

CONSTITUTION D'ÎLOTS DE FABRICATION ROBUSTES VIA SIMILITUDES.

Séverine DURIEUX-PARIS, Jean-Luc PARIS

Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes,
UMR CNRS 6158
IFMA
B.P. 265,
F-63175 Aubière Cedex
durieux@ifma.fr , paris@ifma.fr

RESUME : *La formation d'îlots de fabrication est une approche efficace de rationalisation des flux au sein d'un atelier. Toutefois, son implantation est coûteuse et son amortissement ne peut se faire qu'à moyen voire long terme. Malheureusement, l'environnement de production peut varier, ce qui peut dégrader une organisation performante en une organisation inadéquate. C'est pourquoi il est nécessaire de considérer les changements toujours possibles de l'environnement de production. Pour ce faire, certaines approches définissent une planification multi-période avec reconfiguration des îlots ; d'autres établissent une organisation robuste où les îlots ne seront pas remis en cause. Cependant, ces deux types d'approches reposent sur un algorithme d'optimisation où la fonction objectif à optimiser est la robustesse et n'analysent pas la solution ainsi obtenue. Dans cet article, nous proposons une nouvelle approche qui met en évidence un squelette d'organisation à partir de similitudes entre différentes solutions optimales sur différents environnements puis construit une organisation en îlots robustes. Nous testons notre approche en deux temps : à partir d'un ensemble donné d'environnements, nous déterminons la solution basée sur les similitudes, puis nous comparons ses performances à celles des autres solutions sur d'autres environnements.*

MOTS-CLES : *conception d'atelier, cellules, incertitudes, robustesse, similitude*

1. INTRODUCTION

Lors des dernières décennies, la demande du marché a évolué et l'environnement concurrentiel actuel fait que les managers doivent rechercher de nouvelles approches pour concevoir et organiser leurs ateliers de production de manière à être toujours de plus en plus compétitifs. En effet, on doit maintenant fabriquer, à des prix de revient minimisés, des produits de bonne qualité en quantité souvent très variable dans un laps de temps de plus en plus court. Il a été estimé qu'environ 250 milliards de dollars sont dépensés chaque année rien qu'aux Etats-Unis pour la conception et la re-conception des ateliers (Tompkins et al 2003). De plus, entre 20% et 50 % des coûts totaux de production sont relatifs à la manutention des pièces et une organisation efficace de l'atelier peut réduire ces coûts de 10 à 30 % (Tompkins et al 2003). L'organisation de l'atelier est donc une étape décisive à ne pas négliger. La façon d'agencer les machines dans l'atelier peut notamment permettre une rationalisation des flux donc une diminution de la transitique, une réduction des stocks ou encore des délais. Ainsi des bénéfices considérables peuvent être obtenus en utilisant des approches efficaces. De telles approches sont discutées dans des articles tels que Meller et Gau (1996) ou Benjaafar et al (2002). Une de ces approches est la technologie de groupe. Le principe de base de cette technique est de regrouper des pièces en

famille en se basant soit sur leur conception soit sur leur fabrication. Une des applications majeures de la technologie de groupe est les îlots de fabrication (Tompkins et al, 2003 ; Selim et al, 1998).

Une cellule – ou îlot de fabrication – est un groupe de machines (physiques et logiques) qui sont allouées à la fabrication de tout ou partie d'un groupe de pièces. Les cellules combinent les avantages des flow-shops et des job-shops avec notamment la réduction du temps de cycle en comparaison des job-shops et une augmentation de la flexibilité et un respect des délais plus important que dans le flow-shop (Burgess et al, 1993). Cependant cette organisation présente quelques inconvénients. L'utilisation des machines peut être plus faible du fait qu'elles soient dédiées à certains types de pièces. Une formation est nécessaire pour manager et travailler de façon efficace dans ce type d'environnement.

De nombreuses approches ont été proposées dans la littérature pour définir la meilleure configuration en îlots de fabrication. De bonnes revues et discussions des approches peuvent être trouvées dans Burbidge (1963) ; Suresh et Meredith (1985) et Selim et al (1998). Les techniques les plus simples sont habituellement basées sur la manipulation de matrices Pièces / Machines. Des approches plus sophistiquées peuvent prendre un certain nombre de contraintes comme une taille maximum de

cellules, des demandes différentes pour différents produits, un nombre de cellules maximum et des coûts de mise en œuvre.

Cependant, malgré tous les avantages que peut représenter une telle organisation, nous ne pouvons que constater l'hésitation des décideurs à s'engager dans une telle démarche (Viguière et Pierreval, 2004). Ils évoquent pour cela deux raisons principales. La première est relative au coût de cette opération (coût de l'étude au préalable, arrêt de la production, opération de déplacement des machines) et la seconde au fait que l'amortissement d'un tel investissement ne peut se faire que dans la durée. En d'autres termes, ils redoutent les conséquences qu'auraient de futurs changements de leur production sur la pertinence d'une organisation cellulaire. Par ailleurs, Shanker et Vrat (1999) notent trois faits qui peuvent amener les données prises en compte dans l'étude à changer : 1) l'intervalle de temps souvent important entre la conception de l'atelier et l'implantation, 2) les coûts importants pour avoir des informations très précises sur, par exemple, le temps de pannes, temps de process, la demande future, 3) le manque d'observations statistiques en phase de conception. Or, typiquement, des changements importants, par exemple, de produits ou de répartition des produits peuvent transformer une organisation cellulaire très performante, au regard de la production actuelle, en une organisation inadéquate, car les gammes de fabrication des nouveaux produits peuvent ne plus être compatibles avec les îlots existants. Cette peur du changement de la part des industriels est loin d'être injustifiée. En effet, dans une étude sur le cycle de vie de 32 organisations en îlots dans 15 usines différentes, Marsh et al (1997) ont établi que des changements d'organisation auraient été nécessaires seulement six mois après leur implantation. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre en compte des changements éventuels dans les produits ainsi que de l'incertitude dans les demandes et les mix produits dans la définition des îlots de fabrication. Malheureusement, la majorité des méthodes existantes n'intègre pas ces préoccupations et considère par exemple que la demande reste constante sur une très longue période.

