le produit du nombre de gammes de chaque produit, c'est-à-dire  $N = 2 \times 3 \times 2 = 12$  expériences.

Pour chaque expérience et comme l'indique le tableau 3.2, nous avons évalué par l'intermédiaire du logiciel XLSTAT (version 7.5.3) l'indice PC. Pour faciliter l'interprétation des résultats du plan d'expériences, nous avons utilisé le logiciel MINITAB (version 14). La figure 3.6 représente l'ensemble des effets qui permet de visualiser l'effet des facteurs (P1, P3 et P5). La figure 3.7 représente l'ensemble des interactions entre les différents produits.

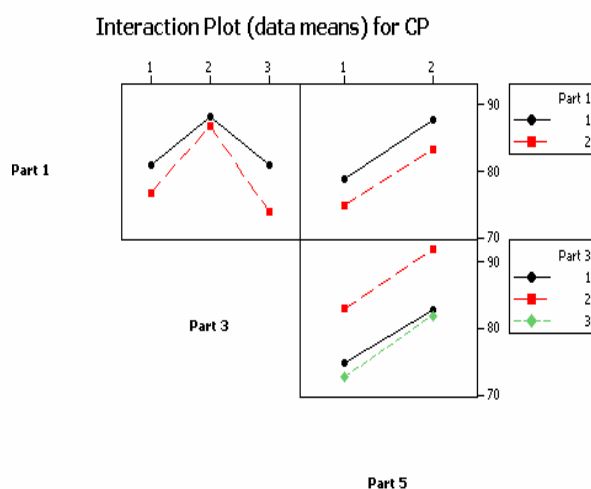
**Tableau 3.2** Les résultats du plan factoriel complet de l'exemple illustratif

Expérience	P1	P3	P5	PC
1	1	1	1	76,1
2	1	1	2	85,6
<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>92,5</b>
4	1	3	2	85,6
5	1	2	1	83,9
6	1	3	1	76,1
7	2	1	1	73,3
8	2	1	2	80,2
9	2	2	1	82,1
10	2	3	1	69,1
11	2	3	2	78,4
12	2	2	2	91,6

Nous pouvons constater à partir des figures 3.6 et 3.7 qu'il faut tenir compte des seuls effets des produits P1 et P3, c'est-à-dire retenir la gamme G1 pour le facteur P1 et la gamme G2 pour le produit P3. D'après la figure 3.7, le produit P5 n'est pas lié par une interaction (les segments sont parallèles), il suffit donc de retenir la gamme de ce produit qui donne le maximum de PC, c'est-à-dire la gamme G2. En plus, le produit P5 ne doit pas être fabriqué dans la même cellule que les produits P1 et P3 car il ne possède aucune interaction avec les produits P1 et P3.



**Figure 3.6** Graphique des effets moyens de l'exemple



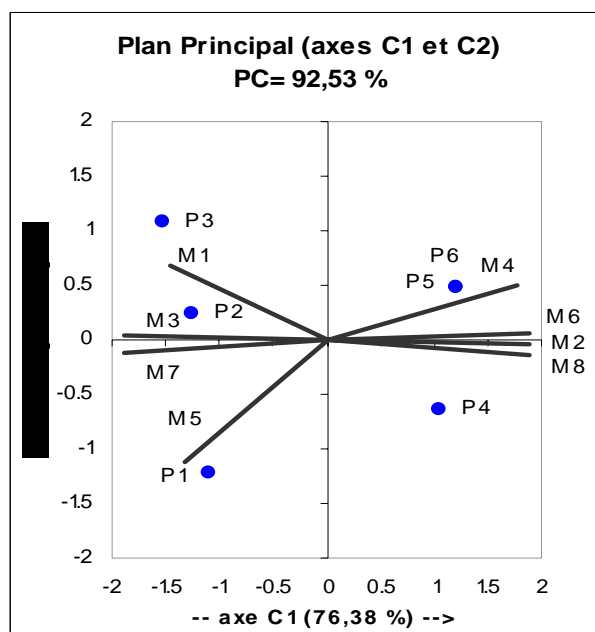
**Figure 3.7** Graphe des interactions de l'exemple

La figure 3.6 montre aussi que le produit P1 possède le minimum d'effet moyen. Par conséquent, la solution finale est peu sensible à un changement de la gamme préférentielle du produit P1. En plus, la solution optimale est plus sensible aux changements de la gamme de traitement du produit P5 en la comparant au produit P3. Nous voyons les intérêts supplémentaires de l'utilisation de la méthode des plans d'expérience pour la conception des systèmes de production cellulaires.

Cette première phase nous a conduit à choisir la première gamme pour le produit P<sub>1</sub> et la deuxième gamme pour les produits P<sub>3</sub> et P<sub>5</sub>. Cette configuration constitue la configuration optimale. Il est à noter que cette solution (1, 2, 2) correspond aussi à la valeur maximale de PC présentée dans le tableau 3.2 (PC = 92,5 %).

### 4.2.2 Formation de cellules

La deuxième phase consiste à la résolution du problème classique de formation des cellules. Cette approche se base sur une matrice d'incidence binaire (Produits-Machines) avec une seule gamme par produit. La figure 3.8 présente le plan principal de la troisième configuration retenue à la fin de la première phase en appliquant la démarche proposée au deuxième chapitre.



**Figure 3.8** Illustration du plan principal de la configuration optimale de l'exemple

En tenant compte des règles d'analyse du plan principal, que nous avons présenté dans le deuxième chapitre, nous affirmons simplement que l'atelier doit comporter deux cellules : une première cellule comprenant les machines M1, M3, M5 et M7 qui traitent les produits P1, P2 et P3 et une seconde cellule comprenant les machines M2, M4, M6 et M8 qui traitent les produits P4, P5 et P6. La solution finale est présentée dans le tableau 3.3.

**Tableau 3.3** Solution finale de l'exemple illustratif

Produit	Gamme	M1	M5	M3	M7	M2	M4	M6	M8
P1	1	0	1	1	1				
P2	1	1	0	1	1				
P3	2	1	0	1	1		1		
P4	1					1	0	1	1
P5	2					1	1	1	1
P6	1					1	1	1	1



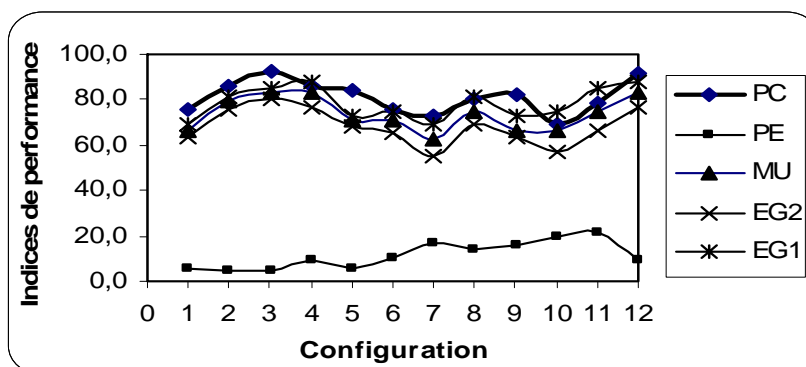
### 4.3 Validation de l'indice PC

L'objectif de ce paragraphe est de justifier la proposition de PC comme un nouvel indice de performance d'une méthode de FC. Pour cela, nous avons appliqué la méthode FCC pour chaque configuration du tableau 3.2. Toutes les solutions finales sont présentées dans la figure 3.10. A l'aide de ces solutions, nous avons calculé pour chaque configuration les indices de performances : PE, MU, EG<sub>1</sub> et EG<sub>2</sub> à l'aide des équations (8), (9), (10) et (11) présentées dans le chapitre précédent.

**Tableau 3.4** Résultats des différents indices de performances

Exp.	PC	NEE	NVE	UE	PEE	MU	EG <sub>1</sub>	EG <sub>2</sub>
1	76,1	1	8	17	5,9	66,7	68,8	64,0
2	85,6	1	5	20	5,0	79,2	81,3	76,0
3	<b>92,5</b>	1	4	21	<b>4,8</b>	<b>83,3</b>	<b>85,4</b>	<b>80,0</b>
4	85,6	2	4	22	9,1	83,3	87,5	76,9
5	83,9	1	7	18	5,6	70,8	72,9	68,0
6	76,1	2	7	19	10,5	70,8	75,0	65,4
7	73,3	3	9	18	16,7	62,5	68,8	55,6
8	80,2	3	5	21	14,3	75,0	81,3	69,2
9	82,1	3	8	19	15,8	66,7	72,9	59,3
10	69,1	4	8	20	20,0	66,7	75,0	57,1
11	78,4	4	5	23	17,4	79,2	87,5	67,9
12	91,6	2	4	22	9,1	83,3	87,5	76,9

La figure 3.9 présente les résultats des différents indices de performances pour les 12 configurations. Nous remarquons bien que tous ces indices évoluent pratiquement de la même manière et ils confirment que la troisième configuration est la solution optimale. En effet, cette configuration donne le maximum de MU, EG<sub>1</sub>, EG<sub>2</sub> et PC et le minimum de PEE. Nous remarquons aussi, la forte corrélation des différents indices de performance proposés en littérature avec l'indice PC que nous avons proposé.



**Figure 3.9** Comparaison de PC aux indices de performances : PE, MU, EG<sub>1</sub> et EG<sub>2</sub>

L'indice PC n'exige pas la confection des différentes cellules pour être calculé, comme le cas des autres indices de performances qui nécessitent d'avoir toutes les solutions de la figure 3.10. Il est déterminé d'une manière simple et automatique à travers la multitude des logiciels d'analyses de données aisément disponibles.

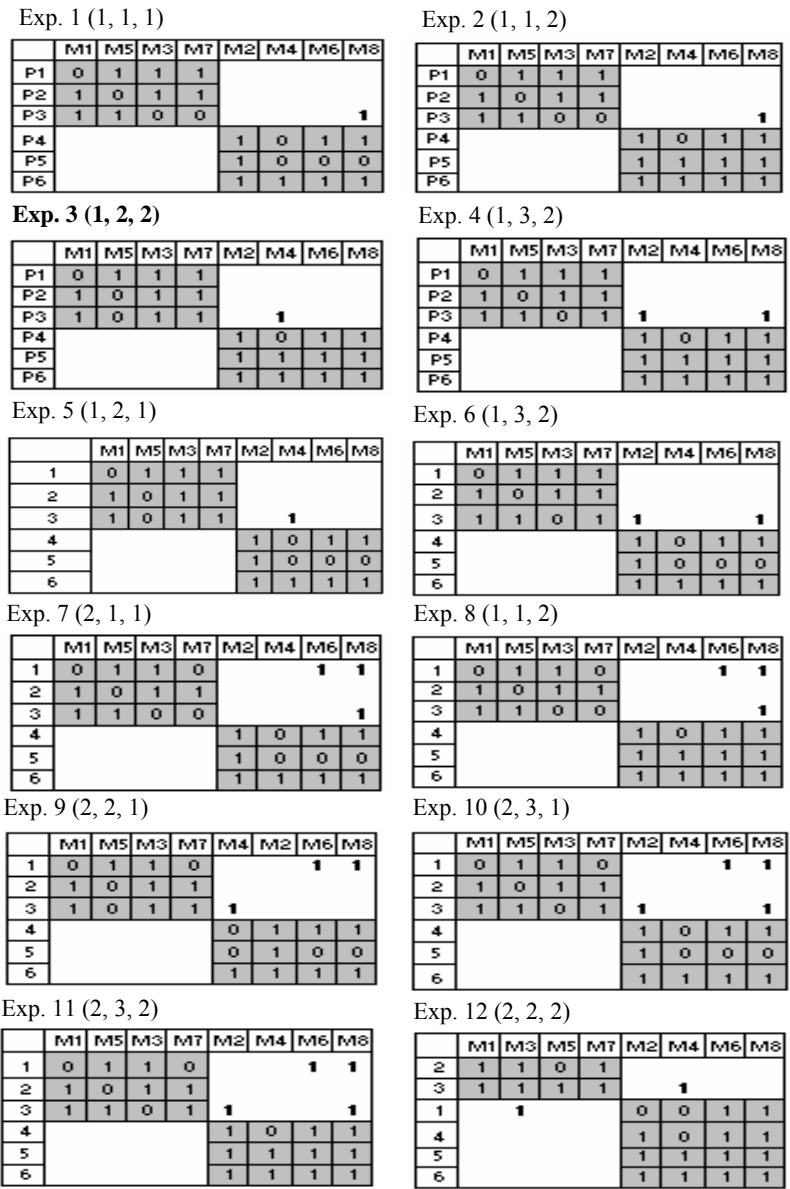


Figure 3.10 Les solutions finales de toutes les configurations possibles

#### 4.4 Application de la méthode de Taguchi

Dans ce qui suit, nous allons détailler l'application de la méthode Taguchi de trois problèmes reconnus en littérature : problème dévoilé par (Kusiak, 1987), Problème présenté par (Sankaran et Kasilingam, 1990) et problème abordé par (Nagi et al. 1990)

#### 4.4.1 Problème de Kusiak (4 x 5 x 11)

Dans le problème de Kusiak (Kusiak, 1987), chacun des produits P2, P3, P4 et P5 peut être réalisé par deux gammes alternatives et le produit P1 par trois gammes alternatives. Ce qui engendre donc 4 facteurs à 2 niveaux et un facteur à trois niveaux. La matrice d'incidence relative au problème de Sankaran est présentée dans le Tableau 3.5.

**Tableau 3.5** La matrice d'incidence (4 x 5 x 11) du problème de Kusiak

Ligne	Produit	Gamme	M1	M2	M3	M4
1	P1	1	0	0	1	1
2		2	0	1	0	1
3		3	1	1	0	0
4	P2	1	0	1	1	0
5		2	1	0	1	0
6	P3	1	1	0	0	1
7		2	0	1	0	1
8	P4	1	1	0	0	1
9		2	1	0	1	0
10	P5	1	0	0	1	1
11		2	1	0	0	0

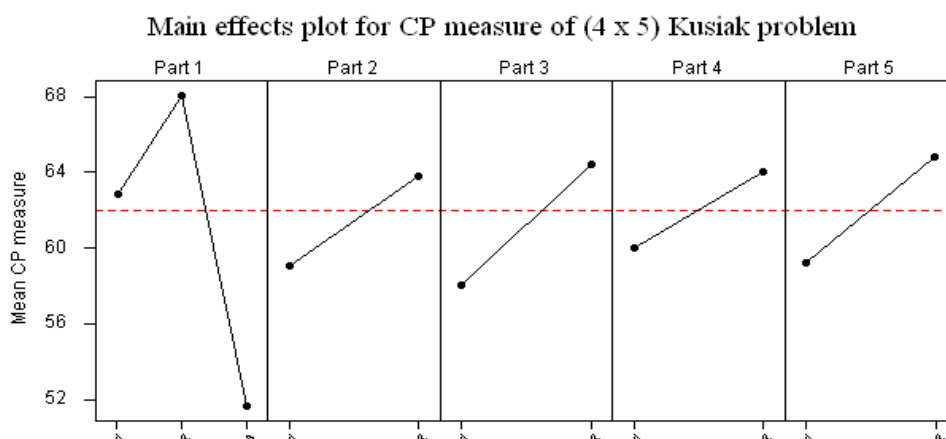
De ce fait, le nombre minimum de ddl du modèle est 6. La table  $L_8$  ( $4^1 \times 2^4$ ) ayant un nombre de ddl suffisant a été sélectionnée pour réaliser cette première application de la méthode de Taguchi. Nous ne recherchons pas un modèle expliquant la liaison entre les produits, nous recherchons simplement à sélectionner la meilleure gamme de chaque produit de telle sorte que PC soit maximum. Par conséquent, nous choisirons de ne pas étudier les interactions et de se limiter aux 5 colonnes présentées dans le tableau 3.6.

A partir des résultats du tableau 3.6, il est possible d'établir le graphe des effets de la figure 3.11. Ce graphe permet de visualiser la différence entre les effets de chacun des produits. En abscisse, nous avons successivement l'ensemble des produits et en ordonnées, la réponse adoptée PC. L'inclinaison de la pente permet d'identifier rapidement les facteurs les plus influents. L'objectif est de maximiser PC et de sélectionner pour chaque produit la gamme préférentielle qui nous conduit à ce maximum. Pour cela, nous devons choisir le niveau des facteurs tel que l'effet accroît le PC. Nous choisissons les points les plus haut du graphe des effets de la figure 3.11.

**Tableau 3.6** Table de Taguchi  $L_8 (4^1 \times 2^4)$  relative au problème de Kusiak

Expérience	P1	P2	P3	P4	P5	CP
1	1	1	1	1	1	72,4
2	1	2	2	2	2	66,3
3	1	2	2	1	1	50,0
4	2	1	1	2	2	51,6
5	2	2	2	1	1	64,4
6	2	2	2	2	2	88,2
7	3	1	2	1	2	53,3
8	3	2	1	2	1	50,0

La configuration optimale consiste à affecter la deuxième gamme pour chacun des produits. En revenant à l'approche développée dans le second chapitre, nous affirmons simplement que l'atelier doit comporter deux cellules : une première cellule comportant les machines M1 et M3 et une deuxième cellule comportant les machines M2 et M4. La solution finale obtenue est indiquée dans le tableau 3.7. Cette solution est identique à celle proposée par plusieurs auteurs comme Kusiak lui même (Kusiak, 1987), (Sharker et Balan, 1996) et (Mukattach et al. 2002).

**Figure 3.11** Graphique des effets moyens relatifs au problème de Kusiak**Tableau 3.7** La solution finale obtenue du problème de Kusiak

Line	Produit	Gamme	M2	M4	M1	M3
2	P1	2	1	1		
7	P3	2	1	1		
5	P2	2			1	1
9	P4	2			1	1
11	P5	2			1	0

#### 4.4.2 Problème de Sankaran (6 x 11 x 20)

Dans le problème de Sankaran (Sankaran et Kasilingam, 1990), chacun des produits P1, P2, P4, P6, P8, P9 et P10 peut être réalisé par deux gammes alternatives et le produit P5 par quatre gammes alternatives. Ce qui engendre donc 7 facteurs à 2 niveaux et un facteur à quatre niveaux. La matrice d'incidence relative au problème de Sankaran est présentée dans le Tableau 3.8.

**Tableau 3.8** La matrice d'incidence (6 x 11 x 20) du problème de Sankaran

Ligne	Produits	Gammes	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	P1	1	0	1	0	0	1	1
2		2	0	1	1	0	0	1
3	P2	1	0	1	0	1	1	1
4		2	0	1	0	1	0	1
5	P3	1	1	0	0	1	0	0
6	P4	1	0	1	0	1	1	0
7		2	0	1	0	1	0	1
8	P5	1	1	0	1	1	0	0
9		2	1	0	1	0	1	0
10		3	0	0	1	1	0	0
11		4	0	0	1	1	1	0
12	P6	1	0	1	0	1	0	0
13		2	0	0	0	1	0	1
14	P7	1	1	0	1	0	0	0
15	P8	1	0	1	0	1	1	1
16		2	1	1	0	1	0	1
17	P9	1	0	1	0	1	0	1
18		2	0	1	0	0	1	1
19	P10	1	0	0	1	1	0	0
20		2	0	0	0	1	1	0

De ce fait, le nombre minimum de ddl du modèle est 10. La table  $L_{16} (4^1 \times 2^7)$  ayant un nombre de ddl suffisant a été sélectionnée pour réaliser cette deuxième application de la méthode de Taguchi. Nous ne recherchons pas un modèle expliquant la liaison entre les produits, nous recherchons simplement à sélectionner la meilleure gamme de chaque produit de telle sorte que PC soit maximum. Par conséquent, nous choisirons de ne pas étudier les interactions et de nous limiter aux 8 colonnes présentées dans le tableau 3.9.

