

POUR UNE MEILLEURE MODELISATION DU PROBLEME DE COMPOSITION DE CELLULES : EXPOSE DES DECISIONS ET ANALYSE CRITIQUE DES CONTRAINTES ET DES CRITERES

Menouar Boulif¹, Karim Atif²

¹UMBB, Université M'hamed Bouguerra à Boumerdès, 35000, Algérie (boumen@umbb.dz)

²USTHB, Université Houari Boumediene, 16111, Algérie (atif_karim2001@yahoo.fr)

Résumé—Le problème de composition de cellules est parmi les premiers obstacles que doit franchir le concepteur de systèmes cellulaires de production. Cet article présente une analyse critique survolant les différents critères et contraintes considérés dans littérature. L'objectif est d'aider tout chercheur voulant modéliser le problème en adoptant une approche multicritère.

Mots-clé—Systèmes Cellulaire de Production, Composition de Cellules, Réduction de critères.

I. INTRODUCTION

Les Systèmes Cellulaire de Production sont une implémentation de la philosophie Technologie de Groupe (TG). Dans la conception de ces systèmes, le problème de composition de cellules consiste à décomposer l'ensembles des ressources (des machines en général) d'un atelier de fabrication en unités de production dites cellules. Chaque cellule sera associée à une famille de produits présentant des caractéristiques similaires. Cette décomposition est réalisée dans le but général d'optimiser la compétitivité de la firme.

L'organisation cellulaire des ateliers de production permet d'améliorer la qualité des produits car la responsabilité de la qualité d'une famille donnée incombe à l'équipe des opérateurs affectés à la cellule associée : chaque opérateur a la possibilité d'arrêter le processus de fabrication s'il décèle une quelconque anomalie. D'autre part, le fait de réaliser les produits similaires dans la même cellule permet de réduire le temps de fabrication car le temps de réglage des machines est diminué à cause du faible recours au changement d'outils. Ceci a pour conséquence l'amélioration de l'efficacité de la firme de façon drastique.

En commençant par les travaux de Burbiddge [11] puis McAuley [45], les recherches dans le domaine ont connu un véritable essor dans les années 1990. Les tendances actuelles vont vers l'adoption d'approches plus pragmatiques (approches intégrée, multicritère, dynamique) à la mesure qu'elles essayent de se rapprocher de plus en plus à la réalité.

Cet article se veut un outil d'aide à de telles approches pour une meilleure modélisation du problème qui est une condition nécessaire pour la bonne résolution de celui-ci.

Le reste de cet article est organisé comme suit : La deuxième section décrit les différentes décisions à entreprendre pour la résolution du problème. La section suivante donne un aperçu sur contraintes considérées dans littérature. La section suivante réalise un survol des critères ainsi qu'une étude critique de ceux-ci en vue d'une approche multicritère. Enfin, nous terminons l'article par l'exposé de nos conclusions.

II. DESCRIPTION DES DECISIONS

Dans la littérature, résoudre le problème de composition entend réaliser l'une des décisions suivantes :

1. Une décomposition des machines en cellules, une décomposition des produits en familles et une affectation des familles aux cellules (simultanément ou par étapes) [34, 23, 60, 17]. Si ces trois actions sont réalisées en même temps, on parle d'un problème de composition mixte.
2. Une décomposition des produits en familles uniquement [3].
3. Une décomposition des machines en cellules uniquement [7, 52, 49, 75, 71, 9, 10].

Dans certaines approches dites intégrées, on associe au problème de composition une ou plusieurs des décisions supplémentaires suivantes :

1. La détermination du nombre de machines devant réaliser les produits planifiés [42, 62, 73, 49, 20].
2. La désignation de la séquence d'opérations à adopter pour chaque produit [7, 20].
3. L'affectation des opérations aux machines disponibles [7, 71, 20].
4. La désignation des produits à sous-traiter [44].
5. La disposition des machines à l'intérieur des cellules [2].
6. L'affectation des machines à des sites sur l'atelier [31].
7. L'affectation des opérateurs aux cellules [46].

Dans les approches dites dynamiques, les décisions doivent être prises pour chaque période de l'horizon de planification.