Toutefois, Balakrishnan et Cheng (2007) présente une revue de la littérature des travaux qui prennent en compte l'incertitude des données telles que les demandes. Un des types d'approches existantes prenant en compte ces préoccupations consiste à définir une planification multi-période avec reconfiguration des cellules. Cette méthode suppose que des prévisions relativement bonnes sur l'introduction des nouveaux produits, et les changements dans le mix produits ou dans les volumes de pièces, peuvent être faites de sorte qu'une planification multi-période soit possible. L'objectif de ce type d'approches est alors de déterminer à chaque période la configuration optimale tout en minimisant le coût total (coût de reconfiguration et coût d'exploitation) sur l'horizon considéré. On pourra par

exemple regarder Wicks et Reasor (1999), Balakrishnan et Cheng (2005), Droley et al (1996), Chen (1998). Une revue de la littérature est disponible dans Balakrishnan et Cheng (1998). Un des problèmes pouvant être soulevés notamment par ce type d'approches est : Doit-on reconfigurer à chaque période, toutes les n périodes ou quand c'est nécessaire ? (Afentabkis et al, 1990). Ce type d'approches est envisageable si le fait de remettre en cause assez fréquemment la disposition des machines est possible et si le gain estimé lié à la nouvelle organisation nous permet de compenser la perte liée à l'ancienne.

Ces approches sont intuitivement très justifiables pour des entreprises dans le domaine du textile ou en tout cas des entreprises où les machines sont très facilement déplaçables, à moindre coût, en très peu de temps. Selon Drolet et al (1996), la plupart des postes de travail sont déplaçables pour ce qui concerne les petites entreprises ou les sous-traitants alors que Chen (1998) souligne que de telles organisations changeantes sont plus adaptées aux industries d'assemblage électronique. En revanche, elles semblent plus difficilement applicables dans des usines de type métallurgie par exemple. C'est pourquoi un autre type d'approches consiste à définir une configuration robuste, c'est-à-dire une organisation où les îlots ne seront pas remis en cause ou en tout cas pas avant très longtemps. Il s'agit alors de déterminer une configuration performante dans un certain nombre de situations (ou d'environnements) plutôt qu'une configuration optimale pour une situation donnée mais qui s'avère inefficace dans d'autres scénarios possibles. Ainsi il est important, par exemple, lorsqu'on définit une organisation en îlots de s'assurer que les cellules, ainsi construites, seront efficaces pour différents « modèles » de production (différents mix produits) et des volumes de production incertains à partir du moment où il est difficile de prédire avec certitude un modèle de comportement du marché. Par ailleurs il peut exister aussi un certain nombre d'incertitudes relatives au système en lui-même comme les pannes machines, les temps de cycles, etc. Shore et Tompkins (1980), Rosenblatt et Lee (1987), Kouvelis et al (1992) ont par exemple proposé ce type d'approches.

Cependant, ces méthodes reposent sur un algorithme d'optimisation où la fonction objectif à optimiser est la robustesse. Cette robustesse peut être définie de plusieurs façons. Toutefois, le résultat de ces méthodes est la définition des îlots de fabrication et la performance de cette configuration. Ils ne fournissent pas d'éléments d'information sur les regroupements de machines qui concourent à la robustesse et à la bonne performance sur les différents contextes de production de la configuration définie. Pour gérer au mieux ce type d'organisation, il est important de comprendre comment maintenir la performance de l'organisation (Chakravorty et Hales, 2007). C'est pourquoi, nous proposons ici une nouvelle approche qui consiste à mener plusieurs optimisations (une optimisation pour chaque scénario) et étudier

l'ensemble des solutions optimales ou proche de l'optimum de chaque environnement pour déterminer si il n'existe pas certaines similitudes entre les solutions puis à proposer une solution construite à partir de ces similitudes. Ainsi si nous retrouvons un « squelette » d'organisation en îlots dans les solutions optimales sur différents environnements, nous pensons que nous aurons tout intérêt à utiliser celui-ci pour définir notre organisation robuste.

Afin de nous focaliser sur la démarche proposée, nous nous limiterons dans cet article, à ne minimiser que les flux inter-cellules en prenant en compte que les variations du mix-produit. La deuxième section de cet article présentera en détail l'approche que nous proposons et nous discuterons de sa mise en œuvre. Puis dans une troisième section, nous appliquerons cette méthode sur un exemple et nous discuterons des résultats. Enfin dans une quatrième section, nous concluons sur ce travail et présenterons nos perspectives de recherche.

2. FORMALISATION DU PROBLEME DE FORMATION D'ÎLOTS DE FABRICATION

Nous reprenons ici en partie les hypothèses, les notations et la formulation du problème de Plaquin, 1998.

2.1. Hypothèses

Nous supposons que les gammes de l'atelier à organiser sont déterministes, c'est-à-dire que chaque machine de chaque opération de chaque gamme est parfaitement identifiée.

Nous réorganisons l'atelier dans son ensemble, c'est-à-dire que nous prenons en compte toutes les machines.