A partir des résultats du tableau 3.8, il est possible d'établir le graphe des effets de la figure 3.12. Ce graphe permet de visualiser la différence entre les effets de chacun des produits. En abscisse, nous avons successivement l'ensemble des produits et en ordonnée, la réponse adoptée PC. L'inclinaison de la pente permet d'identifier rapidement les facteurs les plus influents. L'objectif est de maximiser PC et de sélectionner pour chaque

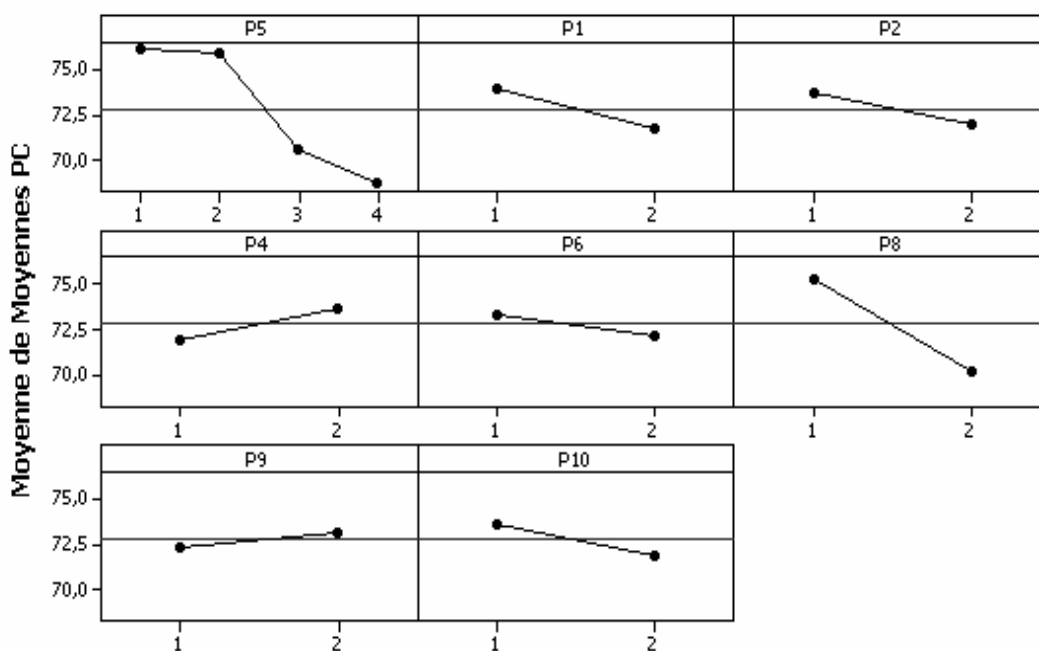
produit la gamme préférentielle qui nous conduit à ce maximum. Pour cela, nous devons choisir le niveau des facteurs tel que l'effet accroît le PC, c'est à dire les points les plus hauts du graphe des effets de la figure 3.12. La configuration optimale consiste à affecter la première gamme pour chacun des produits P1, P2, P5, P6, P8 et P10 et à affecter la seconde gamme pour les produits P4 et P9.

**Tableau 3.9** Table de Taguchi  $L_{16} (4^1 \times 2^7)$  relative au problème de Sankaran

Expérience	P1	P2	P4	P5	P6	P8	P9	P10	PC
1	1	1	1	1	1	1	1	1	78,0
2	1	1	1	1	1	2	2	2	77,5
3	2	2	2	1	2	1	1	1	79,5
4	2	2	2	1	2	2	2	2	69,2
5	1	1	2	2	2	1	1	2	78,7
6	1	1	2	2	2	2	2	1	77,6
7	2	2	1	2	1	1	1	2	76,1
8	2	2	1	2	1	2	2	1	71,0
9	1	2	1	3	2	1	2	1	74,4
10	1	2	1	3	2	2	1	2	64,4
11	2	1	2	3	1	1	2	1	75,0
12	2	1	2	3	1	2	1	2	68,6
13	1	2	2	4	1	1	2	2	70,1
14	1	2	2	4	1	2	1	1	70,8
15	2	1	1	4	2	1	2	2	70,9
16	2	1	1	4	2	2	1	1	63,1

**Graphique des effets principaux relatif au problème de Sankaran**

Moyennes des PC

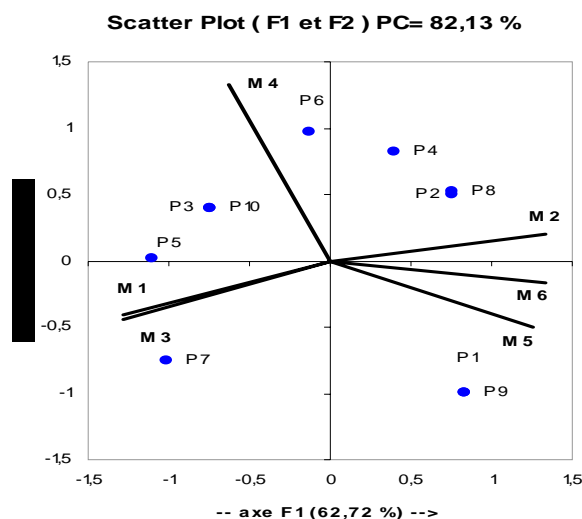


**Figure 3.12** Graphique des effets moyens relatifs au problème de Sankaran

D'après la figure 3.12, nous pouvons conclure que les produits P5 et P8 sont les plus significatifs. Pour s'assurer de ce résultat, il est nécessaire de faire une analyse de variance (ANOVA) comme l'indique la littérature relative aux méthodes des plans d'expériences. Ce qui sort du cadre de notre problématique de recherche. En effet, l'objectif majeur de ce travail est de sélectionner la gamme optimale pour chaque produit. L'examen du graphe des effets principaux est largement suffisant pour atteindre cet objectif.

En résumé, l'application de la méthode Taguchi nous a permis de déterminer les produits influents, et de déterminer les niveaux optimaux pour chacun d'entre eux (Hachicha et al. 2008c). Lorsque nous revenons au plan d'expériences du tableau 3.9, nous nous apercevons que cette configuration optimale n'a pas été testée dans celui-ci. Il faut maintenant vérifier la reproductibilité des résultats en effectuant un essai de validation dans les conditions optimales. L'essai de confirmation de la réponse théorique de la configuration optimale nous donne une valeur de 82,1 % (voir figure 3.13). Dans ce cas le modèle est très satisfaisant, la réponse est proche de la réponse prédite d'après le modèle 83,3 %, les interactions sont probablement nulles ou très faibles.

En revenant à l'approche développée dans le second chapitre tout en analysant le plan principal indiqué dans la figure 3.13, nous affirmons simplement que l'atelier doit comporter deux cellules : une première cellule comportant les machines M2, M5 et M6 et une deuxième cellule comportant les machines M1, M3 et M4. La solution finale obtenue est indiquée dans le tableau 3.10. En appliquant la méthode de Kusiak, (Hwang et Ree, 1996) ont indiqué la solution du tableau 3.11. Il est à remarquer que la solution obtenue comporte seulement 4 éléments exceptionnels par contre l'autre solution en comporte 6.



**Figure 3.13** Plan principal de la configuration optimale du problème de Sankaran

**Tableau 3.10** La solution finale obtenue du problème de Sankaran

Lign	Produit	Gammes	M2	M5	M6	M1	M3	M4
1	P1	1	1	1	1			1
3	P2	1	1	1	1			
7	P4	2	1	0	1			
15	P8	1	1	1	1			
18	P9	2	1	1	1			
5	P3	1	1			1	0	1
8	P5	1				1	1	1
12	P6	1				0	0	1
14	P7	1				1	1	0
19	P10	1				0	1	1

**Tableau 3.11** La solution du problème de Sankaran par la méthode de Kusiak

Lign	Produit	Gammes	M2	M5	M6	M1	M3	M4
1	P1	1	1	1	1	1		1
4	P2	2	1	0	1			
7	P4	2	1	0	1			
16	P8	2	1	0	1			
17	P9	1	1	0	1			
5	P3	1	1			1	0	1
8	P5	1				1	1	1
13	P6	2				0	0	1
14	P7	1				1	1	0
19	P10	1				0	1	1

La solution finale obtenue est identique à celle présentée par (Hwang et Ree, 1996)

#### 4.4.3 Problème de Nagi (20 x 20 x 51)

Le problème proposé par Nagi (Nagi et al. 1990) est l'un des problèmes les plus traité en littérature tels que (Joines et al. 1995), (Hwang and Ree, 1996), (Adenso-Diaz et al. 2001) (Uddin et Shanker 2002), (Malakooti et al. 2004), (Chan F.T.S et al. 2006), (Nsakanda et al. 2006), etc. Ce problème est de grande taille, en effet, il comporte 20 machines à grouper en cinq cellules pour la production de 20 produits décrits par 51 gammes. Seuls les produits P17, P18, P19 et P20 ont une seule gamme possible. Par contre les produits P5, P7, P9, P11, P12, P13, P14, P15 et P16 pouvant être chacun réalisé par trois gammes alternatives et les autres produits par deux gammes alternatives. Ce qui engendre donc 9 facteurs à 3 niveaux et 7 facteurs à 2 niveaux. La matrice d'incidence relative au problème de Nagi est présentée dans le Tableau 3.12.



**Tableau 3.12** La matrice d'incidence (20 x 20 x 51) du problème de Nagi

Ligne	Produits	Gammes	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
1	P1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2		2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	P2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4		2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	P3	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6		2	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	P4	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8		2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	P5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
10		2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
11		3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
12	P6	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13		2	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	P7	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
17		2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
19		3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
20	P8	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
21		2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
23	P9	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
25		2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
27		3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
28	P10	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
29		2	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
30	P11	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
31		2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
32		3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
33	P12	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
34		2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
35		3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
36	P13	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
37		2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
38		3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
39	P14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
40		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
41		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
42	P15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
43		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
44		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
45	P16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
46		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
47		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
48	P17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
49	P18	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
50	P19	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
51	P20	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

De ce fait, le nombre minimum de ddl du modèle est 25. La table  $L_{36} (3^9 \times 2^7)$  ayant un nombre de ddl suffisant a été sélectionnée pour appliquer l'approche proposée. Nous ne recherchons pas un modèle expliquant la liaison entre les produits, nous recherchons simplement à sélectionner la meilleure gamme de chaque produit de telle sorte que PC soit maximum. Par conséquent, nous choisirons de ne pas étudier les interactions et de nous limiter aux 16 colonnes présentées dans le tableau 3.13.

**Tableau 3.13** Table de Taguchi  $L_{36} (3^9 \times 2^7)$  relative au problème de Nagi

Expérience	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	PC
1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	3	36,9
2	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	37,8
3	1	1	1	1	3	1	3	2	3	2	3	1	1	2	1	1	37,9
4	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	3	1	2	3	3	2	36,5
5	1	1	2	2	2	2	2	1	3	1	1	2	3	2	1	1	35,8
6	1	1	2	2	3	2	3	1	1	1	2	3	1	1	2	3	36,5
7	1	2	1	2	1	2	1	1	3	2	2	1	3	1	3	1	36,2
8	1	2	1	2	2	2	2	1	1	2	3	2	1	3	1	3	36,5
9	1	2	1	2	3	2	3	1	2	2	1	3	2	2	2	2	36,4
10	1	2	2	1	1	2	2	2	3	1	1	3	2	2	3	3	37,6
11	1	2	2	1	2	2	3	2	1	1	2	1	3	1	1	2	36,4
12	1	2	2	1	3	2	1	2	2	1	3	2	1	3	2	1	36,2
13	1	2	2	2	1	1	2	2	3	2	2	1	1	3	2	3	37,9
14	1	2	2	2	2	1	3	2	1	2	3	2	2	2	3	2	37,5
15	1	2	2	2	3	1	1	2	2	2	1	3	3	1	1	1	37,3
16	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	3	3	3	2	2	1	39,7
17	2	1	2	2	2	1	3	1	2	2	1	1	1	1	3	3	38,3
18	2	1	2	2	3	1	1	1	3	2	2	2	2	3	1	2	39,2
19	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	3	3	1	1	1	2	37,3
20	2	1	2	1	2	2	3	2	3	2	1	1	2	3	2	1	37,4
21	2	1	2	1	3	2	1	2	1	2	2	2	3	2	3	3	36,3
22	2	1	1	2	1	2	3	2	2	1	1	2	3	3	1	3	36,0
23	2	1	1	2	2	2	1	2	3	1	2	3	1	2	2	2	36,0
24	2	1	1	2	3	2	2	2	1	1	3	1	2	1	3	1	36,1
25	2	2	2	1	1	1	3	1	2	1	2	2	1	2	3	1	37,5
26	2	2	2	1	2	1	1	1	3	1	3	3	2	1	1	3	37,0
27	2	2	2	1	3	1	2	1	1	1	1	1	3	3	2	2	38,8
28	2	2	1	2	1	1	3	2	3	1	3	2	3	1	2	2	38,8
29	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	3	1	3	3	1	37,5
30	2	2	1	2	3	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1	3	38,7
31	2	2	1	1	1	2	3	1	1	2	2	3	2	3	1	1	35,9
32	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	3	1	3	2	2	3	37,4
33	2	2	1	1	3	2	2	1	3	2	1	2	1	1	3	2	37,4
34	2	2	2	2	3	1	3	2	3	1	2	2	2	2	1	2	42,7
35	2	2	2	2	1	1	3	2	3	1	1	1	1	1	2	1	43,9
36	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3	42,4

Le graphe des effets principaux relatif au plan d'expériences du tableau 3.16 est présenté dans la figure 3.14. A partir de cette figure, nous pouvons conclure d'une part, que les produits P5 et P8 sont les plus significatifs. Ces produits auront la plus grande influence sur la formation des cellules. D'autre part en choisissant les points les plus hauts, la configuration optimale consiste à affecter :

- la première gamme pour chacun des produits P5, P6, P10, P11, P12 et P13,
- la deuxième gamme pour les produits P1, P2, P3, P4, P8, P14, P15 et P16,
- la troisième gamme pour les produits P7 et P9.

La solution finale est indiquée dans la deuxième et la troisième colonne du tableau 3.14.

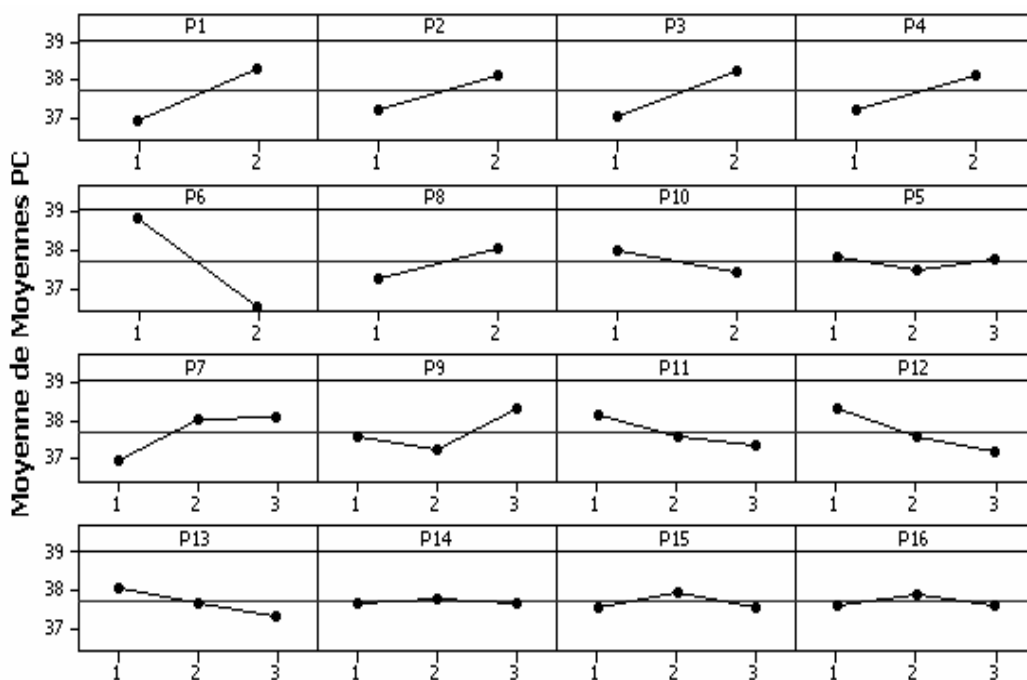


Figure 3.14 Graphique des effets moyens relatifs au problème de Nagi

En revenant à l’approche développée dans le deuxième chapitre tout en analysant le plan principal indiqué dans la figure 3.15, nous assurons simplement que l’atelier doit comporter cinq cellules comme l’indique le tableau 3.14. Nous avons consulté les solutions proposées en littérature du problème de Nagi. Le tableau 3.15, tableau 3.16, tableau 3.17 et tableau 3.18 indiquent la solution finale indiquée respectivement par (Joines et al. 1995), (Uddin et Shanker 2002), (Malakooti et al. 2004), (Chan F.T.S et al. 2006).

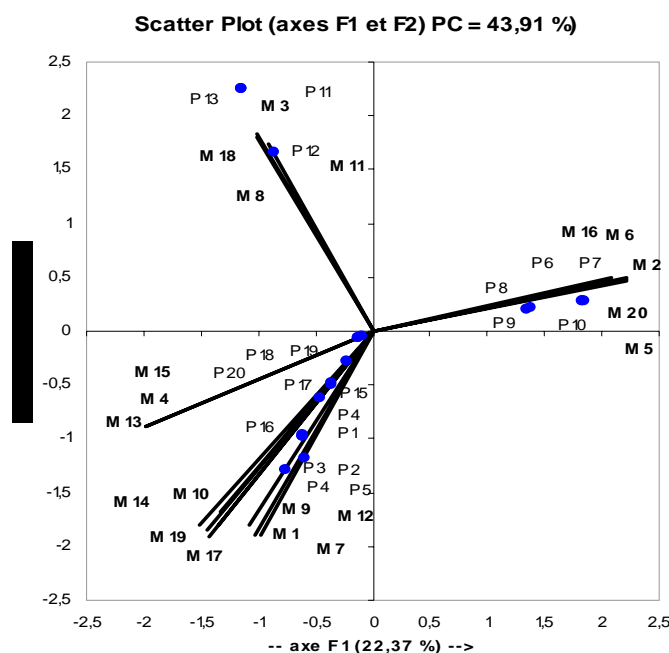


Figure 3.15 Plan principal de la configuration optimale pour le problème de Nagi

**Tableau 3.14** La solution finale obtenue du problème de Nagi

Ligne	Produits	Gammes	M2	M5	M6	M16	M20	M10	M14	M17	M19	M3	M8	M11	M18	M1	M7	M9	M12	M4	M13	M15
12	P6	1	1	1	1	0	0															
19	P7	3	0	1	1	1	1															
21	P8	2	1	0	1	1	0															
27	P9	3	1	0	1	1	1															
28	P10	1	1	1	1	1	0															
40	P14	2						1	1	1	1											
43	P15	2						1	0	1	1											
46	P16	2						1	1	0	1											
48	P17	1						1	1	0	0											
30	P11	1										1	1	1	1							
33	P12	1										1	1	0	1							
36	P13	1										1	1	1	1							
2	P1	2														0	1	1	1			
4	P2	2														1	1	0	1			
6	P3	2														1	1	1	1			
8	P4	2														1	1	0	1			
9	P5	1									1					1	0	1	1			
49	P18	1																		1	1	1
50	P19	1																		1	1	1
51	P20	1																		1	0	1

**Tableau 3.15** La solution du problème de Nagi proposée par (Joines et al. 1995)

Ligne	Produits	Gammes	M10	M14	M17	M18	M2	M5	M6	M16	M20	M4	M13	M15	M1	M7	M9	M12	M3	M8	M11	M19
39	P14	1	1	1	1	1																
42	P15	1	1	0	1	1																
45	P16	1	1	1	0	1																
48	P17	1	1	1	0	0																
12	P6	1					1	1	1	0	0											
19	P7	3					0	1	1	1	1											
21	P8	2					1	0	1	1	0											
27	P9	3					1	0	1	1	1											
28	P10	1					1	1	1	1	0											
49	P18	1										1	1	1								
50	P19	1										1	1	1								
51	P20	1										1	0	1								
2	P1	2														0	1	1	1			
4	P2	2														1	1	0	1			
6	P3	2														1	1	1	1			
8	P4	2														1	1	0	1			
11	P5	3														1	0	1	1			
31	P11	2																		1	1	1
34	P12	2																		1	1	0
37	P13	2																		1	1	1

**Tableau 3.16** La solution du problème de Nagi proposée par (Uddin et Shanker, 2002)

Ligne	Produits	Gammes	M4	M13	M15	M3	M8	M11	M20	M1	M7	M9	M12	M10	M14	M17	M19	M2	M5	M6	M16	M18	
49	P18	1	1	1	1																		
50	P19	1	1	1	1																		
51	P20	1	1	0	1																		
32	P11	3				1	1	1	1														
35	P12	3				1	1	0	1														
38	P13	3				1	1	1	1														
2	P1	2								0	1	1	1										
4	P2	2								1	1	0	1										
6	P3	2								1	1	1	1										
8	P4	2								1	1	0	1										
9	P5	1								1	0	1	1										
40	P14	2												1	1	1	1						
43	P15	2												1	0	1	1						
46	P16	2												1	1	0	1						
48	P17	1												1	1	0	0						
12	P6	1																1	1	1	0	0	
18	P7	1																0	1	1	1	1	
21	P8	2																1	0	1	1	0	
25	P9	2																1	0	1	1	1	
28	P10	1																1	1	1	1	0	

**Tableau 3.17** La solution du problème de Nagi proposée par (Malakooti et al. 2004)

Ligne	Produits	Gammes	M1	M7	M9	M12	M2	M5	M6	M16	M20	M3	M8	M11	M18	M4	M13	M15	M10	M14	M17	M19	
2	P1	2	0	1	1	1																	
4	P2	2	1	1	0	1																	
6	P3	2	1	1	1	1																	
8	P4	2	1	1	0	1																	
9	P5	1	1	0	1	1																	1
12	P6	1					1	1	1	0	0												
19	P7	3					0	1	1	1	1												
21	P8	2					1	0	1	1	0												
27	P9	3					1	0	1	1	1												
28	P10	1					1	1	1	1	0												
30	P11	1										1	1	1	1								
33	P12	1										1	1	0	1								
36	P13	1										1	1	1	1								
49	P18	1														1	1	1					
50	P19	1														1	1	1					
51	P20	1														1	0	1					
40	P14	2																	1	1	1	1	
43	P15	2																	1	0	1	1	
46	P16	2																	1	1	0	1	
48	P17	1																	1	1	0	0	

**Tableau 3.18** La solution du problème de Nagi proposée par (Chan F.T.S et al. 2006)

Ligne	Produits	Gammes	M10	M14	M17	M20	M2	M5	M6	M16	M19	M4	M13	M15	M1	M7	M9	M12	M3	M8	M11	M18	
41	P14	3	1	1	1	1																	
44	P15	3	1	0	1	1																	
47	P16	3	1	1	0	1																	
48	P17	1	1	1	0	0																	
12	P6	1					1	1	1	0	0												
17	P7	2					0	1	1	1	1												
21	P8	2					1	0	1	1	0												
23	P9	2					1	0	1	1	1												
28	P10	1					1	1	1	1	0												
49	P18	1										1	1	1									
50	P19	1										1	1	1									
51	P20	1										1	0	1									
2	P1	2												0	1	1	1						
4	P2	2												1	1	0	1						
6	P3	2												1	1	1	1						
8	P4	2												1	1	0	1						
10	P5	2												1	0	1	1						1
30	P11	1																	1	1	1	1	
33	P12	1																	1	1	0	1	
36	P13	1																	1	1	1	1	

Toutes les solutions présentées engendrent les mêmes critères de performances. Une analyse comparative portant sur les gammes sélectionnées dans les différentes solutions est indiquée dans le tableau 3.19. La solution obtenue est identique à celle proposée par (Malakooti et al. 2004). Outre la simplicité de résolution, l’apport de l’approche proposée consiste à établir un aspect d’analyse de sensibilité comme indiqué dans la figure 3.14.