La considération de toutes ces décisions dans un modèle dynamique pour le résoudre ensuite de manière efficace reste un problème ouvert.

III. ANALYSE DES CONTRAINTES

Pour qu'une solution au problème de composition soit retenue, il faut qu'elle satisfasse certaines conditions dites contraintes. La plupart du temps, les contraintes sont soit imposées par des considérations *pratiques*, soit pour des raisons de *simplification*. Dans le premier cas, on est obligé d'en tenir compte sinon l'implantation de la solution dans l'atelier relèverait de l'impossible. Dans le deuxième, c'est tout à fait le contraire car, par excès de simplification, on peut aboutir à des modèles "de laboratoire", très éloignés des circonstances réelles et presque sans utilité dans la pratique. A ces deux types de contraintes, on peut ajouter deux autres, à savoir, les contraintes *critères* et les contraintes de *cohérence*.

Dans ce qui suit, nous présentons les différentes contraintes prises en compte dans la littérature.

A. Contraintes pratiques

A.1 Taille des familles

La taille d'une famille est le nombre de produits qui la composent. Il est préférable de modérer cette taille pour bien maîtriser l'objectif de qualité en équilibrant la charge de la responsabilité des produits entre les différentes équipes de l'atelier. Parmi les travaux ayant considéré ce genre de contraintes, nous trouvons [47]. Les auteurs citent comme prétexte la quête de simplicité du contrôle et de la planification dans la cellule. D'autres auteurs, tels que [65, 73], imposent une borne inférieure à toute famille de produits créée.

A.2 Taille des cellules

Cette contrainte est de loin la plus considérée dans la littérature. On entend par taille d'une cellule le nombre de machines que celle-ci peut abriter. Ce nombre doit être modéré (et donc borné) pour différentes raisons citées avec générosité dans la littérature. Par exemple, [67] argumente que l'espace disponible dans l'atelier peut restreindre le nombre de machines à mettre dans chaque cellule. En plus, la taille de cellule ne doit pas être trop large au risque de compromettre l'environnement socioprofessionnel dans la cellule ou de rendre difficile le contrôle visuel dans celle-ci. Les auteurs de [54] avancent d'autres considérations, à savoir, la possibilité de négligence des coût de manutention intracellulaire et le renforcement des gains de la Technologie de Groupe (réduction des en-cours, des temps de réglage des

machines, ... etc.) car avec des tailles de cellules larges, ces gains peuvent disparaître. [51] soutient que la restriction est liée aux capacités des robots manipulateurs et des tampons intracellulaires qui ne peuvent approvisionner qu'un nombre modéré de machines.

Parmi ceux qui ont opté pour ce type de contraintes nous trouvons [54, 6, 28, 51, 8, 46, 29, 37, 41, 50, 60, 16, 62, 17, 75].

A.3 Nombre de cellules

Il est préférable d'avoir un nombre modéré de cellules pour faciliter la gestion de l'atelier. Pour ce faire, deux bornes peuvent être utilisées : une borne inférieure et une autre supérieure. Parmi les travaux de recherche ayant opté pour ces contraintes, nous trouvons [1, 17, 9]. Notons l'interférence entre cette contrainte et celle de la taille des cellules. En effet, l'utilisation d'une borne supérieur au nombre de machines, pouvant être abritées dans une cellule, induit une contrainte sur le nombre minimum de cellules, égal à l'entier immédiatement supérieur au nombre de machines, divisé par le nombre maximum de machines par cellule. Il faut alors vérifier si ce nombre n'excède pas la borne supérieure du nombre de cellules, auquel cas l'espace de recherche ne contiendrait aucune solution réalisable. Par conséquent, si la contrainte de taille des cellules est considérée, on peut omettre la contrainte de la borne inférieure du nombre de cellules pour les raisons précédentes ainsi que celle de la borne supérieure car une telle borne existe toujours (nombre de machines).

A.4 Cohabitation entre machines

Cette classe de contraintes fait intervenir deux types de contraintes : les contraintes de cohabitation et les contraintes de non cohabitation. Dans le premier type, il est question de considérer le cas de machines qu'on veut mettre proches les unes des autres. La raison est que, par exemple, ces machines requièrent des sources d'énergie avec des installations onéreuses ou encombrantes [9]. Pour le deuxième type, il est question de vouloir éloigner certaines machines les unes des autres. Par exemple, écarter les machines de haute précision, des machines générant de grandes vibrations. Parmi les auteurs incluant dans leurs modèles cette classe de contraintes nous trouvons [61, 17, 9].