La duplication de machines n'est pas prise en compte. En effet, dans certains cas, il peut être judicieux de dupliquer des machines pour créer des cellules plus indépendantes. Nous allons considérer ici que l'entreprise ne veut pas faire d'investissement supplémentaire et donc nous n'utiliserons que les machines présentes dans l'atelier.

2.2. Notations

- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{nc}\}$ un ensemble de nc cellules à concevoir,
- $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{nm}\}$ un ensemble de nm machines,
- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ un ensemble de np pièces à fabriquer,
- Gam la matrice qui donne les gammes de fabrication des pièces : $Gam(p_i, o)$ indique la machine sur laquelle l'opération o de la pièce p est exécutée, où $o = \{1, \dots, o_{pi}\}$, o_{pi} étant le nombre d'opérations que doit subir la pièce pi avec $i=1, \dots, np$.

- Vol est un vecteur qui représente le volume à fabriquer pour chaque pièce : $Vol(pi)$ indique la quantité de produits pi à fabriquer pendant un temps donné.

- S_{ij}^{pk} est le nombre de fois où la pièce pk va passer de la machine mi à la machine mj ou de mj à mi pendant sa gamme de fabrication.

- $Flux_{ij}$ correspond à l'ensemble des pièces qui vont passer de mi à mj ou de mj à mi pendant leur fabrication :

$$Flux_{ij} = \left\{ p_k \in P, k \in \{1, 2, \dots, np\} \left| \begin{array}{l} (Gam(p_k, o) = m_i \text{ et } Gam(p_k, o) = m_j) \\ \text{ou } (Gam(p_k, o) = m_j \text{ et } Gam(p_k, o) = m_i) \end{array} \right. \right\}$$

- Tr la matrice de trafic inter-machines. $Tr[m_i, m_j]$ est le trafic des pièces entre la machine mi et la machine mj . Il est calculé en faisant la somme des pièces qui passent de la machine mi à la machine mj .

$$Tr[m_i, m_j] = \sum_{p_k \in Flux_{ij}} Vol(p_k) \times S_{ij}^{pk} \quad (1)$$

2.3. Formalisation du problème classique

Pour regrouper les machines en îlots, il faut, en fait, partitionner l'ensemble des machines M en nc cellules.

Soit $PC = \{CC_1, CC_2, \dots, CC_h\}$ l'ensemble des partitions possibles de M en nc îlots.

$$D(CC_r) = \left\{ (m_i, m_j) \mid m_i \in c_k \text{ et } m_j \in c_s, k \neq s \right\} \quad \text{est}$$

l'ensemble des machines qui n'appartiennent pas au même îlot.

Chaque partition CC_r est soumise aux propriétés suivantes :

$$(P_1) \quad \bigcup_{k=1}^{nc} c_k = M$$

$$(P_2) \quad \bigcap_{k=1}^{nc} c_k = \emptyset$$

(Co₁) Chaque cellule c_k ne doit pas contenir plus de $capa$ machines (i.e. $card(c_k) \leq capa$).

Le transport d'un produit d'une cellule à l'autre étant largement plus coûteux que le transport entre deux machines d'une même cellule, un des critères possibles pour optimiser l'organisation est le trafic inter-îlots, i.e. la quantité de produits transitant par des cellules différentes, qui est à minimiser. Ce trafic, noté $trafic(CC_r)$, est calculé en additionnant, pour chaque paire de machines, le trafic entre ces machines si elle ne sont pas dans la même cellule (Proth, 1992) :

$$trafic(CC_r) = \sum_{i=1}^{nm-1} \sum_{j=i+1}^{nm} tr[m_i, m_j] \times \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\text{où } \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (m_i, m_j) \in D(CC_r) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le problème classique d'organisation en îlots de fabrication consiste donc à trouver une partition CC^* telle que :

$$\text{trafic}(CC^*) = \underset{r}{\text{Min}}[\text{trafic}(CC_r)] \quad \text{où} \quad CC_r \in PC$$

qui respecte la contrainte ($C0_1$) et les propriétés (P_1) et (P_2).

3. L'APPROCHE PROPOSEE

Nous souhaitons dans ces travaux ne pas résoudre le problème classique de la formation d'îlots de fabrication. En effet, nous sommes conscients que lors de la conception d'un tel atelier, des incertitudes, des imprécisions existent sur les données représentant le système et son contexte de production. Par ailleurs, en début de phase d'exploitation certaines données pourront être erronées. Enfin, d'autres pourront changer durant la phase d'exploitation du système comme par exemple le mix produit. Or, une organisation cellulaire performante pour un contexte de production donné et un jeu de données, ne sera peut être pas aussi performante si il y a une variation ou un changement au niveau du contexte de production et des données du problème. Ses performances pourront même varier de façon drastique et rendre l'organisation complètement obsolète. C'est pourquoi nous souhaitons prendre en compte ces éventuels changements, variations ou modifications dès la définition de l'organisation cellulaire et proposer une organisation qui puisse avoir de bonnes performances suivant différents environnements, *i.e.* une organisation cellulaire robuste. Par ailleurs, nous ne cherchons pas seulement à proposer simplement une solution aux décideurs mais nous voulons pouvoir mettre en évidence les éléments de l'organisation cellulaire retenue, *i.e.* les couples de machines, qui concourent à la robustesse de la solution ; ce qui à notre connaissance n'est pas réalisé dans les travaux de la littérature portant sur l'organisation cellulaire robuste.

Ainsi notre démarche méthodologique reprend, pour les étapes 1,2 et 3, en partie les premières étapes de celle proposée par Durieux (2003) et est la suivante :

Etape 1. Spécifier le problème de production.

Nous avons ici à résoudre un problème de constitution d'îlots de fabrication. Nous devons aussi préciser l'indicateur de performance que nous utiliserons pour évaluer les organisations cellulaires définies.