**Tableau 3.19** Comparaison entre la solution proposée et celles proposées en littérature

<i>La solution finale proposée du problème de Nagi</i>																				
Produit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gamme	2	2	2	2	1	1	3	2	3	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
<i>La solution du problème de Nagi proposée par (Joines et al. 1995)</i>																				
Produit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gamme	2	2	2	2	3	1	3	2	3	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
<i>La solution du problème de Nagi proposée par (Uddin et Shanker, 2002)</i>																				
Produit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gamme	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1
<i>La solution du problème de Nagi proposée par (Malakooti et al. 2004)</i>																				
Produit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gamme	2	2	2	2	1	1	3	2	3	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
<i>La solution du problème de Nagi proposée par (Chan F.T.S et al. 2006)</i>																				
Produit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gamme	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1

#### 4.5 Validation de l'approche proposée

Le tableau 3.20 résume quelques tests qui ont été réalisés en appliquant l'approche proposée sur des matrices d'incidence binaires avec gammes alternatives reconnues en littérature de taille différente. La source de ces problèmes est indiquée dans la dernière colonne de droite.

**Tableau 3.20** Les différents problèmes avec gammes alternatives

No.	Taille (m x p x r)	F	Référence
1	5 x 7 x 11 (exemple 1)	2	(Kusiak, 1987)
2	6 x 10 x 20 (exemple 2)	2	(Sankaran et Kasilingam, 1990)
3	7 x 14 x 32	3	(Logendran et al. 1994)
4	9 x 6 x 13	3	(Mukattach et al. 2002)
5	20 x 20 x 51 (exemple 3)	5	(Nagi et al. 1990)

Afin d'évaluer l'approche proposée et de la comparer avec les autres méthodes. Les résultats obtenus sont évalués en se basant sur des indicateurs de performance que nous avons présentés au début du deuxième chapitre. Le tableau 3.21 présente les résultats de l'approche proposée ainsi que les meilleurs résultats connus dans les articles récents. Ces travaux ont utilisés des techniques basées sur la programmation mathématique que se soit avec résolution exacte comme dans (Sankaran et Kasilingam, 1990), (Hwang et Ree, 1996) et (Malakooti et al. 2004) ou avec résolution approchée comme dans (Mukattach et al. 2002), (Uddin et Shanker 2002) et (Chan F.T.S et al. 2006). Chacun a affirmé qu'il a trouvé une solution meilleure que celle proposée en littérature. Les résultats de l'approche proposée sont identiques à ceux présentés dans ces récents papiers en terme d'indicateurs de performance (PEE, EG<sub>1</sub> et EG<sub>2</sub>) que nous avons présentés au début du deuxième chapitre.

**Tableau 3.21** Les résultats de l'approche proposée

No.	Taille	F	Les résultats de l'approche proposée			Les meilleurs résultats connu à ce jour			Référence du résultat
			PEE	EG <sub>1</sub>	EG <sub>2</sub>	PEE	EG <sub>1</sub>	EG <sub>2</sub>	
1	4 x 5 x 11	2	0	95,0	90,0	0,0	95,0	90,0	(Sharker et Balan, 1996) (Mukattach et al. 2002)
2	6 x 10x 20	2	14,3	83,3	70,6	22,2	75,0	60,0	(Sankaran et Kasilingam, 1990)
3	7 x 14 x 32	3	16,7	85,7	67,6	16,7	85,7	67,6	(Hwang et Ree, 1996)
4	9 x 6 x 13	3	0,0	97,2	94,4	0,0	97,2	94,4	(Mukattach et al. 2002) (Uddin et Shanker 2002)
5	20 x 20 x 51	5	1,52	89,5	78,3	1,52	89,5	78,3	(Malakooti et al. 2004) (Chan F.T.S et al. 2006)

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche de deux phases pour la formation des cellules avec gammes alternatives. La première phase porte sur l'utilisation de la méthode des plans d'expériences (factoriel ou fractionnaire). L'objectif étant de choisir, pour chaque produit, la gamme préférentielle qui permettra d'optimiser la mise en cellules en terme de trafic intercellulaire. La deuxième phase consiste à appliquer la méthode de formation des cellules basée sur l'analyse des corrélations statistiques que nous avons présentée dans le deuxième chapitre.

L'avantage de l'approche proposée réside dans la simplicité et l'analyse de sensibilité proposée. En plus, elle est accessible gratuitement pour les industriels à travers la disponibilité de plusieurs logiciels de statistique appliquée à la qualité (Minitab, Optimum (TDC software), Qualitek-4, etc.). Malheureusement, la restriction de l'utilisation des plans d'expériences fractionnaires aux tables de bases de Taguchi limite parfois l'utilisation de l'approche proposée. Une perspective de recherche est ainsi envisageable qui consiste à la généralisation de l'approche proposée par l'application des plans fractionnaires ordinaires qui corresponde au problème traité. Autre perspective intéressante consiste à appliquer l'outil ANOVA pour une meilleure analyse de sensibilité.

Durant le deuxième et le troisième chapitre, nous avons constaté pour n'importe quelle méthode de formation de cellules (avec ou sans gammes alternatives), qu'il est rare de trouver des cellules complètement indépendantes. C'est à dire la présence d'éléments exceptionnels (EE) dans la solution finale. L'application de l'un des scénarios ou stratégies de traitement des EE (duplication de machines exceptionnelles, sous-traitance de produits exceptionnels, etc.) est nécessaire pour atteindre les objectifs de la TG. Ainsi et pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de définir une démarche de conception globale des aménagements cellulaires. Autrement dit, la problématique discutée dans le chapitre suivant consiste à identifier puis ordonner les différentes étapes de conception. C'est-à-dire à proposer une démarche de conception des aménagements cellulaires. Nous allons, d'une part, cadrer les approches que nous avons proposées dans les deux derniers chapitres. D'autre part, proposer une approche par simulation pour le choix économique entre les stratégies possibles de traitement des EE.



## Chapitre 4

# DÉMARCHE GLOBALE POUR LA CONCEPTION DES CELLULES DE PRODUCTION

### 1. Introduction

Toutes les méthodes de formation des cellules proposées en littérature, de même que les méthodes que nous avons proposées dans les chapitres précédents, répondent à une seule exigence fonctionnelle relative à un problème global de conception des AC. Par exemple, plusieurs méthodes de formation des cellules négligent l'effet engendré par la présence de machines ou de produits exceptionnels dans leurs solutions. Cette dépendance inter cellules peut mettre en question les avantages de l'AC comme indiqué par (Wemmerlöv et Hyer, 1986), (Reisman et al. 1997), etc.

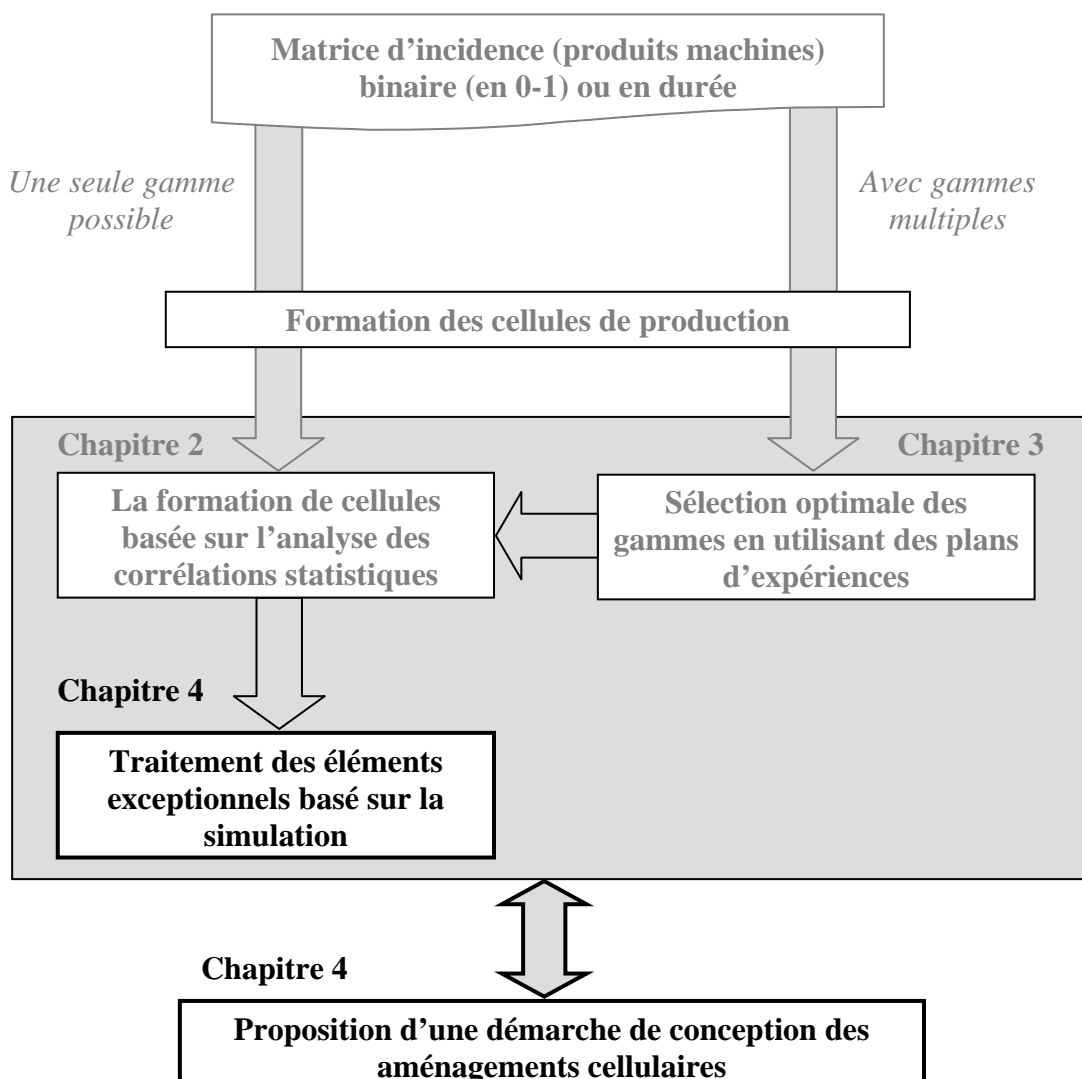
Il existe rarement, dans la littérature, des travaux qui traitent le problème de conception des AC d'une manière globale, c'est-à-dire une démarche qui touche tout les aspects de l'AC. Dans ce contexte, (Silveira, 1999) a proposé une approche séquentielle et basée sur l'intégration des concepts techniques. Cependant, son approche est fondée sur l'expérience antérieure mais elle ne montre pas les principes détaillés pour l'exécution. (Cabrera-Rios et al. 2002) et (Chiadamrong, 2003) ont proposé aussi des approches séquentielles basées sur l'utilisation de la simulation avec la méthode de Taguchi pour optimiser une certaine fonction coût. Néanmoins, ces approches se focalisent seulement sur l'amélioration des performances et ne tiennent pas compte d'autres aspects de conception comme le problème de base de formation de cellules. Dans un autre contexte, (Kulak et al. 2005) ont proposé une démarche de conception basée sur la conception axiomatique (CA) valable seulement lors de transformation d'un aménagement fonctionnel en un aménagement cellulaire.

Il est à noter que, plusieurs chercheurs préconisent la proposition de démarches globales de conception car ils ont traité, avec le problème de formation de cellules, d'autres aspects

relatifs à la conception cellulaire, comme dans (Choobineh, 1988), (Rajamani et al. 1990), (Ferreira Ribeiro et, Pradin, 1993), (Harish et Peihua, 1997), (Cheng et al. 2001), (Giri, et al. 2007), etc.

D'après notre recherche bibliographique dans le domaine des systèmes de production cellulaires, nous avons constaté qu'il est nécessaire d'avoir une démarche globale pour la conception des AC. C'est pourquoi, nous allons commencer ce chapitre par présenter les différents processus de conception (conception systématique, conception axiomatique et conception robuste). Après avoir justifié notre choix, nous allons présenter l'application de la conception axiomatique des AC inspirée du travail de (Kulak et al. 2005). La démarche de conception que nous proposons (Hachicha et al. 2008b) se caractérise par l'intégration de la notion de robustesse (plan d'expérience).

Pour plus de clarté, la figure 4.1 schématise le déroulement et l'emplacement de ce quatrième chapitre.



**Figure 4.1** Place du quatrième chapitre dans des travaux de thèse

Finalement, et pour mettre en relief la démarche de conception proposée nous allons revoir, en premier lieu, la problématique étudiée dans le chapitre précédent qui porte sur la formation de cellules avec gammes alternatives. En second lieu, nous allons présenter une étude de cas relative au problème de traitement des EE. En partant d'une solution initiale de répartition des machines en cellules comportant des EE, nous avons utilisé la simulation permettant d'évaluer puis d'améliorer la performance des cellules de production. Deux stratégies, basées sur l'optimisation des coûts de transfert et d'investissement, ont été étudiées: la première consiste à admettre les machines exceptionnelles et la seconde traite le cas de dupliquer ces machines pour éliminer les transferts entre cellules (Hachicha et al. 2007). Pour la cohérence de ce chapitre, nous avons intégré une description des différentes méthodes d'évaluation des performances et plus particulièrement la méthode par simulation, un état de l'art relatif à l'utilisation de la CA et aux problèmes de traitement des EE.

## **2. Le choix d'une approche de conception**

### **2.1 Les processus de conception**

Concevoir un produit c'est « passer de l'expression d'un besoin à la définition des caractéristiques d'un objet permettant de le satisfaire et à la détermination de ses modalités de fabrication. Le futur produit passe par une série d'états » (Jeantet, 1998).

La conception en tant qu'activité est une transformation provoquant un changement d'état du produit. Pour (Mistree et al. 1990), il s'agit d'un procédé de conversion d'information qui caractérise les besoins et exigences pour un artefact, en connaissance sur le produit. (Suh, 1990) définit la conception comme l'interaction entre ce que nous voulons réaliser, et comment nous voulons le réaliser; c'est-à-dire la transformation d'exigences fonctionnelles en paramètres de conception. Enfin, selon (Ullman, 2003) la conception est l'évolution technique et sociale de l'information, ponctuée par des prises de décision. Les représentations abstraites évoluent vers un artefact physique.

(Wood et Greer, 2001) indiquent que la conception peut être également vue comme un processus. Un processus de conception est une séquence d'activités de conception, nécessaires pour créer une ou plusieurs représentations du produit. L'objectif d'un processus de conception est de synthétiser des systèmes qui réalisent les fonctions et les performances désirées. Il existe d'une part des modèles descriptifs, qui décrivent le

déroulement du travail. Les modèles prescriptifs d'autre part, à l'image de celui de (Pahl et Beitz, 1996), proposent une approche plus algorithmique et une procédure systématique à suivre. Mais dans les deux cas, la conception est conduite au travers de phases différenciées par le niveau d'abstraction de la représentation du produit.

Il existe plusieurs descriptions de processus de conception, nous retiendrons les plus caractéristiques et plus répandues (Scaravetti, 2004) : conception systématique, conception axiomatique (CA) et la conception robuste. Il est à remarquer qu'il existe aussi plusieurs outils et méthodes abordables dans ces approches tels que la théorie TRIZ (*Theory of Inventive Problem Solving*), l'analyse fonctionnelle, le diagramme FAST (*Functional Analysis System Technique*), etc.

### 2.1.1 La conception systématique (ou algorithmique)

Selon l'approche systématique décrite par (Pahl et Beitz, 1996), le but de la conception est de mettre en place une méthodologie compréhensive, pour toutes les phases de conception et développement de systèmes techniques. Ce modèle prescriptif est issu des directives VDI. (Société des ingénieurs Allemands) (VDI, 1987).

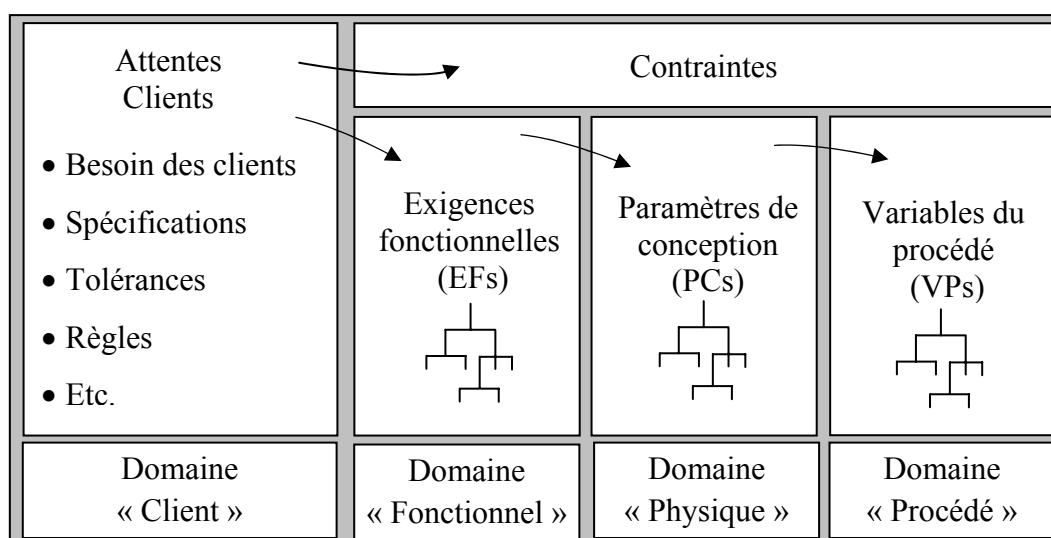
Le processus de conception que ces auteurs décrivent est divisé en phases :

- 1- Clarification de la tâche : phase de spécification d'informations dans une liste d'exigences.
- 2- "*Conceptual design*", recherche de concepts : phase de recherche de la structure fonctionnelle et de solutions de principe, combinées ensuite en concepts; puis définition du concept, exploration, évaluation et sélection. Cette phase détermine une solution de principe.
- 3- "*Embodiment design*" ou "*Layout design*", conception architecturale : les concepts sont traduits en architectures. Pendant cette phase sont déterminés les choix structuraux, les choix de composants et de leurs paramètres pertinents, ainsi que les principales dimensions du système. Outre l'arrangement de composants, les formes et matériaux sont également déterminés, avec la prise en compte de critères économiques.
- 4- "*Detail design*", conception détaillée : phase de production de plans et spécifications détaillés, de mise en place du process de fabrication et contrôle.