A.5 Capacité des machines

Ce genre de contraintes assure que la charge des machines ne dépasse pas sa capacité. Une condition nécessaire pour que la prise en compte de cette contrainte soit plausible est la considération d'une certaine flexibilité des routages telle que la considération de plusieurs machines de même type, la possibilité de réalisation d'une opération sur différentes machines ou, de façon générale, la possibilité de réaliser chaque produit suivant plusieurs gammes opératoires. Cette contrainte est prise en compte

dans [6, 51, 29, 40, 7, 41, 65, 73, 71].

B. Contraintes de simplification

Il est erroné de croire que l'ajout de contraintes à un problème est toujours synonyme de difficulté accrue. La cause de cet état de pensée est peut être le surcoût de calcul engendré par la vérification de la réalisabilité des solutions dans les méthodes de résolution s'appuyant sur l'énumération totale ou partielle. Ceci fait que les logiciels commerciaux de résolution des problèmes formulés sous forme de programmes mathématiques s'attellent à évaluer l'efficacité de leurs produits par la somme du nombre de variables et de contraintes qu'ils peuvent prendre en charge. Il ne faut pas oublier qu'une contrainte engendre la réduction de l'espace de recherche, et que dans certains cas [9], il est possible de résoudre un problème NP-dur, à l'origine, de façon efficace, si des contraintes sont en plus considérées. Parmi les contraintes de simplification que nous avons rencontrées, nous présentons les suivantes.

B.1 Fixation de la taille des familles

Au lieu de borner la taille des familles, l'auteur de [3] considère des tailles fixes pour chaque famille. Les auteurs ne donnent aucune explication pratique pour leur restriction. Certes, il semble que le souci est de restreindre la responsabilité des opérateurs de cellules à un nombre modéré de produits. Cependant, dans ce cas, la restriction par imposition d'une borne supérieure aurait suffi.

B.2 Fixation du nombre de cellules

Une bonne partie des travaux de recherche publiés (par exemple, [7, 2, 62, 65, 75, 49, 44, 20]) suppose que le nombre de cellules (et par conséquent, le cas échéant, celui des familles) est fixé au préalable. Certains avancent que ceci est dû à des considérations pratiques telles que les recommandations du décideur qui veut fixer ce nombre pour simplifier la gestion de son atelier. D'autres [49] affirment clairement qu'il s'agit d'une supposition simplificatrice car elle permet de réduire l'espace de recherche de façon significative. Il est évident que les considérations pratiques avancées par les premiers peuvent être atteintes par la détermination de deux bornes au nombre de cellules : une borne inférieure et une autre supérieure. Parmi les auteurs qui adhèrent, avec force, à la maladresse de la fixation préalable du nombre de cellules, nous avons [64, 37, 60, 32].

C. Contraintes critères

Il est possible de considérer certains critères, non pas en les incluant dans l'objectif, mais en leur associant des contraintes. Certains auteurs ont opté pour cette technique dans leurs approches multicritères. Nous avons recensé pour une telle démarche les applications suivantes :

C.1 Contrainte de budget

En supposant que le budget est restreint, plusieurs travaux imposent à ce que le coût associé à un (ou plusieurs) critère(s) donné(s) ne dépasse pas l'enveloppe allouée. Une application d'une telle démarche considère la somme des coûts de duplication de machines avec celui de sous-traitance de produits dans [41].

C.2 Seuil de similarité

Au lieu de considérer la similarité entre produits comme un critère à maximiser, les auteurs dans [64, 65] considèrent pour chaque famille de produit un seuil à ne pas franchir pour que la solution associée soit acceptée.

C.3 Contrainte d'équilibrage de charge

Pour équilibrer les charges des cellules, les auteurs de [20] utilise la moyenne de la charge total de travail multiplié par un certain facteur comme borne inférieure à toute charge cellulaire afin d'empêcher une sous-utilisation de cellules. Si le facteur de multiplication, qui est compris entre 0 et 1, est proche de l'unité les charges cellulaires sont forcées d'être proches de la moyenne.