Etape 2. Déterminer en liaison avec les experts les facteurs d'environnement ainsi que le domaine de définition de chacun de ces facteurs.

Nous appelons facteurs d'environnement les facteurs difficilement ou non maîtrisables (*e.g.* les mix produits) et les facteurs qui souffrent d'un manque de précision (*e.g.* les temps de cycle) en phase de conception.

Etape 3. Sélectionner les environnements à prendre en compte dans l'étude.

Dans bien des cas, il n'est pas envisageable de tester toutes les combinaisons des facteurs d'environnement définis à l'étape précédente. C'est pourquoi, il est nécessaire de déterminer un échantillon d'environnements $\xi = \{E_j; j = 1, \dots, ne\}$ à prendre en compte dans l'étude.

Etape 4. Pour chaque environnement considéré, déterminer une organisation cellulaire optimale ou proche de l'optimum.

Nous obtenons ainsi un ensemble X de ne organisations cellulaires qui sont optimales ou proche de l'optimum pour au moins un des environnements considérés.

Etape 5. A partir de l'ensemble des solutions obtenues à l'étape précédente, rechercher les caractéristiques communes de ces solutions.

Nous cherchons ici à mettre en évidence si certains couples de machines se retrouvent souvent dans les solutions contenues dans X . Nous nous intéresserons donc aux similitudes entre les solutions obtenues à l'étape précédente.

Etape 6. Construire une organisation cellulaire robuste s'appuyant au maximum sur les caractéristiques communes mises en exergue à l'étape précédente.

Nous proposons de construire la solution qui « ressemble » le plus à chacune des meilleures solutions précédemment trouvées. Nous nous baserons, pour cela, sur les similitudes décelées à l'étape 5.

La figure 1 résume la philosophie de notre approche.

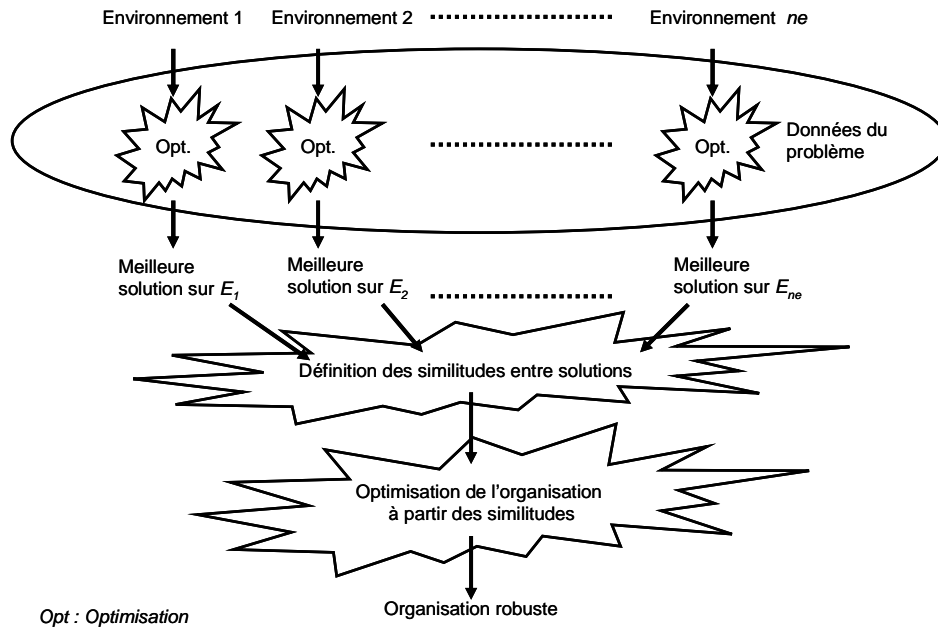


Figure 1. Illustration de l'approche proposée.

L'indicateur que nous avons retenu ici est le trafic inter-îlots qui sera calculé selon l'équation (2).

Pour trouver l'organisation cellulaire optimale ou proche de l'optimum X_i pour chaque environnement E_i , nous utiliserons un algorithme évolutionniste (AE). Le lecteur trouvera dans (Bäck *et al.*, 1997) nombres d'explications sur les AE. Les AEs ont été utilisés avec succès pour la constitution d'îlots de fabrication sur un environnement de production figé (par exemple, Pierreval et Plaquin, 1994 ; Paris et Pierreval, 1996 ; AL-Sultan et Fedjki, 1997 ; Hsu et Su, 1998 ; Venugopal et Narendran, 1992 ; Wu et al, 2007). Ils ont également l'avantage d'être simples à manipuler et à personnaliser, tout en restant efficaces.

Ainsi, il y aura ne campagnes de recherche de la meilleure organisation cellulaire, une pour chaque environnement. Pour diminuer le temps d'exécution de cette étape, nous pourrions si besoin mener ces campagnes sur différents ordinateurs. Afin de s'assurer que la meilleure solution trouvée pour chaque environnement soit optimale ou vraiment très proche de l'optimum, chaque AE est exécuté un grand nombre de fois et nous retenons la « meilleure des meilleures » (dans l'exemple ci-après, elle est apparue quasi unanimement dans la liste des meilleures solutions). Afin de simplifier la lecture dans la suite de l'article, nous nous contenterons de parler de « meilleure solution ».

Chacune des meilleures solutions retenues est alors évaluée sur chacun des environnements afin d'avoir une vision globale de leur performance.