### 2.1.2 La conception axiomatique

Au MIT (*Massachusetts Institute of Technology*, États-Unis), Suh (Suh, 1990) a développé la conception axiomatique (*axiomatic design*) qui se base sur des axiomes pour prendre de bonnes décisions dans le processus de conception. La CA repose sur l'existence de principes de conception (axiomes), de domaines, de structure hiérarchique. Selon (Suh, 1990), il existe, comme l'indique la figure 4.2, quatre domaines dans le monde de la conception :

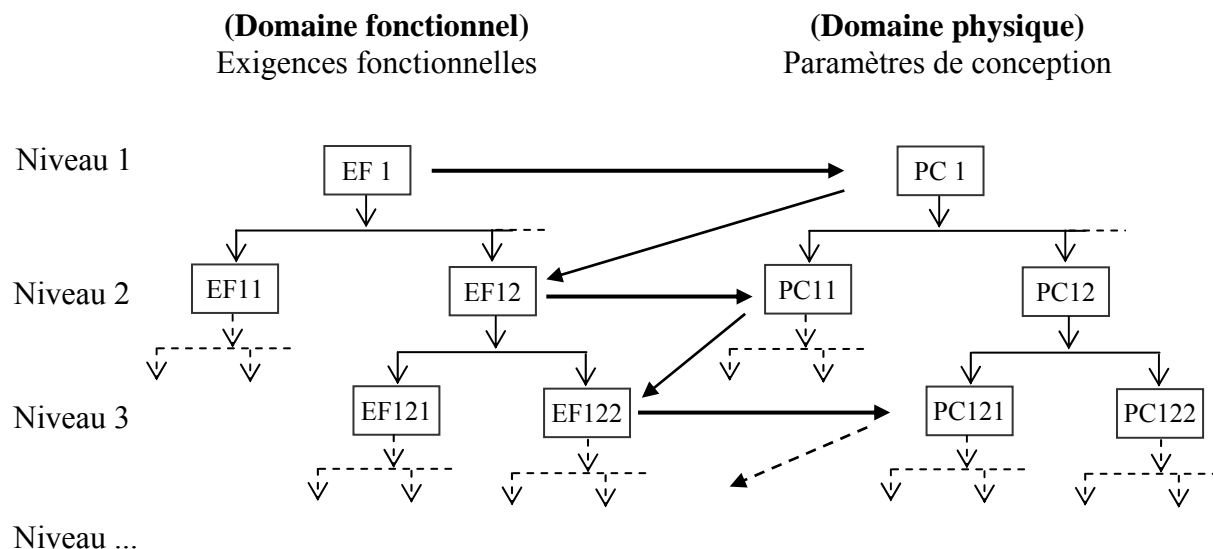
- Le domaine « client » où sont listées ses attentes (attentes des Clients : AdC).
- Le domaine « fonctionnel » où sont listées les Exigences Fonctionnelles (EFs) et des contraintes.
- Le domaine « physique » où sont listés les Paramètres de Conception (PCs) : dans les niveaux hiérarchiques les plus bas, les PCs sont des pièces, des spécifications précises de géométrie, de matériaux, de tolérance. Au plus haut niveau, les PCs ne sont pas nécessairement physiques mais peuvent représenter des solutions de principe ou des concepts. Le domaine « procédé », où sont listées les Variables du Procédé de fabrication (VPs). Lorsque les ACs sont identifiées, elles sont exprimées sous forme de fonctionnalités (EF) dans le domaine fonctionnel. Les PCs satisfaisant les EFs sont définis dans le domaine physique, ainsi que les VPs dans le domaine « procédé ». Il y a ainsi un traitement continu d'information entre et dans les domaines distincts (Engelhard, 2000).



**Figure 4.2** Relation entre les domaines de conception (Suh, 2001)

La description de chaque domaine évolue de concepts en informations détaillées, d'une manière descendante, en zigzagant entre deux domaines (voir la figure 4.3). Les

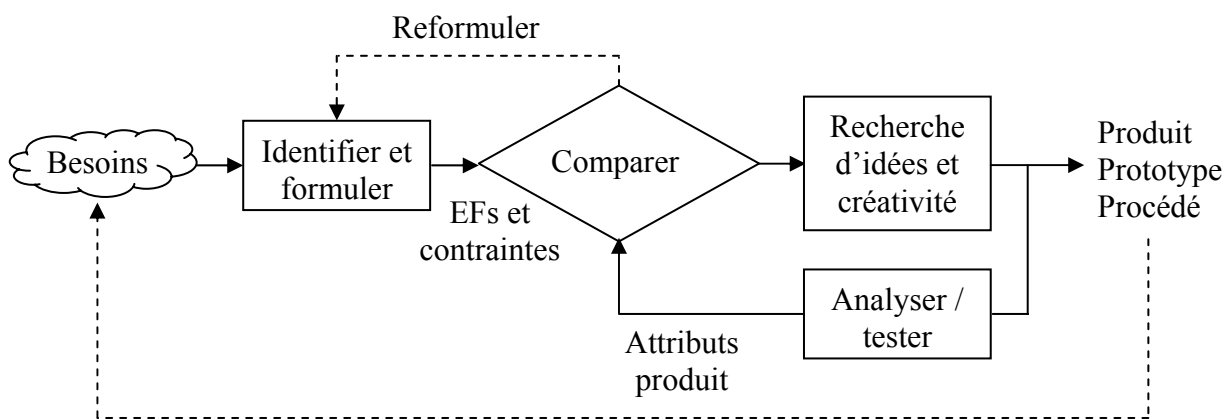
hiérarchies fonctionnelles et physiques sont interdépendantes, et il n'est pas possible de construire la hiérarchie fonctionnelle complète sans se référer au domaine physique à chaque niveau. La définition des PC de niveau système est nécessaire pour que les EFs du niveau inférieur puissent être définies. Cette nature hiérarchique des problèmes de conception est le concept le plus important de la CA.



**Figure 4.3** Zig-Zag entre les domaines selon la conception axiomatique (Suh, 2001)

Suh propose de détecter les conceptions « couplées » (dépendances des EFs), inacceptables au sens de CA. Toutefois, l'étape de matérialisation des exigences fonctionnelles en paramètres de conception n'est pas très détaillée.

La figure 4.4 représente le processus de conception selon le point de vue de la CA. Ce processus de définition est d'une part itératif, il est centré sur la définition et l'optimisation des EFs. D'autre part, il est séquentiel entre les quatre domaines comme nous l'avons présenté dans la figure 4.2.



**Figure 4.4** Processus de la conception axiomatique (Suh, 1990)

La CA est basée sur deux axiomes qui permettent l'évaluation et le choix des meilleures alternatives de solution :

(1) L'axiome d'indépendance : les EFs doivent être indépendantes les unes des autres. Ainsi on évite l'amélioration d'une fonction en dégradant une autre.

Les conceptions qui ne satisfont pas l'axiome d'indépendance sont dites couplées. Le couplage fonctionnel ne doit pas être confondu avec le couplage physique (qui est souvent désirable pour satisfaire l'axiome suivant).

Selon Suh, les EFs doivent être indépendantes. Toutefois, il y a forcément des liens entre les PCs satisfaisants des EFs indépendantes. L'axiome d'indépendance permet de décomposer un problème complexe en sous problèmes indépendants, de complexité acceptable. La décomposition réduit la complexité d'un problème de conception et aide le concepteur à se concentrer sur un plus petit nombre d'exigences fonctionnelles (Suh, 1990).

(2) L'axiome d'information : une bonne conception correspond à un minimum d'information et à une complexité minimale. Suh donne l'exemple de l'aile d'oiseau : les tentatives de l'homme pour reproduire cette aile ont échoué ; il y a en effet trop d'exigences fonctionnelles. Les frères Wright ont eu le génie de minimiser les EFs, en ne retenant que celles nécessaires au décollage presque horizontal, au vol lent et à des changements de direction limités. Mathématiquement, la relation entre les EFs et les PCs est exprimée à l'aide de l'équation (32)

$$(EF) = |A| (PC) \quad (32)$$

Avec :

(EF) : le vecteur des exigences fonctionnelles

(PC) : le vecteur des paramètres de conception

$|A|$  : la matrice de conception

Pour satisfaire l'axiome de d'indépendance, la matrice de conception doit être diagonale ou triangulaire. Dans le cas où la matrice est diagonale, la conception est dite non couplée. Dans le deuxième cas, elle est couplée.

### 2.1.3 La conception robuste

La conception robuste (*robuste design*) développée par Genichi Taguchi, met l'accent sur l'obtention d'une conception « robuste »: Un plan d'expérience portant sur des paramètres de conception et des facteurs de bruit (simulant les perturbations que le système risque de rencontrer) permet de déterminer les valeurs à affecter aux paramètres afin de minimiser la sensibilité à ces bruits. Pour plus de détails, nous invitons le lecteur à revenir à la troisième section du chapitre précédent. Il est à noter que récemment (Xiao et Cheng, 2008) ont prouvé analytiquement une forte relation entre la CA et la conception robuste.

### 2.2 Comparaison des processus de conception et justification du choix

Dans le *conceptual design* des directives VDI, adaptées par (Palh et Beitz, 1996), l'accent est mis sur les fonctions. Cette phase doit permettre d'obtenir un concept, ou un ensemble de concepts combinés, capable de remplir les fonctions. L'étude du comportement énergétique est également utile dans cette phase. La réalisation d'une fonction induit une transformation d'énergie, de matière et d'information (des objectifs d'ordre esthétique par exemple ne peuvent donc pas être traités). La fonction globale est décomposée en sous fonctions principales (qui contribuent directement à la fonction globale) ou auxiliaires. Cette distinction n'est toutefois pas forcément facile à faire (Oosterman, 2001). Elle affecte l'ordre de résolution de problème. Il est judicieux de commencer à traiter le flux principal entre les fonctions principales. La structure fonctionnelle mise en place facilite la décomposition du problème et la mise en évidence de parties pour lesquelles des solutions existent.

L'approche systématique favorise d'abord une décomposition descendante de la fonction principale (domaine des EFs), avant d'approcher de manière ascendante la solution finale dans le domaine des PCs. Toutefois, il apparaît qu'une fonction ne peut pas être décomposée sans considérer sa traduction physique à chaque niveau.

Contrairement avec la CA, il existe un processus nécessaire d'itération entre les exigences fonctionnelles et les attributs de conception physiques. Il n'est pas suffisant de définir un jeu d'EFs et de procéder à leur traduction en paramètres de conception. Ces PC doivent pouvoir influencer la forme et le contenu des EFs. La définition des PC de niveau système est nécessaire pour que les EFs du niveau inférieur puissent être définies, etc. Chaque niveau doit être achevé pour passer au niveau inférieur.



Les hiérarchies fonctionnelles et physiques sont interdépendantes, et il n'est pas possible de construire la hiérarchie fonctionnelle complète sans se référer au domaine physique à chaque niveau.

La CA s'oppose ainsi à d'autres approches considérant que la conception requiert de l'expérience et ne peut être enseignée ou modélisée (Lossack et Grabowski, 2000). L'approche axiomatique de la conception a pour objectif de généraliser les règles de conception par des théorèmes et des corollaires.

### **3. Proposition d'une démarche de conception**

#### ***3.1 Etat de l'art relatif à la conception axiomatique***

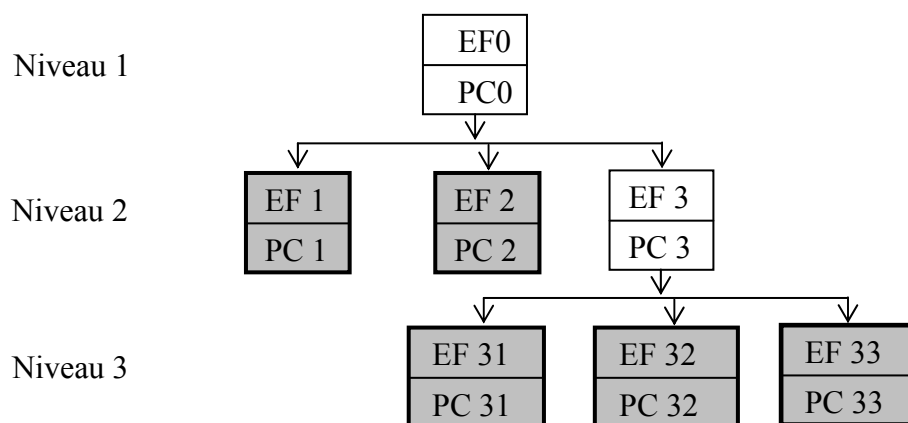
La CA est utilisée dans plusieurs disciplines tel que systèmes mécaniques, systèmes de production, les systèmes d'information, logiciels, etc. Suh (1990) est le premier qui a avoir proposé les principes de la CA. (Gebala et Suh, 1992) et (Albano et Suh, 1992) ont proposé plusieurs modèles pour l'aide en conception des structures en génie civil. (Kim et al. 1991) ont appliqué la CA pour le développement d'un logiciel de conception. Les EFs sont les sorties de ce logiciel et les PC sont les entrées clefs qui caractérise ces EFs. (Babic, 1999) propose un système d'aide à la décision pour l'implantation des machines pour les systèmes flexibles de production. (Chen et al. 2001) ont modélisé un système à base de connaissance à l'aide de la CA pour améliorer les performances d'une cellule de production. (Houshmand et Jamshidnezhad, 2002) propose l'utilisation de la CA pour la conception d'un système de production en juste à temps. Plusieurs autres travaux récents ont traité l'utilisation de la CA pour la conception des systèmes de production comme (Cochran et al. 2000), (Gonçalves-Coelho et Mourao, 2007) et (Durmusoglu et Kulak, 2008). En particulier, pour la conception des systèmes de production cellulaires, (Kulak et al. 2005) ont proposé une démarche de conception pour transformer un aménagement fonctionnel en un aménagement cellulaire. En conclusion, toutes ces études montrent l'intérêt que porte la CA qui lie indépendamment les EFs aux PCs correspondants.

#### ***3.2 Application de la conception axiomatique***

En appliquant, la démarche de la conception axiomatique, le diagramme de conception proposé est indiqué dans la figure 4.5. Chacune des étapes consiste à définir les exigences

fonctionnelles du système à concevoir dans le domaine fonctionnel. Il est à remarquer que, chaque exigence fonctionnelle établie à ce stade peut mener à une conception complètement différente de l'AC. Pour chacune des EFs identifiée, il est nécessaire de l'affecter un seul paramètre de conception. Les principes de la CA recommandent de revenir, à chaque fois, au domaine fonctionnel pour décomposer encore le(s) EFs en d'autre(s) EF(s) du niveau plus bas.

Dans ce travail, nous avons choisi comme exigence fonctionnelle du niveau le plus élevée : *EF0 : Grouper les produits et les machines pour une performance optimale tout en respectant la demande des clients.*



**Figure 4.5** Diagramme de décomposition en EFs et PCs

Un seul paramètre de conception a été sélectionné pour satisfaire l'exigence fonctionnelle *EF0 : PC0 : Procédure pour grouper les machines nécessaires et les produits en familles*

Le couple (EF0, PC0) est décomposé en trois couples (EF1-PC1), (EF2, PC2) et (EF3, PC3) :

*EF1 : Sélectionner la gamme préférentielle pour chaque produit.*

*FR2 : Partage des produits en familles et groupement des machines en cellules.*

*FR3 : Dimensionner, implanter les machines nécessaires et améliorer les performances du système de production cellulaire.*

*PC1 : Machine d'incidence produits–machines avec toutes les gammes alternatives.*

*PC2 : Technique de regroupement des types de machines et des produits.*

*PC3 : Paramètres de production et de coût et indicateurs de performance.*

La matrice de conception correspondante qui fournit les équations linéaires entre les différentes EFs et les PCs associés est indiquée dans l'équation (33). Il est nécessaire de

s'assurer que la matrice de conception construite satisfait les principes de la CA (Suh, 1990). Le symbole « X » indique une valeur non nulle. La matrice identifiée est de type triangulaire inférieure ce qui affirme le respect de l'axiome d'indépendance. En plus, cette configuration permet d'avoir une démarche de conception séquentielle.

$$\begin{pmatrix} \text{EF1} \\ \text{EF2} \\ \text{EF3} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \text{X} & 0 & 0 \\ \text{X} & \text{X} & 0 \\ \text{X} & \text{X} & \text{X} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{PC1} \\ \text{PC2} \\ \text{PC3} \end{pmatrix} \quad (33)$$

En appliquant ces étapes à chacune des paires identifiées, nous avons constaté que la paire (EF3-PC3) doit être encore décomposée en trois couples (EF-PC) :

*FR31 : déterminer le nombre de machines nécessaire de chaque type de machine*

*FR32 : grouper les machines dans les cellules*

*FR33 : éliminer ou traiter les EE*

*DP31 : données de production*

*DP32 : méthode d'implantation des machines*

*DP33 : les stratégies de traitement des EE*

De la même manière que précédemment, la matrice de conception relative à cette deuxième décomposition est de type triangulaire inférieure, comme présentée dans l'équation (34). Toutes les EFs et les PCs identifiés pour la conception des AC sont récapitulés dans la figure 4.5.

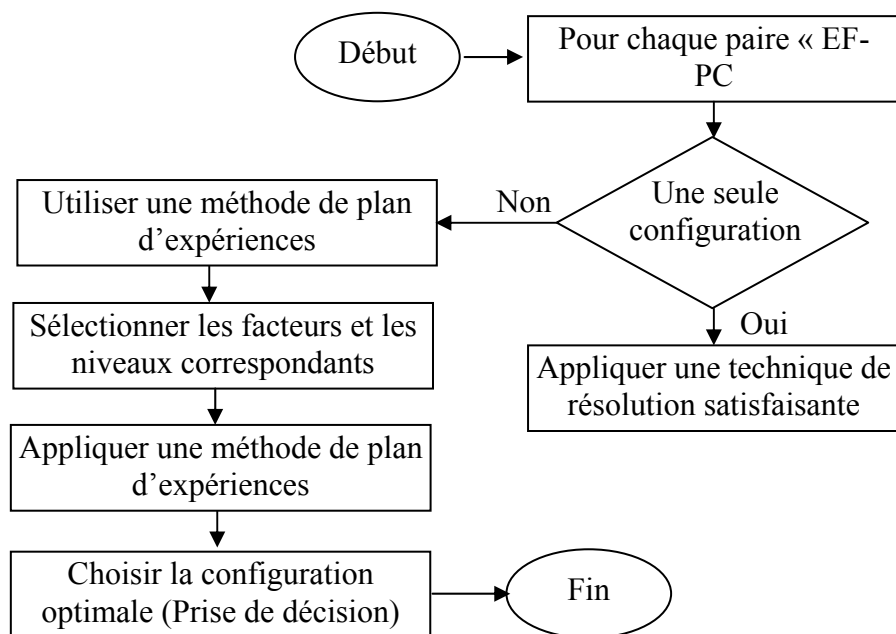
$$\begin{pmatrix} \text{EF31} \\ \text{EF32} \\ \text{EF33} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \text{X} & 0 & 0 \\ \text{X} & \text{X} & 0 \\ \text{X} & \text{X} & \text{X} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{PC31} \\ \text{PC32} \\ \text{PC33} \end{pmatrix} \quad (34)$$

L'approche de conception que nous avons proposée consiste à résoudre les paires d'extrémité dans leurs ordres : EF1-PC1, EF2-PC2, EF31-PC31, EF32-PC32 et EF33-PC33. Il est à remarquer que, parmi ces cinq paires identifiées, il y a des paires, comme EF1-PC1, nécessite un choix entre plusieurs configurations possibles. C'est à ce stade là, que nous avons recommandé d'utiliser les méthodes de plan d'expériences.

### 3.3 Intégration de la méthode des plans d'expériences

La figure 4.6 indique la procédure d'intégration des méthodes des plans d'expériences pour les différentes paires d'extrémité (EF-PC) identifiées et qui prévoient plusieurs configurations possibles à appliquer.

Prenant la première paire identifiée (EF1 - PC1) qui correspond au problème de formation des cellules avec gammes alternatives. L'exigence fonctionnelle est EF1 : Sélectionner la gamme préférentielle pour chaque produit et le paramètre de conception est PC1 : Machine d'incidence produits–machines avec toutes les gammes alternatives. D'après la figure 4.5, cette paire nécessite le recours à l'utilisation d'une méthode de plan d'expériences pour choisir la configuration optimale. Nous revenons ainsi à mettre en relief l'approche que nous avons proposée dans le chapitre précédent. Une fois les gammes préférentielles sélectionnées, il suffit d'appliquer l'une des méthodes de formation de cellules et revenir par la suite à la paire (EF2-PC2).



**Figure 4.6** Intégration des méthodes des plans d'expériences

## 4. Traitement des éléments exceptionnels

Dans cette section, nous allons étudier le couple (FR33, PC33) qui correspond en littérature au problème de traitement des EE. Plusieurs méthodes de traitement de cellules sont possibles, c'est pourquoi, il est possible d'envisager l'utilisation de la méthode des plans d'expériences.

#### 4.1 Etat de l'art

Plusieurs travaux de recherches tels que (Wemmerlöv et Hyer, 1986), (Slim et al. 1998) présente un état de l'art des méthodes de formation de cellules de production. Il indique, pour n'importe quelle méthode utilisée, qu'il est rare de trouver des cellules complètement indépendantes.

La littérature spécifique à la conception des cellules de production peut être scindée en trois catégories. La première grande catégorie ignore complètement le problème de traitement des EE. La deuxième catégorie expose l'importance de l'indépendance des cellules juste à titre de recommandations ou de perspectives. Enfin, la troisième catégorie suggère que le traitement des EE est indispensable pour atteindre les objectifs encourus de la TG. De cette étude bibliographique, nous remarquons d'une part, l'existence de quelques scénarios de traitement. D'autre part, nous distinguons aussi quelques méthodes de résolution.

(McAuley, 1972) est le premier qui a avoir incorporé le problème de traitement des EE à la solution finale de formation des cellules. Il propose le scénario de duplication des machines exceptionnelles. Autrement dit, il suppose que chaque machine goulot ou exceptionnelle doit être dupliquer pour éliminer les mouvements intercellulaire. (Seifoddine, 1989) a présenté une méthodologie pour la duplication des machines exceptionnelles mais il est clair que ce scénario n'est pas toujours le plus économique.

(Burbidge, 1975), (King, 1980) et (Chan et Milner, 1982) ont proposé, en plus de la duplication des machines exceptionnelles, trois autres scénarios tel que :

- (1) la modification du routage des produits exceptionnels
- (2) la construction d'une cellule spécifique qui traite des EE, appelé « *remainder Cell* »
- (3) l'acceptation des mouvements intercellulaires.