D. Contraintes de cohérence

En plus des précédents types de contraintes, on peut trouver dans la littérature des contraintes que nous appelons *contraintes de cohérence*. Ces dernières sont utilisées dans les modèles mathématiques (le plus souvent dans les approches de programmation mathématique) et servent à préserver la cohérence des variables du modèle. A titre illustratif, si une variable indique l'affectation d'une machine à une cellule, alors on ne doit pas avoir de variables indiquant qu'une machine est affectée à plusieurs cellules en même temps. Le fait que ce genre de contraintes dépende du modèle utilisé et qu'il ne doit avoir aucune influence sur l'énoncé non formel du problème (car les restrictions associées sont sous-entendues), nous n'avons pas jugé utile d'exposer les différentes réalisations associées.

IV. ANALYSE DES CRITERES

Le choix de l'expression "optimiser la compétitivité" utilisée un peu plus haut n'était pas fortuite. Il fallait utiliser une expression aussi flexible que possible pour incorporer la pléthore de fonctions objectif présentes dans la littérature. En effet, comme pour tout problème réel, il ne s'agit pas d'un seul objectif à atteindre, mais de plusieurs. Pour être convaincu de cette réalité, jetons un coup d'œil sur les critères à optimiser proposés dans la littérature.

A. Survol des critères

Nous avons pu recensé les critères suivants sur plus d'une trentaine d'articles publiés, en plus d'une autre vingtaine étudiée dans [43]. Contrairement à l'étude de ce dernier qui est restreinte aux approches multicritères,

notre survol concerne aussi les approches monocritères.

A.1 Minimisation des éléments spéciaux

Ce critère est calculé par la comptabilisation des 1 à l'extérieur des blocs diagonaux de la matrice d'incidence produits/machines MIPM. Ils sont appelés éléments spéciaux à la mesure où ils désignent des opérations associées à des produits fabriqués à l'extérieur de leurs cellules, ou de façon duale, aux machines réalisant des tâches de produits externes. Le cas idéal de zéro éléments spéciaux équivaut à des cellules totalement indépendantes. Parmi les chercheurs ayant opté pour ce critère, nous trouvons [8, 50, 1].

A.2 Minimisation des mouvements intercellulaires

Ce critère cherche à minimiser les déplacements qu'effectuent les produits entre les cellules. Ce critère a été proposé pour pallier à une insuffisance liée au critère de minimisation des éléments spéciaux. En effet, ce dernier ne donne pas le nombre approprié de déplacements lorsqu'un produit réalise des opérations non consécutives sur une machine externe à sa cellule. Parmi les articles ayant utilisé ce critère, nous avons [58, 18, 26, 41, 63, 70, 60, 75, 24, 44, 4].

A.3 Minimisation des mouvements intracellulaires

Ce critère est considéré par certains auteurs afin d'éviter les mouvements des produits en contre sens ou de contournement de machines à l'intérieur des cellules. Ce genre de mouvements induit des complications dans le système de manutention et un manque de sécurité (risque de collision). En général, ce critère est pris en considération avec celui de minimisation des mouvements intercellulaires, les deux combinés par une pondération favorisant ce dernier, dans une fonction objectif agrégative. Parmi les articles proposant une telle combinaison, nous avons [38, 41, 26, 70, 27, 75].

A.4 Coût de duplication de (ou d'investissement en) machines

Dupliquer les machines permet d'éviter les déplacements intercellulaires, en mettant à la disposition des produits requérant une opération ne pouvant être réalisée à l'intérieur de leur cellule, une machine du même type que celle requise. Le prix à payer pour cette duplication est un coût supplémentaire d'investissement en nouvelles machines. Le critère en question sert justement à minimiser le coût de cet investissement. Parmi les travaux incluant ce critère, nous avons [6, 58, 40, 63, 42, 62, 73, 44].

A.5 Coût de sous-traitance de produits

Une autre alternative qui permet d'éviter les déplacements intercellulaires est la sous-traitance des produits requérant de tels déplacements. Cette sous-traitance a un coût et ce critère cherche à le minimiser.