Il nous faut alors mettre en évidence les caractéristiques communes à l'ensemble des meilleures solutions. Nous

avons donc choisi ici de travailler sur les similitudes entre les solutions deux à deux. De nombreux coefficients de similarité ont été définis dans la littérature (Yin et Yasuda, 2006). Néanmoins ils sont utilisés pour construire l'organisation robuste en étudiant par exemple la similarité entre pièces ou entre machines. Or nous cherchons non pas à construire l'organisation cellulaire mais à mettre en avant les similarités entre les différentes organisations cellulaires obtenues à partir de plusieurs expérimentations. C'est pourquoi, dans cet article, nous assimilons les similitudes entre deux solutions aux couples de machines qui sont ensemble dans une même cellule pour chacune des deux solutions. Pour établir les similitudes entre plus de deux solutions, nous proposons d'établir une liste de couples de machines triée par leur nombre d'apparition dans l'ensemble des solutions considérées. Par simplification, nous ne prenons pas en compte les couples n'apparaissant dans aucune solution. Cette liste de couples est déjà utile en elle-même dans le sens où elle donne au décideur une amorce d'organisation cellulaire robuste. En d'autres termes, grâce à cette liste, le décideur sait quelles machines il vaut mieux mettre ensemble. Ainsi, par exemple, si pour 7 solutions performantes sur les 10 que l'on obtient sur tous les scénarios, les machines M1 et M3 sont toujours dans la même cellule, alors le décideur aura tout intérêt à placer ces deux machines ensemble.

Nous proposons toutefois d'aller plus loin en construisant la solution qui « ressemble » le plus à chacune des solutions étudiées. Cette solution sera construite de manière automatique en privilégiant les couples de machines les plus fréquents. La solution construite à partir de cette liste de couples de machines sera élaborée via un autre AE, où la fonction objectif n'est plus une minimi-

sation de trafic inter-cellules mais une gratification de la solution en fonction du nombre d'occurrences dans la liste des similitudes des couples de machines utilisés par cette solution, *i.e.* plus la solution utilise des couples fréquents, meilleure elle sera. Techniquement, la force d'une solution est la somme des occurrences dans la liste des similitudes des couples de machines que la solution utilise.

4. EXEMPLE APPLICATIF

L'atelier étudié est constitué de 25 machines, numérotées de M0 à M24. Il fabrique trois types de produit, P1, P2 et P3. Les gammes de fabrication sont données dans la table 1.

Produits	Gammes
P1	M0, M1, M2, M3, M0, M6, M7, M8, M9, M6, M13, M14, M15, M16 et M13
P2	M3, M2, M15, M17, M3, M22, M23, M4, M5, M22, M8, M7, M11, M19 et M8
P3	M24, M23, M22, M21, M24, M18, M17, M16, M15, M18, M12, M11, M10, M9, M12

Table 1. Gammes de fabrication

Environnements	Demandes P1	Demandes P2	Demandes P3
E0	33%	33%	33%
E1	25%	25%	50%
E2	25%	50%	25%
E3	20%	40%	40%
E4	50%	25%	25%
E5	40%	20%	40%
E6	40%	40%	20%

Table 2. Environnements pris en compte

Solutions	Cellule A	Cellule B	Cellule C	Cellule D	Cellule E
X0	M0, M1, M2, M3 et M20	M4, M5, M21, M22 et M23	M6, M9, M10, M13 et M14	M7, M8, M11, M12 et M19	M15, M16, M17, M18 et M24
X1	M0, M1, M2, M3 et M20	M4, M21, M22, M23 et M24	M5, M6, M7, M8 et M13	M9, M10, M11, M12 et M19	M14, M15, M16, M17 et M18
X2	M0, M1, M6, M13 et M14	M2, M3, M15, M16 et M17	M4, M5, M20, M22 et M23	M7, M8, M10, M11 et M19	M9, M12, M18, M21 et M24
X3	M0, M1, M2, M3 et M20	M4, M5, M21, M22 et M23	M6, M9, M10, M13 et M14	M7, M8, M11, M12 et M19	M15, M16, M17, M18 et M24
X4	M0, M1, M2, M3 et M20	M4, M5, M21, M22 et M23	M6, M7, M8, M9 et M19	M10, M11, M12, M18 et M24	M13, M14, M15, M16 et M17
X5	M0, M1, M2, M3 et M20	M4, M21, M22, M23 et M24	M5, M15, M16, M17 et M18	M6, M7, M8, M13 et M14	M9, M10, M11, M12 et M19
X6	M0, M1, M2, M3 et M20	M4, M5, M21, M22 et M23	M6, M7, M8, M11 et M19	M9, M10, M12, M18 et M24	M13, M14, M15, M16 et M17

Table 3. Solutions obtenues sur chaque environnement

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6
E0	466	500	500	466	466	500	466
E1	475	425	525	475	500	425	500
E2	450	575	425	450	500	575	450
E3	460	500	460	460	520	500	480
E4	475	500	550	475	400	500	450
E5	480	440	560	480	440	440	480
E6	460	560	480	460	440	560	440
Moyenne	466.571429	500	500	466.571429	466.571429	500	466.571429

Table 4. Performances des meilleures solutions sur les différents environnements

La table 4 donne la performance de chacune de ces solutions sur chaque environnement, avec en gras les meilleures valeurs obtenues par environnement. Nous pouvons remarquer que sur l'environnement E0, X0, X3 (qui est identique à X0), X4 et X6 sont les meilleures. Ainsi, avec l'approche classique (identification de la meilleure configuration des flots sur un seul environnement), les décideurs ne peuvent pas vraiment choisir entre ces quatre solutions. Si nous essayons de distinguer ces solutions sur les autres environnements, la performance

Nous voulons regrouper ces machines en cinq cellules de cinq machines en minimisant le flux de produits entre les cellules.