(Kusiak, 1987) propose la sous-traitance des produits exceptionnels comme une alternative pour l'élimination des EE. D'autres auteurs comme (Slim et al. 1998) et (Foulds et al. 2006) indiquent qu'il est très important en pratique industrielle de modifier les options techniques ou technologiques des machines clés pour éliminer les EE. Ce problème connu en littérature par « *the sustainable cell formation problem* » n'est pas traité dans ce travail de thèse car il suppose que les machines peuvent être conçues ou modifiables pour les cellules ainsi formées.

En résumé, nous pouvons conclure que la seule stratégie possible d'élimination des EE est la duplication des machines exceptionnelles. Cette stratégie doit être comparée à celle qui autorise les mouvements intercellulaires. Dans ce contexte de choix, (Shafer et al. 1992) présentent un modèle basé sur une programmation linéaire pour choisir entre la duplication des machines exceptionnelles, la sous-traitance des produits exceptionnels et l'autorisation des EE.

## **4.2 Evaluation des performances**

Le recours à l'évaluation des performances d'un système de production est nécessaire avant toute prise de décision, l'objectif étant l'optimisation de sa performance. Cette évaluation représente la mesure de l'impact d'une décision sur le système ou l'influence de perturbations modifiant son état. Les acteurs de la productique s'accordent sur le fait que, dorénavant, l'analyse, la conception et l'exploitation des systèmes de production ne peuvent être menées à bien sans une assistance méthodique.

La performance d'un système de production peut s'analyser selon trois points de vue : le niveau physique, le niveau marchand ou commercial et le niveau financier (Burlat, 2001). Dans ce travail de thèse, nous focalisons notre étude sur le niveau physique. Dans ce dernier trois types de mesures sont fréquemment retenus : les cycles de fabrication, le taux d'utilisation des ressources et les niveaux de stock et d'en-cours. Pour évaluer ces indicateurs de performance, plusieurs méthodes et modèles d'évaluation sont possibles.

Evaluer signifie « déterminer une quantité par le calcul sans avoir recours à la mesure directe » (Burlat, 2001). Ceci suppose que l'évaluation soit effectuée à l'aide d'un modèle qui peut être expérimental, mathématique, de simulation, etc. Evaluer implique également le recours à un objectif et un indicateur de performance qui fournit une donnée quantifiée mesurant l'efficacité du système, donc son aptitude à générer une performance.

### **4.2.1 Les indicateurs de performance**

Une distinction fondamentale entre les notions de « mesure » et d'« évaluation » doit être faite lors de l'appréhension de la performance. En effet, la mesure conserve un rôle important, mais s'en tient aux effets. L'évaluation est de portée plus générale : on tente de remonter aux causes et on se prononce également sur les objectifs et leur mise en œuvre. Évaluer, c'est assigner une valeur bonne ou mauvaise, meilleure ou pire, à une entité ou à un événement. Ce n'est donc pas simplement mesurer la valeur intrinsèque des

objets, c'est établir un ordre de préférence, autrement dit, certains rapports des sujets aux objets (Burlat et al. 2003).

Les entreprises sont des organismes assez complexes pour que la performance soit perçue de différentes manières selon les acteurs. Cependant, des objectifs dits stratégiques peuvent être considérés et matérialisés par des objectifs opérationnels. Pour chacun de ces objectifs, on peut définir un ou plusieurs critères de performance. La cohérence entre les critères de performance assure la bonne performance globale du système.

Par ailleurs, dans le contexte caractérisé par une forte compétitivité et une production en petites séries, il serait intéressant de considérer le respect des délais de livraison comme objectif principal. Ainsi, il faudrait minimiser les retards par rapport aux délais de livraison et également les avances qui peuvent entraîner des coûts additionnels de stockage. Pour des raisons de simplification, ces derniers coûts sont supposés généralement négligeables et les délais de livraison sont considérés serrés. De ce fait, l'indicateur de performance principal approprié serait donc le temps de séjour moyen (TSM) ou encore en anglais *Mean Flow Time*. Le temps de séjour d'un lot est la différence entre l'instant où le lot quitte le système et l'instant où il a été introduit dans ce même système. L'objectif serait donc de minimiser ce temps de séjour moyen.

Un autre indicateur est fréquemment cité est l'encours WIP (Work In Process). Cet indicateur caractérise la fluidité du flux des produits dans le système. Il a été mesuré de différentes manières :

- Quantité de stock d'encours : c'est le nombre de produits en cours de production par le système : les produits en attente dans les stocks tampons, ceux en cours de transfert, produit en contrôle qualité etc.
- Nombre moyen de produits se trouvant dans le système entrain d'être fabriqué, pondéré par le temps passé par ces produits dans le système.
- La somme des temps de réglage ainsi que les temps de production passés par les produits qui sont actuellement en production dans le système.

D'autres indicateurs sont nécessaires pour localiser les goulots d'étranglement :

- L'utilisation moyenne d'une machine : Elle est définie comme étant la somme des temps de production effective et des temps de réglage de cette machine divisée par le temps de travail disponible (Faizul et al. 2001).
- L'attente : Avant d'être traités, les lots de produits peuvent passer beaucoup de temps dans les files d'attente. (Flynn et Jacobs, 1986) ont évalué l'attente de différentes

manières : le nombre moyen de lots ou de produits en attente dans la file d'attente (*average number waiting*) ou le temps moyen d'attente passé par chaque lot ou par chaque produit (*average waiting time*).

#### **4.2.2 Les modèles d'évaluation des performances**

Les trois approches classiques d'évaluation des performances des systèmes de production sont: les mesures directes, les méthodes analytiques et la simulation informatique. Trois types de modèles découlent des grandes approches de modélisation : modèle analytique avec résolution analytique, modèle analytique avec résolution numérique et modèle de simulation avec résolution numérique.

##### **4.1.2.1 Modèle analytique avec résolution analytique**

Le modèle du système étudié est une fonction dont on peut calculer directement l'optimum. Ce cas est très rare dans le domaine des systèmes de production et demande des hypothèses extrêmement restrictives. Toutefois, il présente l'avantage d'offrir une résolution directe. Les modèles de ce type les plus connus dans le domaine de la gestion industrielle sont le modèle de Wilson pour la gestion de stock et les théorèmes de files d'attente issus des travaux de Jackson.

##### **4.1.2.2 Modèle analytique avec résolution numérique**

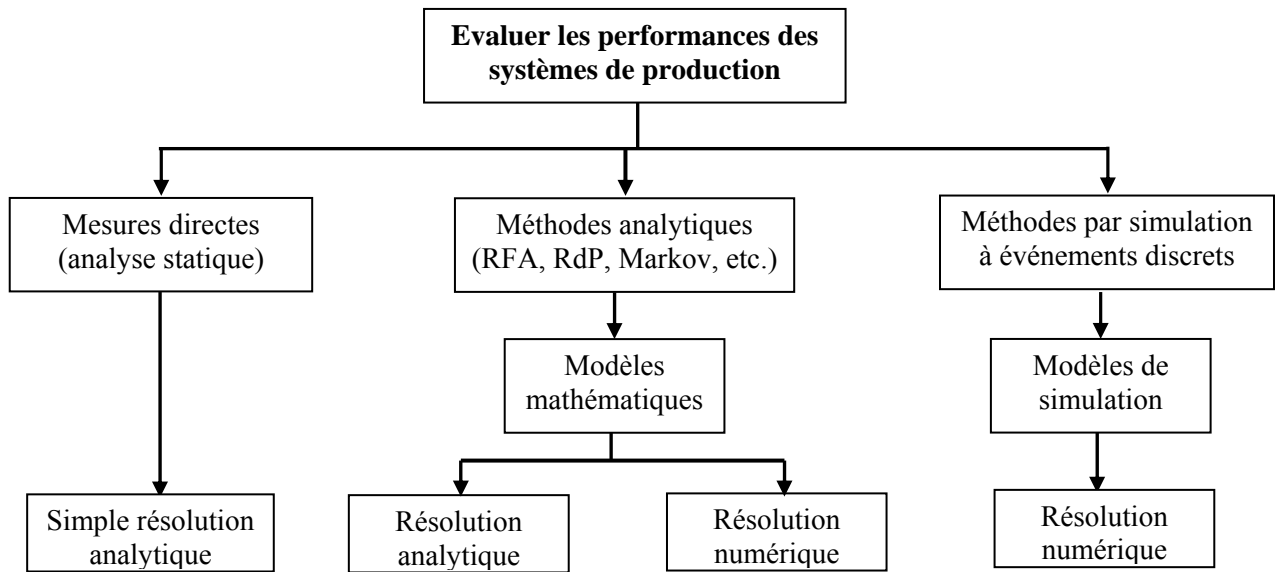
Le modèle est exprimé via une fonction mathématique plus ou moins complexe. L'évaluation de cette fonction en chacun des points donnés ne pose généralement que très peu de problèmes mais l'expression de son optimum est inconnue. Soit par dichotomie, soit par méthode numérique ou soit par heuristique, des campagnes d'essai-erreur sont nécessaires, où l'on espère que la ou les solutions suivantes seront meilleures. Il s'agit de la plupart des méthodes et problèmes du domaine de la recherche opérationnelle classique.

##### **4.1.2.3 Modèle de simulation avec résolution numérique**

Le modèle n'est plus analytique et implique souvent une approche stochastique, des phénomènes de file d'attente et des décisions à prendre en temps réel en fonction de l'état du système. Dans ce cas, nous avons recours à la simulation pour évaluer la performance du système. En ce qui concerne l'optimisation elle-même, des campagnes d'essai-erreur sont nécessaires cette fois encore. La difficulté est accrue du fait que certaines propriétés de continuité que l'on pouvait espérer lors d'utilisation de modèles analytiques n'ont plus



lieu d'être. De plus, des variables non numériques ou des choix structurels peuvent intervenir.



**Figure 4.7** Méthodes d'évaluation des performances des systèmes de production.

La figure 4.7 indique les trois classes de méthodes possibles pour l'évaluation des systèmes de production qui se résument comme suit :

- **Mesure directes (Analyse statique des flux)** : elle consiste à établir un dimensionnement statique c'est-à-dire appliquer des règles simples (règle de trois, bons sens, règles issue de la pratique). Cette méthode est largement appliquée notamment dans les petites entreprises.
- **Méthodes analytiques exactes ou approchées** : elles se basent sur la modélisation du système et permet d'effectuer des calculs et d'appliquer des algorithmes. Les outils utilisés dans cette méthode sont généralement : chaîne de Markov, réseaux de Pétri, réseaux de file d'attente, etc. L'ordonnancement est un outil pour piloter les flux au quotidien.
- **Méthode par simulation** : la simulation des flux (simulation des systèmes dynamiques à évènements discrets) consiste à modéliser le système, le traduire dans un programme informatique qui s'exécute pas à pas, à améliorer les performances du système. C'est un outil d'aide à la décision.

(Ait Hassain, 2000) indique que l'utilisation de la méthode de simulation pourra être la seule possible pour l'amélioration des performances des systèmes de production et ceci pour les raisons suivantes :

- Aspect complexité : dans un modèle de simulation, on peut traiter l'intégralité des problèmes ensemble : ordonnancement, pilotage des flux, dimensionnement, implantation, etc.
- Aspect stochastique : modélisation réaliste du système de production, en permettant de tenir compte des diverses incertitudes qui pourront affecter le fonctionnement du système : panne machines, absentéisme, fluctuation des demandes, non qualité, etc.
- Aspect dynamique : la possibilité d'avoir des paramètres du modèle qui évoluent dans le temps tels que les temps opératoires, temps de réglages, etc.

### **4.3 L'évaluation des performances par simulation**

Selon (Banks et al. 2001), Shannon a défini la simulation comme « la procédure de conception du modèle d'un système réel et son expérimentation à l'aide de ce modèle afin de soit de comprendre le comportement de ce système, soit d'évaluer les stratégies de contrôle de ce système ».

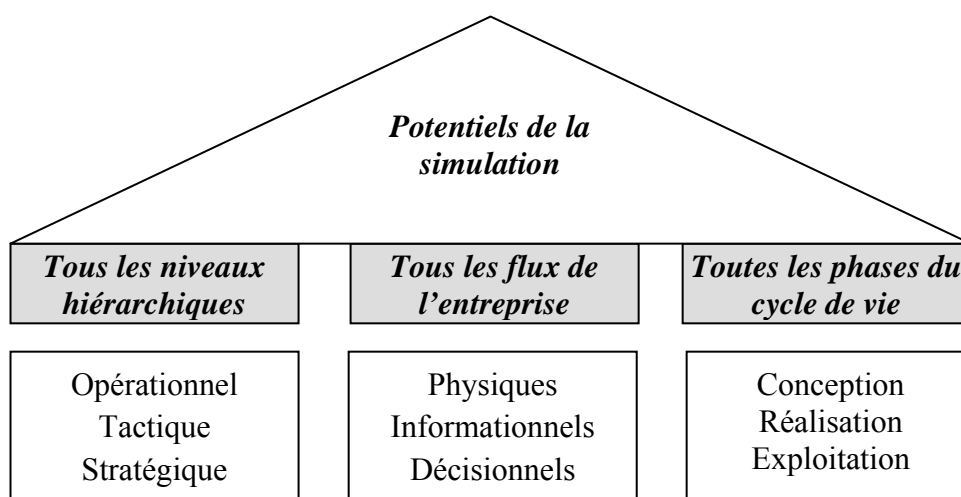
Une synthèse de différentes définitions de la simulation est proposée dans (Bakalem, 1996) : *la simulation est une méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène ou un système à étudier par un modèle informatique plus simple mais ayant un comportement analogue*. Ce modèle permet de réaliser des tests afin de cerner le comportement dynamique du système étudié. Il est implémenté sur ordinateur, et évolue d'un état vers un autre en fonction de certaines règles de changement d'état bien définies. La simulation est une technique expérimentale appropriée à l'étude des systèmes de grande taille composés de plusieurs éléments en interaction. Elle permet ainsi de répondre à certains problèmes à chaque fois que l'expérimentation en grandeur nature se révèle impossible et/ou trop coûteuse (Bel et Kieffer, 2001). Il est nécessaire de mentionner que la simulation permet de répondre à des questions de type « Qu'obtiendra-t-on si l'on fait ceci ? », mais ne permet pas de répondre à des questions de type « Que faut-il faire pour obtenir cela ? ».

#### **4.3.1 Utilisation de la simulation**

L'utilisation la plus fréquente de la simulation, en entreprise permet d'évaluer les effets suivants : suppression/adjonction de machines/de main d'œuvre, modification du processus de fabrication (gammes, temps de préparation, etc.), présence d'aléas de fabrication (pannes machines, rupture des stocks, commandes urgentes, etc.), capacité des

stocks, ordonnancement (politiques de lancement, règles de gestion des files d'attente, affectation des ressources, etc.), insertion de nouveaux produits / suppression de produits existants, etc.

Son potentiel est encore plus vaste, permettant de représenter tous les niveaux hiérarchiques de l'entreprise, tous ses flux, mais également toutes les phases du cycle de vie d'un système de production (figure 4.8). Cette technique est une aide à la prise de décision puissante pour répondre aux différentes questions que se pose les industriels (Habchi et Berchet, 2003). En effet, la simulation peut être aussi utilisée pour étudier un système durant le stade de conception, et avant qu'il soit construit. Ainsi, la simulation peut être seulement utilisée comme outil d'analyse pour prédire l'effet des changements sur la performance d'un système existant, mais aussi comme un outil d'aide à la conception pour prédire la performance d'un nouveau système sous différentes configurations et modes d'exploitations.



**Figure 4.8** *Les domaines d'application de la simulation*

Concernant le domaine de l'AC, la simulation a été utilisée dans plusieurs situations :

- Le dimensionnement des cellules et plus particulièrement la détermination du nombre de machines nécessaires comme dans (Bullinger et Sauer, 1987), (Kamrani et al. 1998), (Chen et al. 2001), (Irizarry et al. 2001), (Feyzioglu et al. 2005), (Chtourou et al. 2005), (Masmoudi, 2006), etc.
- La comparaison entre l'aménagement fonctionnel, aménagement cellulaire et les aménagements hybrides, comme dans (Shafer et Meredith, 1993), (Burgess et al. 1993), (Shambu et Suresh, 2000), (Faizul et al. 2001), etc.

- L'analyse et l'amélioration des performances des aménagements cellulaires comme dans (Polajnar et al. 1995), (Selen et Ashayeri, 2001), (Masmoudi et al. 2006), (Elleuch et al. 2007), etc.

#### **4.3.2 Démarche classique d'utilisation de la simulation**

La mise en œuvre d'une simulation comprend les étapes suivantes (Law et Kelton, 2000) (figure 4.9) :

##### **1. Analyse du système à étudier et formulation du problème**

Dès la conception, il faut analyser le système, déterminer les «étapes clé» du processus que nous souhaitons étudier, définir les objectifs, et se poser des questions du type «comment» : dimensionner l'atelier ? Organiser l'atelier ? Gérer le flux de produits ? Gérer les ressources ? Piloter la production en temps réel ? etc.

##### **2. Collecte des données nécessaires à la simulation**

- Les données physiques: il faut cerner l'organisation du système, avec le nombre de machines, d'opérateurs, de chariots, les temps d'ouverture, le partage des ressources, le nombre de produits, leur type, leur gamme, etc.
- Les données de gestion: le carnet de commandes, les quantités commandées, les tailles des séries, les dates, les types de flux (poussé, tiré ou tendu).
- Les données de pilotage: les règles d'ordonnancement et de priorité, les aléas de fonctionnement (pannes, absentéisme, dérèglement, etc.) avec leur manière de les repérer (indicateurs de performance) et leurs règles de décision et de plans d'action correspondants, règles d'usure des outils, etc.

##### **3. Construction du modèle de simulation**

Cette étape a pour objectif de construire le modèle sur la base duquel va s'effectuer la simulation. Il s'agit de retranscrire la réalité sous forme de modèles compréhensibles par les utilisateurs. Ce modèle peut être sous forme graphique, sous forme de schémas, etc.

##### **4. Vérification et validation du modèle**

Quand un modèle est traduit en un programme et que l'exécution de celui-ci fournit des résultats, alors deux types de questions se posent (Ait Hssain, 2000). Ces résultats sont-ils conformes aux attentes de l'analyste programmeur ? Correspondent-ils vraiment au système réel et sont-ils crédibles pour l'utilisateur final (manager ou décideur)? Le premier type de questions correspond à la vérification du modèle et le deuxième à sa validation.

## 5. Définition des expériences à effectuer

On définit les conditions d'utilisation du modèle, la stratégie (nombre d'expériences, durée, plans d'expérience,...) et la tactique (conditions initiales, types de résultats, etc.). Dans cette étape, on fait appel généralement, aux techniques des plans d'expériences pour guider les expériences et interpréter les résultats.

## 6. Simulations et enregistrement des résultats

La plupart des modèles de simulation contiennent des variables aléatoires (stochastique). Les résultats générés pour une réplication sont alors semblables à des mesures sur un échantillon statistique. Pour pouvoir utiliser les résultats d'une simulation dans le processus de prise de décision, il est indispensable d'en faire une analyse statistique appropriée.

Etant donné que, dans une simulation, on cherche à effectuer des observations tout en réduisant le plus possible l'erreur d'échantillonnage, ce résultat pourrait théoriquement être obtenu :

- en faisant un très grand nombre d'expériences (longueur de la simulation) pour s'assurer d'avoir atteint un état de régime permanent ;
- en répétant la simulation avec des suites indépendantes de nombres aléatoires, chaque observation constituant une observation. En introduisant des suites indépendantes de nombres aléatoires, nous obtenons des observations indépendantes. L'erreur d'échantillonnage peut être réduite en prenant la moyenne de ces observations.