Nous considérons ici qu'un environnement de production est défini par le taux de demande D_i de chaque produit P_i . Nous envisageons sept environnements possibles (*cf* table 2).

Nous avons lancé, pour chaque environnement E_j un algorithme évolutionniste afin d'obtenir, pour chaque environnement, la meilleure solution X_j . Ces solutions sont données dans la table 3. Nous pouvons remarquer dans un premier temps que les solutions X0 et X3 sont identiques.

moyenne ne permet pas non plus aux décideurs de trancher entre ces quatre solutions.

A partir des 7 solutions que nous avons obtenues, nous allons mettre en exergue conformément à l'approche que nous avons proposé leurs caractéristiques communes. Pour cela nous allons étudier les similitudes entre les solutions et nous intéresser plus particulièrement à chaque couple de machines et à leur occurrence dans les solutions obtenues. La table 5 nous donne le nombre d'occurrences de chaque couple de machines dans les

solutions. Nous pouvons ainsi remarquer, par exemple, même îlot que les Machines M15 et M16 sont bien 7 fois dans le

Couples			Couples			Couples		
Mach. A	Mach. B	Nb. Occur	Mach. A	Mach. B	Nb. Occur	Mach. A	Mach. B	Nb. Occur
0	1	7	10	11	4	23	24	2
2	3	7	10	12	4	0	6	1
4	22	7	12	19	4	0	13	1
4	23	7	15	18	4	0	14	1
7	8	7	16	18	4	1	6	1
15	16	7	17	18	4	1	13	1
15	17	7	6	9	3	1	14	1
16	17	7	9	19	3	2	15	1
22	23	7	10	19	3	2	16	1
0	2	6	12	18	3	2	17	1
0	3	6	12	24	3	3	15	1
0	20	6	14	15	3	3	16	1
1	2	6	14	16	3	3	17	1
1	3	6	14	17	3	4	20	1
1	20	6	21	24	3	5	6	1
2	20	6	4	24	2	5	7	1
3	20	6	6	10	2	5	8	1
4	21	6	6	19	2	5	13	1
11	19	6	7	12	2	5	20	1
13	14	6	7	13	2	5	15	1
21	22	6	8	12	2	5	16	1
21	23	6	8	13	2	5	17	1
4	5	5	9	13	2	5	18	1
5	22	5	9	14	2	6	11	1
5	23	5	9	11	2	7	10	1
6	13	5	9	18	2	7	9	1
7	19	5	9	24	2	7	14	1
8	19	5	10	13	2	8	10	1
9	10	5	10	14	2	8	9	1
11	12	5	10	18	2	8	14	1
18	24	5	10	24	2	9	21	1
5	21	4	13	15	2	11	18	1
6	14	4	13	16	2	11	24	1
6	7	4	13	17	2	12	21	1
6	8	4	15	24	2	14	18	1
7	11	4	16	24	2	18	21	1
8	11	4	17	24	2	20	22	1
9	12	4	22	24	2	20	23	1

Table 5. Occurrences des couples machines dans l'ensemble des solutions

	Cellule A	Cellule B	Cellule C	Cellule D	Cellule E
Proposition	M0, M1, M2, M3 et M20	M4, M5, M21, M22 et M23	M6, M9, M10, M13 et M14	M7, M8, M11, M12 et M19	M15, M16, M17, M18 et M24

Table 6. Organisation cellulaire robuste proposée via similitude

A partir de cette liste de couples, le second AE a construit la solution qui inclut les couples de cette liste, en privilégiant les couples ayant le plus d'occurrences. La table 6 nous fournit la solution retenue par cet algorithme.

Nous pouvons remarquer que sur cet exemple nous obtenons une solution qui est dans l'ensemble des solutions obtenues après la première campagne d'optimisation, en l'occurrence X0 (ou X3 qui est identique). Cependant, dans d'autres cas de figure, il se pourrait aussi que la solution alors proposée ne soit pas dans cet ensemble. Cette solution obtient un score au niveau des similitudes de 241, qui est la somme des occurrences dans la liste

des similitudes des couples de machines que cette solution utilise. Nous pouvons remarquer, d'après la table 4 qu'elle est la meilleure solution dans 2 environnements sur 7. Par ailleurs, la table 7 présente les écarts, noté Δ_i , entre la performance de la solution X_i et la meilleure performance obtenue sur l'environnement considéré. Nous pouvons remarquer que la solution proposée, qui correspond aux solutions X0 et X3, correspond aussi à la perte minimale sur l'ensemble des environnements, mais aussi à la perte moyenne la plus faible par rapport à la solution optimale, ou encore à la perte maximale la plus faible.

	Meilleure val	Delta 0	Delta 1	Delta 2	Delta 3	Delta 4	Delta 5	Delta 6
E0	466	0	34	34	0	0	34	0
E1	425	50	0	100	50	75	0	75
E2	425	25	150	0	25	75	150	25
E3	460	0	40	0	0	60	40	20
E4	400	75	100	150	75	0	100	50
E5	440	40	0	120	40	0	0	40
E6	440	20	120	40	20	0	120	0
SOMME DES ECARTS		210	444	444	210	210	444	210
ECART MOYEN		30	63.4285714	63.4285714	30	30	63.4285714	30
PERTE MAX		75	150	150	75	75	150	75
NB MEILLEURES SOL.		2	2	1	2	4	2	2

Table 7. Comparaison des performances des solutions obtenues.

La solution X4, en revanche, est la meilleure solution sur 4 environnements sur 7. Néanmoins, elle a un score au niveau des similitudes (227) qui est plus faible que celui obtenu par notre solution. C'est-à-dire qu'elle a

une structure d'organisation qui est moins fréquente dans l'ensemble des solutions obtenues après la première campagne d'optimisation.

Nous allons maintenant tester les différentes solutions obtenues sur les 7 environnements pris en compte au début de notre étude ainsi que la solution obtenue via similitude sur d'autres environnements pour étudier le comportement de ces solutions et plus particulièrement celui de la solution proposée à l'aide des similitudes.

Nous avons généré aléatoirement 18 autres environnements (Table 8). Pour chacun de ces environnements, nous avons évalué la performance des 7 solutions. Rappelons que la solution proposée via les similitudes correspond à la solution X0 qui est identique à la solution X3.

	P1	P2	P3
E7	30.50%	30.50%	39.00%
E8	27.00%	27.00%	46.00%
E9	30.50%	39.00%	30.50%
E10	28.00%	36.00%	36.00%
E11	25.00%	32.50%	42.50%
E12	27.00%	46.00%	27.00%
E13	25.00%	42.50%	32.50%
E14	23.00%	38.50%	38.50%
E15	39.00%	30.50%	30.50%
E16	36.00%	28.00%	36.00%
E17	32.50%	25.00%	42.50%
E18	36.00%	36.00%	28.00%
E19	32.50%	42.50%	25.00%
E20	46.00%	27.00%	27.00%
E21	42.50%	25.00%	32.50%
E22	38.50%	23.00%	38.50%
E23	42.50%	32.50%	25.00%
E24	38.50%	38.50%	23.00%

Table 8. Autres environnements testés.

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6
E7	470	472	509	470	478	472	479
E8	476	413	528	476	505	413	505
E9	464	500	483	464	488	500	472
E10	467	470	494	467	500	470	485
E11	471	439	506	471	511	439	498
E12	457	530	455	457	500	530	465
E13	461	500	467	461	508	500	477
E14	461	500	468	461	509	500	477
E15	464	500	482	464	489	500	472
E16	467	470	494	467	500	470	485
E17	471	439	506	471	511	439	498
E18	458	529	455	458	500	529	465
E19	451	560	425	451	511	560	456
E20	467	523	511	467	430	523	450
E21	470	500	518	470	442	500	460
E22	472	475	524	472	455	475	472
E23	461	547	484	461	445	547	445
E24	467	522	512	467	430	522	450
Moyenne	465.277778	493.833333	490.055556	465.277778	484	493.833333	472.833333

Table 9. Performances des meilleures solutions sur les autres environnements

En analysant la table 9, la solution proposée (X0 ou X3) à l'aide des similitudes est la meilleure sur 7 environnements parmi les 14 étudiés. Par ailleurs, elle obtient la meilleure performance en moyenne (nous mesurons ici le trafic inter-ilôt). Enfin, nous avons calculé les écarts, notés Δ_i , entre la performance de la solution X_i et la meilleure performance obtenue sur l'environnement considéré (Table 10). Nous remarquons ainsi que la solution proposée, qui correspond aux solutions X0 et X3, correspond aussi à la perte minimale sur l'ensemble des environnements (et de

loin), mais aussi à la perte moyenne la plus faible par rapport à la solution optimale, ou encore à la perte maximale la plus faible.

Seule cette solution nous permet d'obtenir ces résultats. Ainsi, l'approche que nous avons proposée permet de définir une configuration d'ilots de production robuste sur des environnements pris en compte dès le départ dans l'étude mais aussi sur d'autres environnements, non envisagés au moment de l'étude, mais possible dans le futur du système.

	Meilleure val	Delta 0	Delta 1	Delta 2	Delta 3	Delta 4	Delta 5	Delta 6
E7	470	0	2	39	0	8	2	9
E8	413	63	0	115	63	92	0	92
E9	464	0	36	19	0	24	36	8
E10	467	0	3	27	0	33	3	18
E11	439	32	0	67	32	72	0	59
E12	455	2	75	0	2	45	75	10
E13	461	0	39	6	0	47	39	16
E14	461	0	39	7	0	48	39	16
E15	464	0	36	18	0	25	36	8
E16	467	0	3	27	0	33	3	18
E17	439	32	0	67	32	72	0	59
E18	455	3	74	0	3	45	74	10
E19	425	26	135	0	26	86	135	31
E20	430	37	93	81	37	0	93	20
E21	442	28	58	76	28	0	58	18
E22	455	17	20	69	17	0	20	17
E23	445	16	102	39	16	0	102	0
E24	430	37	92	82	37	0	92	20
SOMME DES ECARTS		293	807	739	293	630	807	429
ECART MOYEN		16.2777778	44.8333333	41.0555556	16.2777778	35	44.8333333	23.8333333
PERTE MAX		63	135	392	63	92	135	92
NB MEILLEURES SOL.		7	3	3	7	5	3	1

Table 7. Comparaison des performances des solutions obtenues sur les autres environnements testés.

5. CONCLUSION

Afin de prendre en compte certains changements de l’environnement de production lors de la conception de cellules de fabrication, nous avons proposé une approche qui permet d’obtenir une organisation cellulaire robuste. Elle consiste dans un premier temps à mener une optimisation pour chaque scénario puis à étudier l’ensemble des solutions optimales pour chaque environnement afin de déterminer les similitudes entre les solutions optimales et enfin à construire une organisation cellulaire robuste qui repose au maximum sur ces similitudes. Cette approche présente l’avantage de mettre en exergue les caractéristiques communes des solutions optimales pour chaque scénario de production et ainsi de mettre en évidence les éléments, *i.e.* les couples de machines dans une même cellule, qui concourent à la robustesse de la solution proposée. En effet, ces similitudes apportent aux décideurs un squelette d’architecture robuste où l’on voit quelles machines il vaut mieux mettre ensemble. De plus, nous avons proposé d’aller plus loin en construisant la solution qui « ressemble » le plus à chacune des solutions optimales. Cette solution est construite de manière automatique, via un algorithme évolutionniste, en utilisant au mieux les similitudes mises en exergue. Un exemple applicatif nous a permis d’expliciter chacune des étapes de l’approche que nous avons proposée et nous a permis d’en montrer l’intérêt. Par ailleurs, cette exemple nous a permis d’étudier le comportement de la solution obtenue à l’aide des similitudes sur d’autres environnements et ainsi démontrer qu’elle se comporte mieux que les autres solutions.