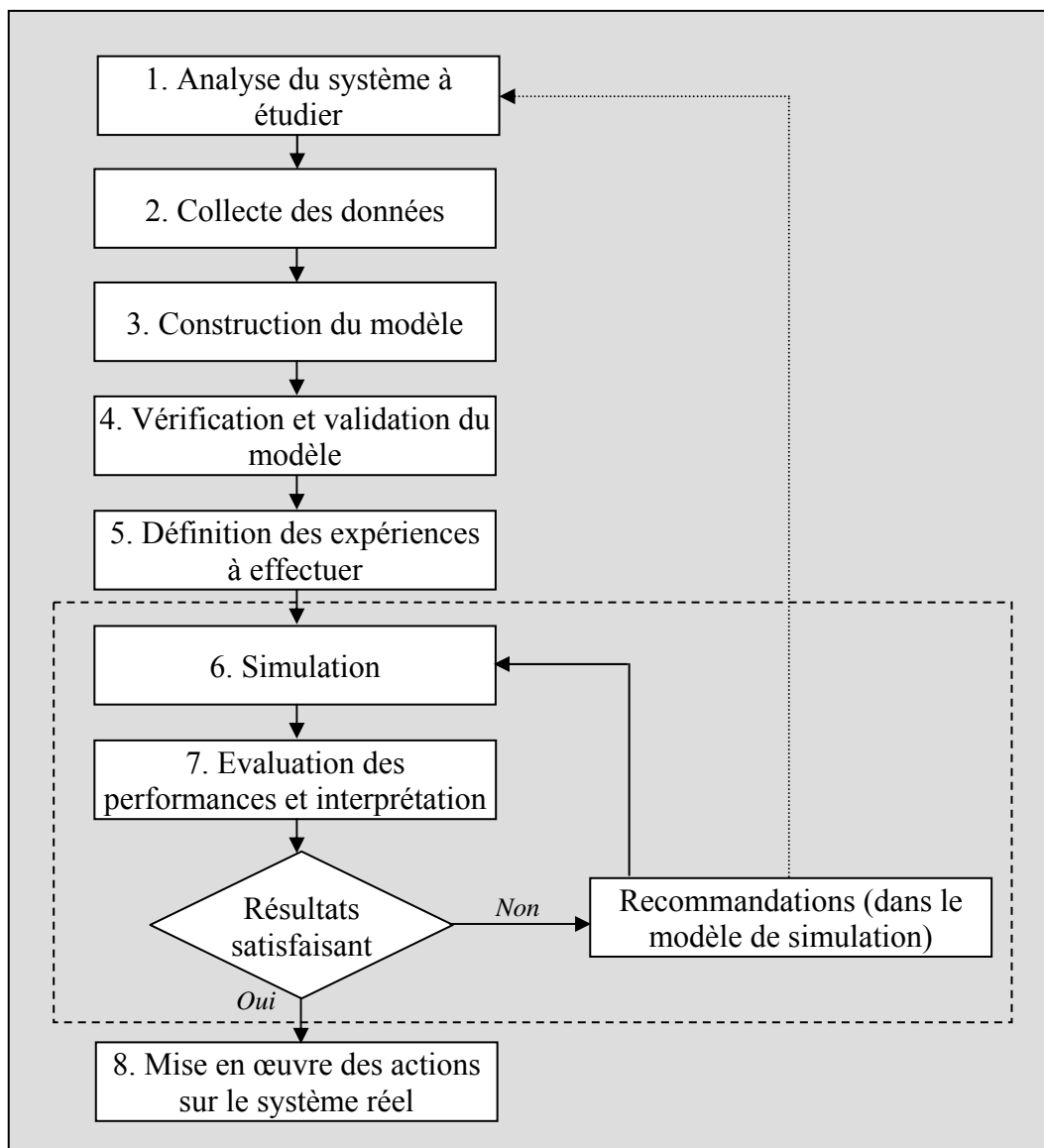
## 7. Evaluation des performances, interprétation des résultats, et recommandations

L'analyse personnelle des résultats est possible à l'aide des indicateurs de performance sous forme de tableaux, courbes, graphiques, histogrammes, etc. Le recours à des outils d'analyse statistiques est parfois nécessaire (analyse de la variance). Cette interprétation permet soit:

- Dans le cas de résultats non satisfaisants, d'émettre des recommandations, comme la remise en question des paramètres ou le cas échéant, des objectifs (Habchi et Labrune 1995). Dans ce cas, ces recommandations (hypothèses de plans d'actions) sont encore à tester et donc à réintroduire dans le modèle de simulation. Il faut ensuite effectuer des expériences de simulation avec ce nouveau paramétrage jusqu'à satisfaction des résultats en terme d'erreur statistique (régime permanent).
- Dans le cas de résultats satisfaisants, de mettre en œuvre les plans d'action sur le système réel (nous passons alors à l'étape suivante).

## 8. Mise en œuvre des plans d'actions sur le système réel

- Les plans d'actions, suite aux divers tests sont à appliquer sur le système réel en fin de simulation, lorsque les différents acteurs – décideurs sont d'accord sur les résultats et sur le choix d'application. Cette application s'effectue toujours en référence aux différentes simulations qui ont dû être documentées. Le cycle de cette démarche d'utilisation de la simulation n'est donc pas linéaire. Le schéma de la figure 4.9 illustre la façon dont ces différentes étapes s'articulent dans la pratique classique



**Figure 4.9** Processus de la simulation

### 4.4. Application de la simulation

Partant d'une solution initiale de répartition des machines en cellules et des produits en

familles en présence d'EE, nous proposons une approche par simulation permettant d'évaluer puis d'améliorer la performance des cellules de production (Hachicha et al. 2007). Deux stratégies ont été étudiées, la première consiste à admettre les EE dans les différentes cellules (S1), la seconde traite le cas de dupliquer les machines exceptionnelles (S2). Il est à noter que dans cette application, nous pouvons considérer le choix entre ces stratégies comme un plan d'expérience à deux expériences seulement.

#### 4.4.1 Présentation du problème

Ce cas pratique traite un système cellulaire initialement proposé par (Shafer et al. 1992). Il est composé de trois cellules : la 1<sup>ère</sup> cellule notée C1 comporte les machines M1, M2 et M3 pour la fabrication des produits P1, P2 et P3. La 2<sup>ème</sup> cellule notée C2 comporte les machines M4 et M5 pour la fabrication des produits P4, P5 et P6. Finalement, la 3<sup>ème</sup> cellule notée C3 regroupe les machines M6, M7, M8 et M9 pour la fabrication des produits P7, P8 et P9, P10. Nous supposons que la capacité de chaque machine type est suffisante pour fabriquer toute la demande annuelle. L'entreprise travaille en deux postes par jour (15h/jour) durant 330 jours ouvrables.

Le tableau 4.1 présente les durées opératoires de chaque produit et le coût de transfert unitaire du produit  $i$  en dehors de sa cellule originale ( $CTU_i$ ). On suppose que toutes les machines ont le même coût d'acquisition annuel ( $A = 10\,000$  DT).

**Tableau 4.1** Solution initiale de formation des cellules

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
M1	2,95	0	2,20							4,61
M2	2,76	5,18	1,89	3,89		5,14				
M3	5,54	4,29	0							
M4	2,91			1,97	2,59	4,01		2,7		
M5				4,28	0	4,51				
M6	1,92						2,23	0	5,2	0
M7					3,4		1,16	4,72	0	2,49
M8		5,32					0	3,75	3,5	0
M9							4,04	0	0	1,83
$CTU_i$ (DT)	6,8	7,5	5,8	5,4	6,5	6,5	4,5	6,2	5,1	6,8

Le tableau 4.2 indique la gamme de production de chaque produit. On note par  $TT_i$  le temps de transfert du produit  $i$ ,  $BS_i$  la taille du lot du produit  $i$ , et par  $D_i$  la demande annuelle du produit  $i$ . Les commandes arrivent d'une manière aléatoire en respectant la

proportion  $p_i$  de chaque produit  $i$ . De ce fait, l'expression de  $p_i$  est indiquée dans l'équation 35.

$$p_i = \frac{D_i}{\sum_{k=1}^{10} D_k} \quad (35)$$

L'effet de la taille de lot sur la performance des systèmes de production est largement discuté en littérature comme dans (Burgess et al. 1993), (Law et Kelton, 2000), (Faizul et al. 2001), etc. C'est pourquoi nous avons choisi une taille de lot fixe (5 pièces) pour tous les produits.

**Tableau 4.2** Les données du processus de production et de transfert

Produits	Gamme de production	$TT_i$	$BS_i$	$D_i$	$p_i$	$NT_i$
P1	M1-M2-M4-M3-M6	21	5	2 439	0,08	3
P2	M2-M3-M8	21,5	5	4 189	0,15	1
P3	M2-M1	17,5	5	3 135	0,11	0
P4	M4-M5-M2	22	5	861	0,03	1
P5	M4-M7	25	5	2 808	0,10	1
P6	M4-M2-M5	19,5	5	2 587	0,09	2
P7	M6-M7-M9	22	5	3 506	0,12	0
P8	M4-M7-M8	23	5	3 445	0,12	1
P9	M6-M8	25	5	2 491	0,09	0
P10	M7-M9-M1	25	5	3 339	0,11	1
Somme				28 800	1,00	10

Il est à noter que le nombre de transferts intercellulaire ( $NT_i$ ) est non seulement déterminé par le nombre d'EE, mais également par la séquence des produits. Une opération intermédiaire pour un produit exécuté en dehors de sa cellule nécessite deux transferts intercellulaires. Prenons à titre d'exemple, le produit P6 qui appartient à la cellule C2 et qui a comme séquence M4-M2-M5. Deux transferts entre les cellules C1 et C2 sont nécessaires pour fabriquer le produit P6, en effet la machine M2 est implantée dans la cellule C1 et les machines M4 et M5 dans la cellule C2. Dans le cas où l'EE constitue la première ou la dernière opération (le cas des produits P2, P4, P5, P8 et P10) un seul transfert entre cellule est nécessaire. En conséquence, le nombre d'EE dans le système est huit alors que le nombre de transferts intercellulaire est de dix.



Le tableau 4.3 présente le temps de réglage alloué par type de cellule. C'est-à-dire si un produit affecté à une cellule nécessite une machine implantée dans une autre cellule, il sera affecté par un temps de réglage.

Nous supposons en plus, que les durées opératoires du tableau 4.1 sont déterministes, que les durées des transferts intercellulaires suivent chacune une loi exponentielle de moyenne ( $TT_i$ ), que la fabrication et le transfert des produits se fait par des lots égaux et identiques pour tout les produits et que la règle de priorité appliquée sur chacune des machines est FCFS.

**Tableau 4.3** *Les temps de réglage*

Cellule	Famille de produits	Groupes de machines	Temps de réglage (min)
1	P1, P2 et P3	M1, M2 et M3	3,5
2	P4, P5 et P6	M4 et M5	3
3	P7, P8, P9 et P10	M6, M7, M8 et M9	4,5

#### 4.4.2 Construction du modèle de Simulation

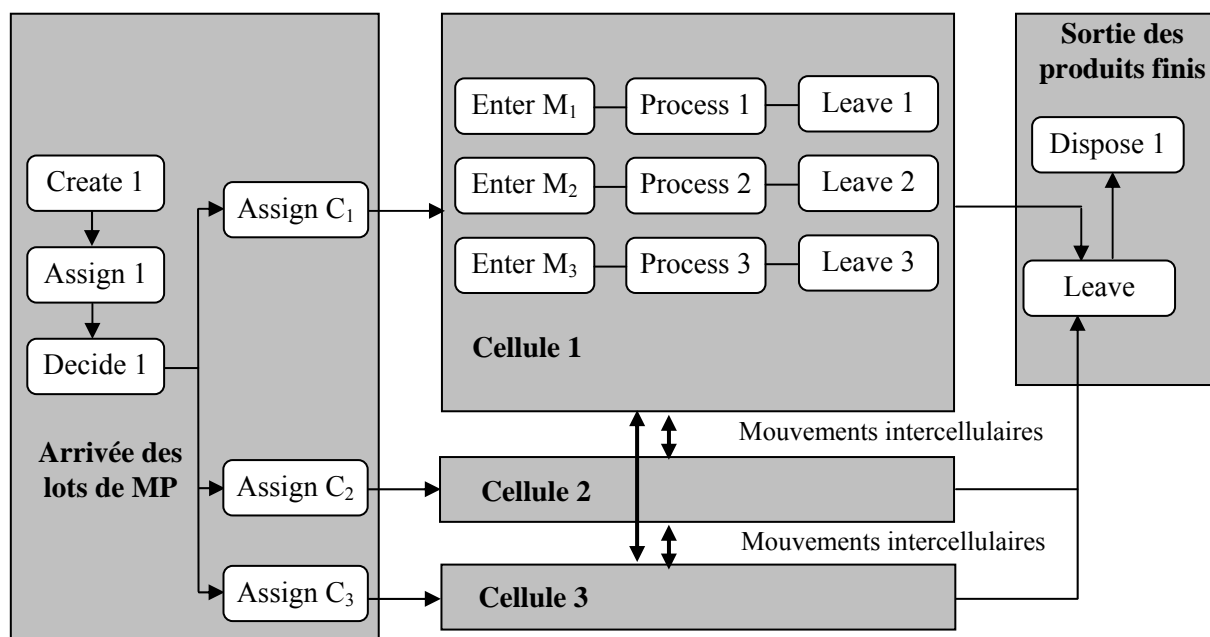
Pour modéliser et simuler le système de production, nous avons utilisé le logiciel SIMAN/Arena (Arena standard user's guide, 2002) développé par *Systemes Modeling Corporation*. Le logiciel SIMAN/Arena est notamment dédié à la modélisation et à la simulation des systèmes à événements discrets et en particulier, les systèmes de production. SIMAN est un langage de modélisation et de simulation des systèmes à événements discrets. Arena est un environnement (logiciel) de simulation qui englobe SIMAN. Il intègre de nombreuses fonctions de modélisation (autres que celles de SIMAN), d'analyse statistique, d'optimisation, d'animation graphique etc. En effet, Arena permet de mener un projet complet de simulation (programmation, vérification/validation, interprétation des résultats, optimisation, animation etc.).

La figure 4.10 montre une vue d'ensemble du modèle construit qui présente trois parties. La première partie, située à gauche, sert à modéliser l'arrivée aléatoire des lots des différents types de produits. La seconde partie sert à modéliser le fonctionnement des trois cellules ainsi que les transferts intercellulaires. Enfin, la troisième partie située à droite, sert à modéliser le départ des lots des différents types de produits finis.

L'entrée des lots de produits dans le système cellulaire est assurée par le module « *Create I* ». Ce module permet de définir l'intervalle de temps séparant deux lancements successifs de lots. Ensuite, à chaque lot est assigné un ensemble d'attributs via le module « *Assign I* ». Autrement dit, pour chaque lot sont attribués un indice d'identification du type de

produit, la séquence de fabrication de ce type de produit ainsi que les temps opératoires et de transfert relatifs à ce même type de produit au niveau des différentes cellules.

Le transfert des lots d'une station de travail (machine) à une autre est assuré par un module appelé « *Leave* ». Ce module permet de prescrire le temps nécessaire à ce transfert. Il définit également la station de destination ou la séquence des stations à suivre. Chaque station est déclarée par un module « *Enter* ». Par ailleurs, dans le module de données « *sequence* », chaque routage d'un produit est défini par une suite de stations. Chaque machine est modélisée à l'aide du triplet « *Enter – Process – Leave* ».



**Figure 4.10** Structure du modèle de simulation construit

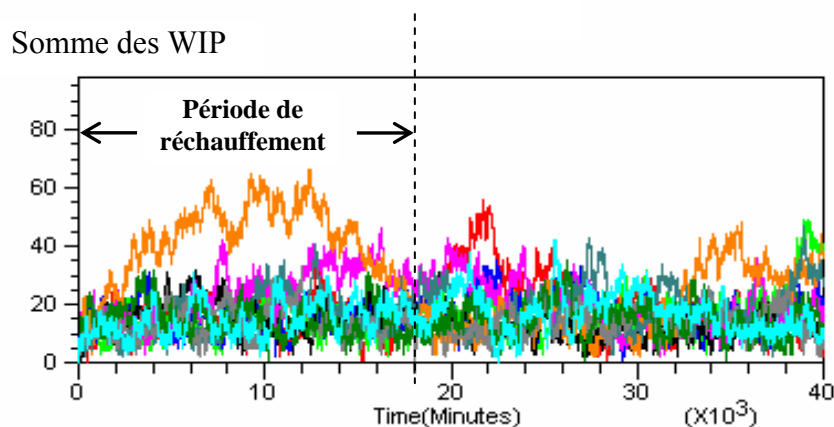
La production d'un lot de produits nécessite son passage par les différentes machines comme l'indique sa séquence. Il est à noter que nous avons négligé les temps de transfert intracellulaire (déplacement à l'intérieur d'une même cellule). Par contre, nous avons attribué un temps de transfert exponentiel spécifique à chaque type de produits ( $TT_i$ ). Une fois les lots de produits ont subi l'ensemble des opérations nécessaires pour leur transformation, ils quittent le système via le module « *Dispose 1* ».

Le modèle de simulation que nous avons construit est stochastique car il contient des variables aléatoires. Les résultats générés pour une réplique (indicateurs de performance) sont alors semblables à des mesures sur un échantillon statistique. Il est nécessaire de faire une analyse statistique appropriée pour la collecte et l'interprétation des résultats de simulation. Comme nous l'avons déjà mentionné, deux méthodes sont

possibles pour collecter les indices de performances : méthode de N réplifications indépendantes et méthode de grande réplification.

#### 4.4.3 Analyse des résultats

Le fonctionnement du système est infini, c'est pourquoi nous avons choisi d'appliquer la méthode d'une seule longue réplification. Plusieurs chercheurs recommandent l'utilisation de cette méthode (Ait Hssain, 2000), (Banks et al. 2001). En effet, l'avantage majeure est le fait que la période de réchauffement (dite encore, période de démarrage ou période du régime transitoire) sera exécutée une seule fois ce qui réduit le temps d'expérimentation. En plus, l'effet de cette période sera négligeable autant que la réplification est longue. Une évaluation visuelle des performances du système de production est nécessaire pour vérifier, juger puis éliminer la période du régime transitoire (Law et Kelton, 2000). Dans ce contexte, plusieurs auteurs, comme (Pidd, 1998), (Law et Kelton, 2000) et (Banks et al. 2004) indiquent que l'indice de performance le plus significatif pour analyser graphiquement la période du régime permanent est le WIP. La figure 4.11 présente la somme des WIP (des 10 différents produits) durant dix différentes longues réplifications à l'aide de l'application « Output Analyser » outil disponible avec le logiciel Arena (Kelton et al. 2002) L'examen de cette figure permet d'affirmer qu'une période de 18000 mn est suffisante pour que le système atteigne le régime permanent.



**Figure 4.11** L'évolution de la somme des WIP durant dix différentes longues réplifications

Après avoir déterminé la période de réchauffement du modèle de simulation, il ne faut considérer que les résultats du régime permanent du fonctionnement du système cellulaire. La configuration initiale consiste à admettre tous les transferts intercellulaires dans le système. Les résultats ainsi générés de cette configuration (stratégie S1) sont listés dans le tableau 4.4 et le tableau 4.5.

Dans la littérature, plusieurs indices de performances sont proposés (Ait Hssain, 2000). Dans chaque projet de simulation, le décideur fait recours aux choix d'indicateurs qui convient le plus pour atteindre les objectifs escomptés (Banks et al. 2001). Dans ce présent travail, nous avons choisi pour évaluer les performances de chaque machine : le taux d'utilisation (TU) en % et le nombre de lots moyens en attente (NMA). Quand aux produits, nous avons choisi quatre indicateurs de performances qui sont TTM : Temps de Transfert Moyen (mn), TFM : Temps de Fabrication Moyen (mn), TAM : Temps d'attente Moyen (mn) et TSM : Temps de séjours moyen (mn).

**Tableau 4.4** Les résultats de la configuration initiale pour les machines

Machines	NMA	TU (%)
M1	0,35	54
M2	7,17	93
M3	0,10	25
M4	0,58	64
M5	0,03	30
M6	0,27	49
M7	1,26	74
M8	0,47	67
M9	0,24	52

Les résultats du tableau 4.4 indiquent qu'il n'y a aucune machine goulet dans le système. En plus la fabrication des lots demandés (28 800 lots) nécessite une période de 289560 mn qui ne dépasse pas la capacité annuelle disponible de production ( $15 \times 60 \times 330 = 297000$  mn). Ceci vérifie bien, l'hypothèse relative à la suffisance des capacités des machines.

Le coût de transfert intercellulaire d'un produit  $i$  est calculé à partir de l'équation (36).

$$CT_i = D_i \cdot TTM_i \cdot CTU_i \quad (36)$$

Avec :

$CT_i$  : coût total de transfert intercellulaire du produit  $i$

$D_i$  : demande annuelle du produit  $i$  (Tableau 4.2)

$TTM_i$  : temps de transfert moyen (mn) du produit  $i$ .

$CTU_i$  : coût unitaire de transfert du produit  $i$  (Tableau 4.1)

En appliquant l'équation (36) sur les résultats de simulation, nous obtenons les résultats du Tableau 4.5 qui indique pour chaque produit, le coût total de transfert intercellulaire.

Plusieurs expériences de simulation ont été réalisées pour étudier deux stratégies :

- La première stratégie (S1) consiste à admettre des EE dans les différentes cellules, c'est à dire la configuration initiale.
- La deuxième stratégie (S2) traite le cas de dupliquer les machines exceptionnelles.

Le tableau 4.6 présente l'évaluation économique des deux stratégies et ceci pour chaque produit exceptionnel.

**Tableau 4.5** Les résultats de la configuration initiale pour les produits

Produit	TTM (mn)	TFM (mn)	TAM (mn)	TSM (mn)	CT (DT)
P1	63,61	90,90	195,11	349,63	17 583
P2	21,33	56,00	178,37	255,70	11 169
P3	0,00	20,45	171,71	192,16	0
P4	18,16	53,70	175,51	247,37	1 407
P5	25,29	32,95	43,22	101,46	7 693
P6	39,14	77,30	172,78	289,22	10 969
P7	0,00	37,15	45,09	82,24	0
P8	23,00	60,35	59,42	142,77	8 188
P9	0,00	46,85	15,75	62,60	0
P10	25,26	49,15	47,70	122,11	9 137
Total	215,80	512,80	1104,67	<b>1845,27</b>	

**Tableau 4.6** Les coûts de traitement des EE

Produits exceptionnels	Initial $CT_i$ (DT)	Machines nécessaires à dupliquer	Coût d'acquisition nécessaire
P1	17 583	M4 et M6 in C1	20 000
P2	11 169	M8 in C1	10 000
P4	1 407	M2 in C2	10 000
P6	10 969		
P5	7 693	M7 in C2	10 000
P8	8 188	M4 in C3	10 000
P10	9 137	M1 in C3	10 000

A partir du tableau 4.6, nous remarquons que pour les produits P1, P5, P8 et P10, il n'est pas économique de dupliquer les machines exceptionnelles correspondantes. En effet le

coût d'acquisition de nouvelles machines est supérieur à celui des mouvements intercellulaires. Par contre, pour les produits P2, P4 et P6 le coût de duplication des machines exceptionnelles est justifié. De ce fait l'entreprise doit acquérir une nouvelle machine M2 pour la placer dans la cellule C2 et une nouvelle machine M8 dans la cellule C1. Elle ne doit pas investir en machines pour traiter les produits exceptionnels P1, P5, P8 et P10. Dans ce contexte, elle pourra envisager leurs sous-traitances suite à une étude économique plus large.

Pour monter l'intérêt du point de vue pratique de l'amélioration proposée, nous avons simulé une autre fois, le système tout en considérant une deuxième machine de chacune des machines M2 et M8. Les résultats de cette simulation relatifs aux produits sont indiqués dans le tableau 4.7

**Tableau 4.7** Les résultats après acquisition des machines exceptionnelles

Parts	<b>TTM (mn)</b>	<b>TFM (mn)</b>	<b>TAM (mn)</b>	<b>TSM (mn)</b>
P1	64,44	90,90	40,62	195,96
P2	0.00	52,50	8,01	60,51
P3	0.00	20,45	14,16	34,61
P4	0.00	50,70	19,09	122,71
P5	25,90	32,95	43,03	69,79
P6	0.00	68,30	17,04	101,88
P7	0.00	37,15	47,54	85,34
P8	23,00	60,35	42,53	84,69
P9	0.00	46,85	15,77	125,88
P10	24,69	49,15	40,62	62,62
Total	138,03	509,30	296,66	<b>943,99</b>

Il est à noter qu'en plus l'entreprise gagnera en réduction de nombre de transferts intercellulaires, elle réduira le temps de séjour total de 50 % (de 1845,27 à 943,99).

## 5. Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire la démarche de conception des aménagements cellulaires que nous avons proposée. Cette démarche consiste à combiner la conception axiomatique et la technique des plans d'expériences. En plus, nous avons présenté une approche basée sur la simulation pour évaluer les stratégies d'élimination des EE. Ce qui constitue la phase finale pour la formation des cellules qui est souvent non considérée dans les

solutions finales proposées par la littérature. L'approche développée permet d'évaluer le coût de duplication des machines exceptionnelles par rapport au coût engendré par les mouvements intercellulaires, elle permet aussi d'intégrer les paramètres de production dans le modèle développé pour avoir le caractère dynamique et stochastique qui lui donne plus de réalisme.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objet du travail présenté dans ce travail de recherche est la structuration et le développement d'une démarche pour la conception des aménagements cellulaires. Entre autre, nous avons proposé de nouvelles approches pour la résolution du problème de formation de cellules sous diverses hypothèses. Dans ce que suit, nous présentons une synthèse des principaux résultats obtenus suivie de perspectives de recherche.

## **1. Une nouvelle approche basée sur l'analyse des corrélations statistiques pour la formation des cellules**

### **1.1 Principe de l'approche proposée**

Cette approche se base sur trois étapes. Dans une première étape, la matrice de corrélation est utilisée comme une matrice de similarité pour les produits et les machines. Dans une deuxième étape, l'application de la méthode Analyse en Composantes Principales et l'analyse graphique du plan principal permettent d'une part, le groupement simultané des machines en groupes et des produits en familles et d'autre part, l'identification des machines et/ou des produits exceptionnels. Le but de la troisième étape est d'affecter ces éléments exceptionnels aux cellules tout en maximisant la corrélation entre les différents éléments (produits et machines).

### **1.2 Avantages**

Les avantages de cette approche résident dans la simplicité, la rapidité de résolution et la considération du nombre de cellules à former comme une variable dépendante ou indépendante. Elle est valable aussi pour le cas d'une matrice d'incidence en durées opératoires. En plus, elle est pratique pour les industriels, d'une part, elle est accessible au travers de la disponibilité de plusieurs logiciels d'analyse de données du marché. D'autre part, elle ne requiert pas de connaissances approfondies en programmation comme les approches évoluées de formation de cellules proposées en littérature.



### **1.3 Limites et perspectives**

D'une part, le passage entre les différentes étapes de l'approche proposée, et l'examen du plan principal restent des opérations manuelles. Le développement informatique de cette approche, s'avère une perspective rapide. D'autre part, cette approche ne tient pas en considération d'autres paramètres intéressants de production : telles que la séquence des opérations et la capacité des machines. Une perspective intéressante serait dans l'intégration de ces aspects dans la matrice de similarité.

## **2. Une nouvelle approche basée sur la technique des plans d'expériences (factoriel et fractionnaire) pour le choix des gammes préférentielles et par la suite la formation des cellules avec gammes alternatives**

### **2.1 Principe de l'approche proposée**

Il consiste à considérer le problème de formation de cellules avec gammes alternatives comme une succession de deux sous problèmes. L'approche que nous proposons ici porte sur le premier sous problème relatif au choix de la gamme préférentielle pour chaque produit et ceci en se basant sur la technique des plans d'expériences (factoriel ou fractionnaire). Après avoir sélectionné une seule gamme pour chaque produit, le deuxième sous problème consiste à revenir au problème classique de formation des cellules traité précédemment.

### **2.2 Avantages**

Outre la détermination de la solution optimale, l'utilisation de la technique des plans d'expériences nous a permis d'introduire une nouvelle notion d'analyse de sensibilité de la solution optimale selon les différentes gammes possibles ignorées auparavant en littérature. En plus, l'approche proposée est pratique pour les industriels. En effet, elle est accessible à travers la disponibilité de plusieurs logiciels traitant la technique des plans d'expériences. De ce fait, elle ne requiert pas de connaissances approfondies en programmation mathématique et informatique comme sollicité par les approches antérieures de formation de cellules proposées en littérature.

### **2.3 Limites et perspectives**

Cette approche possède quasiment les mêmes limites que la première approche développée pour la formation des cellules. En plus, elle devient de plus en plus

compliquée en augmentant la taille du problème. Le besoin d'informatisation est très intéressant pour surmonter ces limites.

### **3. Une nouvelle démarche de conception des aménagements cellulaires basée sur la combinaison de la conception axiomatique et la technique des plans d'expériences**

#### ***3.1 Principe de la démarche proposée***

La démarche de conception développée consiste à combiner la conception axiomatique avec la conception robuste (plan d'expérience). Elle permet de lister et d'ordonner les différentes tâches nécessaires pour concevoir un aménagement cellulaire. L'approche que nous avons développée pour la formation de cellules avec gammes alternatives est validée à travers cette démarche.

#### ***3.2 Avantages***

Il existe rarement, dans la littérature, des travaux qui traitent le problème de conception des aménagements cellulaires en tenant compte de tous ces aspects. La démarche que nous avons développée est la première de sa nature à appliquer les deux principes de la conception axiomatique pour la conception des aménagements cellulaires.

#### ***3.3 Limites et perspectives***

Durant ces travaux de thèse, nous avons appliqué la démarche proposée aux problèmes de formation des cellules (avec ou sans gammes alternatives) et au problème de traitement des éléments exceptionnels. Une perspective intéressante consiste à traiter le problème de dimensionnement des ressources (machines, opérateurs, etc.), d'implantation des machines dans les cellules et d'amélioration des performances des aménagements cellulaires. En fournissant cette première vue d'ensemble de la démarche de conception, de futurs développements et perfectionnements seront plus faciles à entreprendre.

### **4. Une nouvelle approche basée sur la simulation à événements discrets pour choisir entre les différentes stratégies de traitement des éléments exceptionnels**

#### ***4.1 Principe de l'approche proposée***

Partant d'une solution initiale de répartition des machines en cellules et des produits en familles en présence d'éléments exceptionnels, nous proposons une approche par simulation permettant d'évaluer puis d'améliorer la performance des cellules de production. Plusieurs stratégies pourront être étudiées, la duplication des machines

exceptionnelles, la sous-traitance des produits exceptionnels, l'autorisation des transferts intercellulaires, etc.

#### **4.2 Avantages**

L'approche que nous avons développée respecte bien la démarche de conception développée. En plus l'utilisation de la simulation permet d'intégrer simplement les différents paramètres de production en tenant compte du caractère dynamique et stochastique. Ceci lui donne plus de réalisme.

#### **4.3 Limites et perspectives**

Nous avons modélisé et simulé simplement un cas pratique d'un système cellulaire qui comporte trois cellules. Le besoin de généraliser automatiquement des modèles de simulation relatifs aux aménagements cellulaires s'avère pertinent comme l'un des axes de recherche future. Nous pouvons enrichir encore le modèle de simulation en intégrant d'autres éléments intéressants comme les méthodes de pilotages des flux, les stratégies de maintenance, etc.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### A

---

- Adenso-Diaz, B.**, S. Lozano, J. Racero, F. Guerrero., « Machine cell formation in generalized group technology », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 41, **2001**, n° 2, p. 227–240.
- Adenso-Diaz, B.**, Lozano, S., Eguira, I., « Part-machine grouping using weighted similarity coefficients », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 48, **2005**, n° 3, p.553-570.
- Adil, G.K.**, Rajamani, D., Strong, D., « A mathematical model for cell formation considering investment and operational cost », *European Journal of Operational Research*, Vol. 69, **1993**, n° 3, p. 330-341
- Agarwal, A., Sarkis, J.**, « A review and analysis of comparative performance studies on functional and cellular manufacturing layouts », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 34, n° 1, **1998**, p. 77-89.
- Ait Hssain, A.**, *Optimisation des flux de production: méthodes et simulation*, Ed. Dunod, , Paris, France, **2000**.
- Akturk, M.K., Balkose, H.O.**, « Part-machine grouping using a multi-objective cluster analysis », *Int. J. of Production Research*, Vol. 34, n° 8, **1996**, p. 2299-2315.
- Albadawi, Z.**, Bashir, H.A., Chen, M., « A mathematical approach for the formation of manufacturing cell », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 48, **2005**, n° 1, p. 3-21.
- Albano, L.D., Suh, N.P.**, « Axiomatic approach to structural design », *Research in Engineering Design*, Vol. 4, **1992**, n° 3, p.171-183.
- Al-Quattan, I.**, « Designing flexible manufacturing cells using a branch and bound method », *Int. J. of Production Research*. Vol. 28, **1990**, n° 2, pp. 325-336.
- Arena Standard User's Guide**, *Doc ID ARENAS-UM001C-EN-P*, Rockwell Software Inc., **2002**.
- Arnould, P., Renaud, J.**, « Flux de production : les outils d'amélioration », Ed. Afnor, p. 51-52, Paris, France, **2003**.

**Arvinth, B., Irani, S.A.**, « Principal components analysis for evaluating the feasibility of cellular manufacturing without initial-part matrix clustering », *Int. J. of Production Research*. Vol. 32, **1994**, n° 8, p.1909-1938.

**Auray, J. P.**, Duro, G., Zighad, A., « Analyse des données multidimensionnelles : les méthodes de structuration », Ed. Alexandre Lacassagne, Lyon, France, **1990**.

## B

---

**Babic, B.**, « Axiomatic design of flexible manufacturing systems », *Int. J. of Production Research*, Vol. 37, **1999**, n° 5, pp. 1159-1173.

**Bakalem, M.**, « *Modélisation et simulation orientées objet des systèmes manufacturiers* », Thèse de Doctorat en Electronique – Electrotechnique - Automatique, Université de Savoie, **1996**

**Banks, J.**, Carson J., Nelson, B., « *Discrete Event System Simulation* », 3e edition, Prentice-Hall, **2001**.

**Banks, J.**, Carson, J.L., Nelson, B., Nicaol, D., « *Discrete-Event System Simulation* », Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems, 4th Edition, **2004**.

**Baptise, P., Baboli, H.**, « *L'implantation d'atelier : Chapitre 3* ». Maîtrise et organisation des flux industriels, Traité IC2 Productique, Ed. Hermes Science, Paris, **2001**.

**Bel, G., Kieffer, J.P.**, « *Pilotage assisté par la simulation discrète. Chapitre 3* ». Méthodes du pilotage des systèmes de production, Traité IC2 Productique ; Ed Hermès Science, Paris, **2001**.

**Boctor, F.**, « A linear formulation of the machine-part cell formation problem, *Int. J. of Production Research*, Vol. 29, **1991**, n° 2, p. 343-356.

**Box, G.E.P.**, Hunter, W.E., Hunter, J.S. « *Statistics for Experiments* », New York: John Wiley, **1978**.

**Bullinger, H.J., Sauer, H.**, « Planning a flexible assembly system supported by simulation », *Int. J. of Production Research*, Vol. 25, **1987**, n° 11, p.1625-1634.

**Burbidge, J.L.**, « The introduction of Group technology », *New York: Halster Press and John Wiley*, **1975**.

**Burbidge, J.L.**, « Change to group technology: process organization is obsolete », *Int. J. of Production Research*, Vol. 30, **1992**, n° 5, p. 1209-1219.

**Burgess, A.G.**, Morgan, I., Vollmann, T.E. « Cellular manufacturing: its impact on the total factory », *Int. J. of Production Research*, Vol. 31, **1993**, n° 9, p. 2059-2077.

**Burlat, P.**, « *Les enjeux économiques de la maîtrise des flux : Chapitre 1* ». Maîtrise et organisation des flux industriels, Traité IC2 Productique, Ed. Hermès Science, Paris, **2001**.

**Burlat, P.**, Marcon, Sénéchal, O.E., Dupas, R. Berrah, L. « *Démarches d'évaluation et de pilotage de la performance : Chapitre 3* ». Evaluation des performances des systèmes de production, Traité IC2 Productique, Ed. Hermes Science, Paris, **2003**.

## C

---

**Cabrera-Rios, M.**, Mount-Campbell, C.A, Irani, S.A. « An approach to the design of a manufacturing cell under economic consideration », *Int. J. of Production Economics*, Vol. 78, **2002**, n° 3, p. 223-237.

**Campagne, J.P.**, « *La problématique de la maîtrise des flux : Chapitre 1* ». Maîtrise et organisation des flux industriels. Traité IC2 Productique, Ed. Hermes Science, Paris, **2001**.

**Cao, D., Chen, M.**, « Using penalty function and Tabu search to solve cell formation problems with fixed cell cost », *Computers and Operations Research*, Vol. 31, **2004**, n° 1, p. 21–37.

**Carpenter, G.A.**, Grossberg, S. Rosen, D. B., « Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system », *Neural Network*. Vol. 4, **1991**, n° 6, p. 759-771.

**Caux, C.**, Pierreval, H., Brunaux, R. « Algorithmes évolutionnistes pour la technologie de groupe : application à la formation d'îlots de fabrication », *Revue d'automatique et de productiques appliquées*, Vol. 8, **1995**, n° 2-3, p. 485-490.

**Caux, C.**, Bruniaux, R., Pierreval, H. « Cell formation with alternative process plans and machine capacity constraints: A new combined approach », *Int. J. of Production Economics*, Vol. 64, n° 1-3, **2000**, p. 279-284.

**Chan, H., Milner, D.**, « Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacturing », *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 1, **1982**, n°1, p.65–67.

**Chan, F.T.S**, Lau, K.W., Chan, P.L.Y, Choy, K.L. « Two-stage approach for machine-part grouping and cell layout problems », *Robotics and Computer Integrate Manufacturing*. Vol. 22, **2006**, n° 3, p. 217-238.

**Chandrasekharan, M.P., Rajagopalan, R.**, « An ideal seed non-hierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing », *Int. J. of Production Research*, Vol. 24, n° 2, **1986**, p. 451–464.

- Chandrasekharan, M.P., Rajagopalan, R.**, « Zodiac: an algorithm for concurrent formation of part families and machines cells », *Int. J. of Production Research*, Vol. 25, n° 6, **1987**, p. 835–850.
- Chen, H.G., Guerrero, H.H.**, « A general search algorithm for cell formation in group technology », *Int. J. of Production Research*, Vol. 32, **1994**, n° 11, p. 2711-2724.
- Chen, S.J.**, Chen, L.C, Lin, L. « Knowledge-based support for simulation analysis of manufacturing cells », *Computers in Industry*, Vol. 44, **2001**, n° 1, p. 33-49.
- Cheng, C.H.**, Goh, C. H., Lee, A., « Designing group technology manufacturing systems using heuristic branching rules », *Computers and Industrial engineering*, Vol. 40, **2001**, n° 1-2, p. 117-131.
- Chiadamrong, N.**, « A Sequential Procedure for Manufacturing System Design », *ScienceAsia*, Vol. 29, **2003**, p. 57-65.
- Choobineh, F.**, « A framework for the design of cellular manufacturing systems », *Int. J. of Production Research*, Vol. 26, **1988**, n° 1, p.161-1172.
- Chtourou, H.**, Masmoudi, W., Maalej, A. « An expert system for manufacturing machine selection », *Expert system with application*, Vol. 28, **2005**, n° 3, p. 461-467
- Chtourou, H.**, Jerbi, A., Maalej, A. « The cellular manufacturing paradox: a critical review of simulation studies », *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 19, **2008**, n° 5, p. 591 – 606.
- Chu, C.H., Tsai, M.**, « A comparison of three array-based clustering techniques for manufacturing cell formation », *Int. J. of Production Research*, Vol. 28, **1990**, n° 8, p. 1417-1433.
- Cochran, D. S.**, Eversheim, W., Kubin, G., Sesterhenn, M.L., « The application of Axiomatic Design and Lean Management principles in the scope of production system segmentation », *Int. J. of Production Research*, Vol. 38, **2000**, n° 6, p. 1377-1396.

## D

- Defersha, F.M., Chen, M.**, « A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems », *Int. J. of Production Economics*, Vol. 103, **2006**, n° 2, p. 767–783.
- Delagrange, J.**, « *Initiation à l'analyse des données* » ; 3 ième édition, Ed Dunod, **2000**.
- Dolgui, A., Proth, J.M.**, « *Les systèmes de production modernes (volume 1): conception, gestion et optimisation* », Ed. Hermès Science, Paris, France, **2006**.

**Durmusoglu, M.B, Kulak, O.**, « A methodology for the design of office cells using axiomatic design principles », *Omega*, Vol. 36, **2008**, n° 4, p. 633-652.

## E

---

**Elleuch, M.**, Masmoudi, F., Ben Bacha, H., Maalej, A.Y., « Simulation of manufacturing cells with unreliable machines », *Int. J. of Simulation Modelling*, Vol. 6, **2007**, n° 1, p. 5-12.

**Engelhard, F.**, « Improving products and systems by combining Axiomatic Design, Quality Control-tools and Designed Experiments », *First International Conference on Axiomatic Design*, **2000**, *Proceedings of ICAD*, Cambridge, MA.

## F

---

**Faizul, H.**, Douglas, A.H., Zubair, M.M., « A simulation analysis of factors influencing the flow time and through-put performance of functional and cellular layouts », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 12, **2001**, n° 4, pp. 285-295.

**Falkenauer, E.**, « A new representation and operators for GAs applied to grouping problems », *Evolutionary Computation*, Vol. 2, **1994**, n° 2, p.123-144.

**Ferreira Ribeiro, J. F, Pradin, B.**, « A methodology for cellular manufacturing design, *Int. J. of production research*, Vol. 31, **1993** ; n° 1, p. 235-250.

**Feyzioglu, O.**, Pierreval, H., Deflandre, D., « A simulation-based optimization approach to size manufacturing systems », *Int. J. of Production Research*, Vol. 43, **2005**, n° 2, p. 247-266.

**Flynn, B.B, Jacobs, F.R.**, « A simulation comparaison of groupe technology with traditional job shop manufacturing », *Int. J. of Production Research*, Vol. 24, n° 5, **1986**, p. 1171-1192.

**Fould, L.R.**, French, A.P., Wilson J.M., « The sustainable cell formation problem: manufacturing cell creation with machine modification costs », *Computers and Operations Research*. Vol. 33, **2006**, n° 4, p. 1010-1032.

## G

---

**Gangan, S.**, Khator, S., Babu, A.J.G. « A within-cell utilization based heuristic for designing cellular manufacturing systems », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 13, **1987**, n° 1-4, p. 112-117.