Dans nos futurs travaux de recherche, nous comptons étendre ce concept générique d’étude de similitudes permettant la construction de solutions robustes en prenant en compte notamment les gammes alternatives.

REFERENCES

Afentakis P., Millen R.A., Solomon M.M., 1990. Dynamic layout strategies for flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 28(2), 1990, p. 311–323.

AL-Sultan K.S., Fedjki C.A. 1997. A genetic algorithm for the part family formation problem. *Production Planning & Control*, 8, p. 788–796.

Bäck T., Hammel U., Schwefel H.P., 1997. Evolutionary computation: comments on the history and current state. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 1(1), p. 3-17.

Balakrishnan J., Cheng C.H., 1998. The dynamic plant layout problem—a state-of-the-art review. *OMEGA*, 26(4), p. 507–521.

Balakrishnan J., Cheng C.H., 2005. Dynamic cellular manufacturing under multi period planning horizons. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(5), p. 516-530.

Balakrishnan J., Cheng C.H., 2007. Multi-period planning and uncertainty issues in cellular manufacturing: a review and future directions. *European Journal of Operational Research*, 177(1), p 281-309.

Benjaafar S., Heragu S.S., Irani S.A., 2002. Next generation factory layouts: Research challenges and recent progress. *Interfaces*, 32(6), p. 58–77.

Burbidge J.L., 1963. Production flow analysis. *Production Engineer*, 42, p. 742–752.

Burgess A.G., Morgan J., Vollmann T.E., 1993. Cellular manufacturing: its impact on the total factory. *International Journal of Production Research*, 31(9), p. 2059-2077.

Chakravorty S.S., Hales D.N., 2007. The evolution of manufacturing cells: An action research study. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2007.04.017

Chen M., 1998. A mathematical programming model for systems reconfiguration in a dynamic cell formation condition. *Annals of Operations Research*, 77, p. 109–128.

Drolet J., Abdounour G., Rheault M., 1996. The cellular manufacturing evolution. *Computers and Industrial Engineering*, 31(1/2), p. 139–142.

Hsu C.M., Su C.T., 1998. Multiobjective machine-component grouping in cellular manufacturing: A genetic algorithm. *Production Planning & Control*, 9(2), p. 155–166.

- Kouvelis P., Kurawarwala A.A., Gutierrez G.J., 1992. Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systems. *European Journal of Operations Research*, 63, p. 287–303.
- Marsh R.F., Meredith J.R., McCutcheon D.M., 1997. The life cycle of manufacturing cells. *International Journal of Operations and Production Management*, 17(12), p. 1167–1182.
- Meller R.D., Gau K.Y., 1996. The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(5), p. 351–366.
- Paris J.L., Pierreval H., 1996. Manufacturing cell formation using distributed evolutionary algorithms. *Proceedings of the 12th International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future*, Londres, p. 369-374.
- Pierreval H., Plaquin M.F., 1994. A genetic algorithm approach to design manufacturing cells. *Proceedings 4th international conference on Computer Integrated Manufacturing an Automation Technology*, Troy, NY, p. 167-271.
- Plaquin MF, 1998. *Contribution des algorithmes évolutionnistes à la constitution d'îlots de fabrication*. Thèse de l'université Blaise Pascal, Clermont Ferrand,
- Proth J.M., 1992. *Conception et gestion des systèmes de production*, Presses universitaires de France.
- Viguiier F., Pierreval H., 2004. An approach to the design of a hybrid organization of workshops into functional layout and group technology cells. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(2), p. 108-116.
- Rosenblatt M.J., Lee H.L., 1987, A robustness approach to facilities design. *International Journal of Production Research*, 25(4), p. 479–486.
- Selim H.M., Askin R.G., Vakharia A.J., 1998. Cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research. *Computers and Industrial Engineering*, 34(1), p. 3–20.
- Shanker R., Vrat P., 1999. Some design issues in cellular manufacturing using the fuzzy programming approach. *International Journal of Production Research*, 37(11), p. 2545 – 2563.
- Shore R.H., Tompkins J.A., 1980. Flexible facilities design. *AIIE Transactions*, 12(2), p. 200–205.
- Suresh N.C., Meredith J.R., 1985. Achieving factory automation principles through group technology principles. *Journal of Operations Management*, 5(2), p. 151–167.
- Tompkins J.A., White J.A., Bozer Y.A., Tanchoco J.M.A., 2003. *Facilities Planning*, New York, Wiley.
- Venugopal V., Narendran T.T., 1992. A genetic algorithm approach to the machine component grouping problem with multiple objectives. *Computer and Industrial Engineering*, 22, p. 469–480.
- Wicks E.M., Reasor R.J., 1999. Designing cellular manufacturing systems with dynamic part populations. *IIE Transactions*, 31, p. 11–20.
- Wu X., Chu C.H., Wang Y., Yan W., 2007. A genetic algorithm for cellular manufacturing design and layout. *European Journal of Operational Research*, 181(1), p. 156-167.
- Yin Y., Yasuda K., 2006. Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: a taxonomy and review. *International Journal of Production Economics*, 101, p. 329-352.