- Gebala, D. A., Suh, N.P.**, « An application of axiomatic design », *Research in Engineering Design*, Vol. 3, **1992**, n° 3, p.149- 162.
- Geonwook, J.**, Leep, H.R., Parsaei, H.R., « A cellular manufacturing system based on new similarity coefficient which considers alternative routes during machine failure », *Computers and Industrial engineering*, Vol. 34, **1998**, n° 1, p 21-36.
- Geonwook, J.**, Leep, H.R., « Forming part families by using genetic algorithm and designing machine cells under demand changes », *Computers and Operations Research*, Vol. 33, **2006**, n° 1, pp. 263–283.
- Giri, R.**, Srinivas, J. Mouli, K.V.V.C., « An optimal design approach for a cellular manufacturing system, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221, **2007**, n° 6, p. 1101-1106.
- Gnanadesikan, R.**, « *Methods for Statistical Data Analysis of Multivariate Observations* », Wiley, New York, **1997**, pp. 7–15.
- Gonçalves-Coelho, A.M.**, Mourão, A.J.F., « Axiomatic design as support for decision-making in a design for manufacturing context: A case study », *Int. J. of Production Economics*, Vol. 109, **2007**, n° 1-2, p. 81-89.
- Gupta, T., Saifoddini, H.**, « Production data based similarity coefficient for machine-component grouping decisions in the design of a cellular manufacturing system », *Int. J. of Production Research*, Vol. 28, **1990**, n° 7, p. 1247-1269.
- Gupta, T.**, « Design of manufacturing cells for flexible environment considering alternative routeing », *Int. J. of Production Research*, Vol. 31, **1993**, n° 6, p. 1259-1273.

## H

---

- Habchi, G., Berchet, C.**, « A model for manufacturing systems simulation with a control dimension », *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 11, **2003**, p. 21- 44.
- Habchi, G., Labrune, C.**, « Study of Lot sizes on Job Shop systems performance using simulation », *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 2, **1995**, p. 277-289.
- Hachicha, W.**, Masmoudi, F., Haddar, M., « A correlation analysis approach of cell formation in cellular manufacturing system with incorporated production data », *Int. J. of Manufacturing Research*, Vol. 1, **2006**, n° 3, p. 332–353.
- Hachicha, W.**, Masmoudi, F., Haddar, M., « An improvement of a cellular manufacturing systems design using simulation analysis », *Int. J. of Simulation Modelling*, Vol. 6, **2007**, n° 4, p. 193-205.

- Hachicha, W.**, Masmoudi, F., Haddar, M., « Formation of machine groups and part families in cellular manufacturing systems using a correlation analysis approach », *Int. J. of Advanced Manufacturing and Technology*, Vol. 36, **2008a**, n° 11-12, p. 1157-1169.
- Hachicha, W.**, Masmoudi, F., Haddar, M., « Combining Axiomatic Design and Designed Experiments for cellular manufacturing systems design framework », *Int. J. of Agile Systems and Management*, Vol. 3, **2008b**, n° 3-4, p. 306-319.
- Hachicha, W.**, Masmoudi, F., Haddar, M., « A Taguchi method application for the routing selection problem in generalized group technology », *Int. J of Materials and Structural Integrity*, Vol. 2, **2008c**, n°4, p. 396-406.
- Hamada, M., Wu, C.F.G.**, « Analysis of Designed Experiments with complex aliasing », *Journal of Quality Technology*, Vol. 23, 1992, p. 130-137.
- Harish A.R, Peihua G.**, « Design methodology and integrated approach for design of manufacturing systems », *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8, **1997**, n° 3, p. 159-172.
- Ho, Y.C., Moodie, C.L.**, « Solving cell formation problems in a manufacturing environment with flexible processing and routing capabilities », *Int. J. of Production Research*, Vol. 34, **1996**, n° 10, p. 2901-2923.
- Hou, T.H.**, Su, C.H, Liu, W.L., « Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using Taguchi method, response surface method and genetic algorithm », *Powder Technology*, Vol. 173, **2007**, p.153-162.
- Houshmand, M., Jamshidnezhad, B.**, « Conceptual design of lean production systems through an axiomatic design », *Second International Conference on Axiomatic Design, Proceedings of ICAD*, **2002**, Cambridge, MA
- Hwang, H., Ree, P.**, « Routes selection for the cell formation problem with alternative part process plans », *Computers and Industrial engineering*, Vol. 30, **1996**, n° 3, p. 423-431.

## I

---

- Irizarry, A.M.**, Wilson, J., Trevin, J., « A Flexible Simulation Tool for Manufacturing-cell Design », *Design and Manufacturing*, Vol. 33, **2001**, n° 10, p. 837-846.

## J

---

- Jabalameli, M.S., Arkat, J.**, « Cell formation with alternative process routings and machine reliability consideration », *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, **2008**, n° 7-8, p. 761-768.
- Jeantet, A.** « Les objets intermédiaires dans la conception : éléments pour une sociologie des processus de conception », *Sociologie du travail*, Vol. 40, **1998**, n° 3, p. 291-316.
- Jensen, J.B.**, Malhotra, M.K., Philipoom, P.R., « Machine dedication and process flexibility in a group technology environment », *Journal of Operations Management*, Vol. 14, **1996**, p. 19-39.
- Joines, J.A.**, Gulberth, C.T, King, R.E., « A genetic algorithms based integer program for manufacturing design », *Proceeding of the International conference Flexible on Automatic integrated manufacturing*, **1995**, Stuttgart, Germany.
- Joines, J.A.**, King, R.E., Culbreth, C.T., « A comprehensive Review of Production-Oriented Manufacturing Cell Formation Techniques ». *Technical Report, NCSU-IE Technical Report. Raleigh*, **1996**, NC: North Carolina State University.

## K

---

- Kamrani, A.**, Hubbard, K., Parsaep, H., Leew, H.R., « Simulation-based methodology for machine cell design », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 34, **1998**, n° 1, p. 173-188.
- Kazerooni, M.**, Luong, L.H.S, Abhary, K., « A genetic algorithm based cell design considering alternative routing », *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 10, **1997**, n° 2, p. 93-107.
- Kelton, W.D.**, « Designing Simulation Experiments », *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, Vol. 1, **1999**, p. 33-38.
- Kelton, W.D.**, Sadawski, R. P., Sadawski, D. A. « *Simulation with Arena* », Mc Graw Hill, New York, **2002**.
- Kern, M., Wei, C.**, « The cost of eliminating exceptional elements in group technologie cell formation », *Int. J. of Production Research*, Vol. 29, **1991**, p.1535-1547.
- Kim, S.J.**, Suh, N.P., Kim, S.G., « Design of software systems based on axiomatic design », *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 8, **1991**, n° 4, p. 243-255.

- King, J.R.** « Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm », *Int. J. of Production Research*, Vol. 18, 1980, n° 2, p. 213-232.
- King J.R., Nakornchai, V.**, « Machine-component group formation in group technology: review and extension », *Int. J. of Production Research*, Vol. 20, 1982, p. 117–133.
- Kitaoka, M., Nakamura, R., Seriza, S., Usuki, J.**, « Multivariate analysis model for machine-part cell formation problem in group technology », *International Journal Production Economics*, Vol 60, 1999, p. 433-438.
- Kizil, M., Ozbayrak, M.**, « A tradeoff analysis between process plan selection and cell formation in cellular manufacturing », *Int. J. of Advanced Manufacturing and Technology*, Vol. 23, 2004, n° 7-8, p. 501-506.
- Kulak, O., Durmusoglu, M.B., Tufekci, S.**, « A complete cellular manufacturing system design methodology based on axiomatic design principles », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 48, 2005, p. 765-787.
- Kumar, K.R., Chandrasekharan, M.P.**, « Grouping efficacy: a quantitative criterion for goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technology », *Int. J. of Production Research*, Vol. 28, 1990, n° 2, p. 233–43.
- Kusiak, A.**, « The generalized group technology concept », *Int. J. of Production Research*, Vol. 25, 1987, p. 561-569.
- Kusiak, A., Boe, W.J., Cheng, C.H.** « Designing cellular manufacturing systems: branch-and-bound and A\* algorithm », *IIE Transactions*, Vol. 25, 1993, n° 4, p. 46-56.

## L

- Labordere, A.H.**, « *Analyse de données : application et méthodes pratiques* », Ed. Masson, 1977.
- Lagrange, J.**, « *Initiation à l'analyse des données* », 3 ième édition, Ed Dunod, 2000.
- Law, M., Kelton, W.D.**, « *Simulation modeling and Analysis* », Mc Graw Hill, New York, 2000.
- Ledauphin, S., Hanafi, M., Qannari, E.**, « Simplification and signification of principal components », *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 74, 2004, p. 277-281.
- Logendran, R., Ramakrishna, P., Striskandarajah, C.**, « Tabu search-based heuristics for cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans », *Int. J. of Production Research*, Vol. 32, 1994, p. 273–297.

- Lossack, R., Grabowski, H.**, « The Axiomatic Approach in the universal design theory », *Actes du premier congrès international ICAD 2000*, **2000**, Cambridge, MA,
- Lozano, S.**, Dobado, Larraneta, D., Onieva, L., « Modified fuzzy C-means algorithm for cellular manufacturing », *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.126, **2002**, p. 23–32.

## M

- Macodiyo, D.O., Soyama H.**, « Optimization of cavitation peening parameters for fatigue performance of carburized steel using Taguchi methods », *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 178, **2006**, p. 234– 240
- Mak, K.L.**, Wong, Y.S., Wang, X.X., « An Adaptive Genetic Algorithm for Manufacturing Cell Formation », *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, **2000**, n° 7, 491-497.
- Malkooti, B.**, Malakooti, N. R., Yang, Z., « Integrated group technology, cell formation, process planning, and production with application to the emergency room », *Int. J. of Production Research*, Vol. 42, **2004**, n° 9, p. 1769–1786.
- Masmoudi, F.**, « Sizing manufacturing cell machines based on the simulation and an expert system », *Int. J. of Simulation Modelling*, Vol. 5, **2006**, n° 2, p. 45-55.
- Masmoudi, F.**, Masmoudi, Y., Maalej, Y. A., « Optimization of product transfer with constraint in robotic cell using simulation », *Int. J. of Simulation Modelling*, Vol. 5, **2006**, n° 3, p. 89-100.
- McAuley, D.**, « Machine grouping for efficient production », *The Production Engineer*, Vol. 51, **1972**, p. 53–57.
- Mistree, F.**, Smith, W.F., Bras, B.A., Allen, J.K., Muster, D., « Decision-Based Design: A Contemporary Paradigm for Ship Design », *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, **1990**. p. 1-56.
- Montgomery, D.C.**, « *Design and Analysis of Experiments* », Ed. John Wiley, **1991**, New York.
- Montogomry, D.C.**, « *Introduction to statistical quality control* », Ed. John wily, 3<sup>ième</sup> édition, **1997**, New York.
- Moris, J. S., Tersine, R.J.**, « A simulation analysis of factors influencing the attractiveness of group technology cellular layouts », *Management science*, Vol. 36, **1990**, n° 12, p. 1567-1578.

**Mukattash, A.M.**, Adil, M.B., Tahboub, K.K., « Heuristic approaches for part assignment in cell formation », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 42, **2002**, n° 3, p. 329-341.

---

## N

---

**Nagi, R.**, Harhalakis, G., Proth, J., « Multiple routings and capacity considerations in Group Technology applications », *Int. J. of Production Research*. Vol. 28, **1990**, n° 12, p. 2243-2257.

**Nollet, J.**, Kélada, J., Diorio, M., « *La gestion des opérations et de la production: une approche systémique* », Ed. Gaétan Morin, Paris, France, **1986**.

**Nsakanda, A.L.**, Diaby, M., Price, W.L., « Hybrid genetic approach for solving large-scale capacitated cell formation problems with multiple routings », *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, **2006**, n° 3, p.1051-1070.

---

## O

---

**Oosterman, B.**, « Improving product development projects by matching product architecture and organization », Thèse de doctorat, Groningen University, **2001**.

---

## P

---

**Pahl, G., Beitz, W.**, « *Engineering design - A systematic approach* », 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag, Londres, **1996**.

**Panchalavarapua, P., Chankong, V.**, « Design of cellular manufacturing systems with assembly considerations », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 48, **2005**, p. 449-469.

**Paris, J.L.**, Caux C., Pierreval, H., « *Les approches évolutionnistes* », Chapitre 12. Evaluation des performances des systèmes de production, Traité IC2 Productique, Ed. Hermes Science, Paris, **2003**.

**Pattanaik, L.N.**, Jain, P.K., Mehta, N.K., « Solving multi-objective cell design problem: an evolutionary genetic algorithm approach », *Int. J. of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 11, **2007**, n° 2, p. 251-273.

**Pidd, M.**, « *Computer Simulation in Management Science* », John Wiley & Sons, 4 th edition, 1998.

- Pierreval, H.**, Caux, C., Paris, J.L, Viguier, F., « Evolutionary approaches to the design and organization of manufacturing systems », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 44, **2003**, pp. 339–364
- Pillet, M.**, « *Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi* », Ed. d'organisation, 2<sup>ième</sup> édition, Paris, France, **1994**.
- Pillet, M.**, « Les plans d'expériences par la méthode Taguchi », Ed. d'organisation, 3<sup>ième</sup> édition, Paris, France, **2005**.
- Polajnar, A.**, Buchmeister, B., Leber, M.A., « Analysis of different transport solutions in the flexible manufacturing cell by using computer simulation », *Int. J. of Operations and Production Management*, Vol. 15, **1995**, n° 6, p. 51–58.

## R

---

- Rajamani, R.**, Singh, R., Aneja, Y.P., « Integrated design of cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans », *Int. J. of Production Research*, Vol. 28, **1990**, p. 1541-1554.
- Reisman, A.**, Kumar, A., Motwani, J., Cheng, C.H., « Cellular Manufacturing: A statistical review of the literature », *Operations Research*, Vol. 45, **1997**, p. 508-520.

## S

---

- Sankaran, S.**, **Kasilingam, R.**, « An integrated approach to cell formation and part routing in Group Technology manufacturing system », *Engineering Optimization*, Vol. 16, **1990**, p. 235-245.
- Sarker, B.R.**, **Balan, C.V.**, « Cell formation with operation times of jobs for even distribution of workloads », *Int. J. of Production Research*, Vol. 34, **1996**, n° 5, p. 1447–1468.
- Scaravetti, D.**, « Formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, **2004**.
- Seifoddine, H.**, « Duplication process in machines cells formation in group technology », *IIE Transactions*, Vol. 21, **1989**, n° 4, p. 382-388.
- Seifoddine, H.**, **Djassemi, M.**, « Merits of the production volume based similarity coefficient in machine cell formation ». *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, **1995**, p. 35-44.

- Selen, W.J., Ashayeri, J.**, « Manufacturing cell performance improvement: a simulation study », *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol.17, **2001**, p.69-176.
- Shafer, S.M., Meredith, J.R.**, « A comparison of selected manufacturing cell formation techniques », *Int. J. of Production Research*, Vol. 28, **1990**, n° 4, p. 661-673.
- Shafer, S.M.**, Kern, G., Wei, J.C., « A mathematical programming approach for dealing with exceptional elements in cellular manufacturing », *Int. J. of Production Research*, Vol. 30, **1992**, n° 5, p. 1029-1036.
- Shafer, S.M., Meredith, J.R.**, « An empirically-based simulation study of functional versus cellular layouts with operations overlapping », *Int. J. of Operations and Production Management*, Vol.13, **1993**, p. 47-62.
- Shambu, G.**, Suresh, C., Pegels, « Performance evaluation of cellular manufacturing systems: a taxonomy and review of research », *Int. J. of Operations and production Management*, Vol. 16, **1996**, n° 8, p. 81-103.
- Shambu, G., Suresh, N.C.**, « Performance of hybrid cellular manufacturing systems: A computer simulation investigation », *European Journal of Operational Research*, Vol. 120, **2000**, 436-458.
- Silveira, G.**, « A methodology of implementation of cellular manufacturing », *Int. J. of Production Research*, Vol. 37, **1999**, p. 467-479.
- Sinha, R.K., Hollier, R.H.**, « A review of production control problems in cellular manufacture », *Int. J. of Production Research*, Vol. 22, **1984**, p. 773-789.
- Singh, N., Rajamani, D.**, « *Cellular manufacturing systems: Design, Planning and control* », Chapman & Hall, New York. USA, **1996**.
- Slim, H.M.**, Askin, R.G., Vakharia, A.J., « Cell formation in Group technology: review, evaluation and directions for future research », *Computers and Industrial engineering*, Vol. 34, **1998**, n° 1, p. 3-20.
- Stawowy, A.**, « Evolutionary strategy for manufacturing cell design », *Omega*, Vol. 34, **2006**, p. 1-18.
- Subramaniam, V.**, Wong, Y. S., Reddy, K. R. B. « Cell formation with multiple process plans and manufacturing attributes », *Int. J. of Computer Applications in Technology*, Vol. 27, **2006**, n° 1, p. 38 – 50
- Suh, N.P.**, « *The Principles of Design* », Oxford University Press, New York, **1990**
- Suh, N.P.**, « *Axiomatic design: Advances and applications* », Oxford University Press, New York, **2001**.



---

## T

---

- Taguchi, G.**, « System of Experimental Design », *Unipub/Kraus, International Publication*, **1987**.
- Taguchi, G.**, « Taguchi on Robust technology development methods ». *ASME Press*, New York, **1993**, p. 1– 40.
- Teghem, J., Pirlot, M.**, « *Optimisation approchée en recherche opérationnelle : Chapitre I* ». Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire. Traité IC2 Productique, Ed. Hermes Science, Paris, **2002**.
- Tsai, C.S.**, « Evaluation and optimisation of integrated manufacturing system operations using Taguchi experiment design in computer simulation », *Computers and Industrials Engineering*, Vol. 43, **2002**, p. 591-604.

---

## U

---

- Uddin, M.K., Shanker, K.**, « Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm », *Int. J. of Production Economics*, Vol. 76, **2002**, p. 219-228.
- Ullman, D.G.**, « *The mechanical design process* », 3rd edition, McGraw-Hill Higher Education, New York, USA, **2003**.

---

## V

---

- VDI-Verlag** (Verein Deutscher Ingenieure). Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products, *VDI Guidelines 2221*, **1987**, Germany.
- Venkumar, P., Noor ul Haq, A.**, « Manufacturing cell formation using modified ART1 networks », *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, **2005**, n° 7-8, p. 909-916.
- Vin, E., De Lit, P., Delchambre, A.**, « Une approche intégrée pour le problème de formation de cellules de production avec des routages alternatives », *Conférence Internationale de Modélisation et Simulation (MOSIM'03)*, **2003**, Toulouse, France.
- Vin, E., De Lit, P., Delchambre, A.**, « A multiple-objective grouping genetic algorithm for the cell formation problem with alternative routings », *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 16, **2005**, n° 2, p. 189-205.

**Vohra, T.**, Chen, D. Chang, J.C., Chen, H.C., « A network approach to cell formation in cellular manufacturing », *Int. J. of Production Research*, Vol. 28, **1990**, p. 2075–2084.

## W

---

**Waghodekar, P.H.**, Sahu, S., « Machine-component cell formation in group technology », *Int. J. of Production Research*, Vol. 22, **1984**, p. 937–948.

**Wang, J.**, « Formation of machine cells and part families in cellular manufacturing systems using a linear assignment algorithm, *Automatica*, Vol. 39, **2003**, p. 1607-1615.

**Wemmerlöv, U.**, **Hyer, N.L.**, « The part family and machine group identification problem in cellular manufacturing », *Journal of Operation Management*, Vol. 6, **1986**, p. 125-147.

**Won, Y.**, « New p-median approach to cell formation with alternative process plans, *Int. J. of Production Research*, Vol. 38, **2000**, n° 1, p. 229-240

**Won, Y.**, **Lee, K.C.**, « Modified p-median approach for efficient GT cell formation », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 46, **2004**, p. 495-510.

**Wood, K.L.**, **Greer, J.L.**, « Function-based synthesis methods in engineering design », *Cambridge University Press*, **2001**.

**Wu, T. H.**, Chen, J., Yeh, J. A, « decomposition approach to the cell formation problem with alternative process plans », *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, **2004**, n° 11-12, p. 834-840.

**Wu, T. H.**, Chung, S. H., Chang, C. C., « Hybrid simulated annealing algorithm with mutation operator to the cell formation problem with alternative process routings », *Expert Systems with Applications*, **2008**, *In Press*.

## X

---

**Xambre, A.R.**, **Vilarinho, P.M.**, « A simulated annealing approach for manufacturing cell formation with multiple identical machines », *European Journal of Operational Research*, Vol. 151, **2003**, p. 434-446.

**Xiao, R.**, **Cheng, X.**, « An analytic approach to the relationship of axiomatic design and robust design », *Int. J. of Materials and Product Technology*, Vol. 31, **2008**, n° 2-3-4, p. 241-258.

**Xu, H., Wang, H.P.**, « Part family formation for GT applications based on fuzzy mathematics », *Int. J. of Production Research*. Vol. 27, **1989**, n° 9, p.1637–1651.

## Y

---

**Yin, Y., Yasuda, K.**, « Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: A comparative investigation », *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 48, n° 3, **2005**, p. 471-489.

**Yin, Y., Yasuda, K.**, « Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: A taxonomy and review », *Int. J. of Production Economics*, Vol. 101, **2006**, n° 2, p. 329–352.

## Z

---

**Zhao, C., Wu, Z.**, « A genetic algorithm for manufacturing cell formation with multiple routes and multiple objectives », *Int. J. of Production Research*, Vol. 38, **2000**, n° 2, p. 385-395.

**Zohhad, R.**, Viviani, J.L., Bouffard, F. « *Mathématiques appliquées : Manuel et Applications* », DECF épreuve n° 5, Ed. Dunod, 1998.