Notons qu'en général, ce critère est combiné avec celui de duplication de machines afin d'en trouver un compromis. Parmi les approches qui ont opté pour ce critère, nous trouvons [72, 58, 42, 65, 44].

A.6 Minimisation du trafic intercellulaire

Ce critère est proche du critère de minimisation des mouvements intercellulaires. Cependant, au lieu de considérer les flux entre machines à égalité, il tient en compte le volume de produits transportés ou leur coût. Parmi les travaux utilisant ce critère nous avons [6, 28, 51, 68, 69, 29, 7, 52, 62, 65, 17, 73].

A.7 Maximisation de l'utilisation (ou minimisation de la sous-utilisation) des machines à l'intérieur des cellules

Ce critère cherche à intensifier l'utilisation des machines de chaque cellule par les produits de la famille associée. La majorité des travaux ayant opté pour ce critère procèdent par la maximisation des 1 (ou la minimisation des 0) à l'intérieur des blocs diagonaux de la matrice d'incidence produits/machines MIPM. Ce critère est, en général, combiné de façon pondérée avec la minimisation des 1 à l'extérieur des blocs diagonaux. Cette combinaison donne une mesure de performance qui a été très utilisée dans les premiers travaux, connue sous l'appellation 'Efficacité de groupement' ou GE (pour Grouping Efficiency puis Grouping Efficacy) [14, 35]. Elle a connu par la suite plusieurs variantes qui ont été analysées dans [57]. Le critère en question a été choisi dans les articles [17, 44]. D'autre part, parmi les articles qui ont utilisé une des variantes de la combinaison GE, nous avons [15, 48, 33, 76, 24].

A.8 Coût de fabrication des produits

Ce critère entre en général en lice lorsqu'on considère la possibilité de réalisation d'une opération sur des machines de différents types, chacune avec un coût (ou un temps) de fabrication différent. On cherche alors à affecter les produits aux machines disponibles de telle sorte à minimiser le coût global de production tout en respectant les contraintes de capacité. Parmi les articles utilisant ce critère : [56, 7, 30, 55].

A.9 Minimisation des écarts des charges intracellulaires

La charge d'une machine est donnée par la somme des temps de fabrication des produits sur ladite machine. Ce critère cherche donc à équilibrer les charges des machines afin que les opérateurs de cellules puissent avoir une charge de travail similaire, d'une part. De l'autre, pour assurer une certaine régularité des flux à l'intérieur des cellules afin de minimiser les en-cours [68]. Parmi les auteurs ayant opté pour ce critère, nous avons [72, 68, 2, 27, 62, 75].

A.10 Minimisation des écarts des charges intercellulaires

Ce critère concerne les charges des cellules qui sont

calculées par la somme des charges des machines qui les composent. On veut, donc, par ce critère avoir des cellules avec des charges de travail similaires car l'équilibrage de ces charges permet de réduire la taille des stocks tampons des composants intermédiaires [2] et d'éviter plusieurs problèmes liés à la gestion de l'atelier [44]. Parmi les articles utilisant ce critère, nous trouvons [72, 2, 36, 52, 62, 44].

A.11 Coût d'évitement intracellulaire

Lorsqu'un produit n'utilise pas toutes les machines de la cellule à laquelle il est affecté, un coût d'évitement est généré par le besoin d'utiliser des moyens de manutention spéciaux, l'extension des délais de fabrication et éventuellement l'augmentation des en-cours [70]. Il est donc judicieux de minimiser ce coût pour se conformer avec les perspectives de la philosophie TG. Parmi les travaux qui ont choisi ce critère, nous discernons [70, 2]. Pour tenir compte de ce critère, nous avons besoin d'informations sur la disposition des machines à l'intérieur des cellules.

Si les critères quantitatifs ont été l'apanage de la majorité des chercheurs, certains ont essayé d'inclure dans leur modèle des critères qualitatifs. La particularité des critères qualitatifs est, peut être, la difficulté d'en donner une définition claire et qui ne peut être controversée. Parmi les critères considérés appartenant à cette catégorie, nous avons :

A.12 Maximisation des similarités (ou la minimisation des dissimilitudes) entre produits de même famille

Ce critère adhère à la l'esprit de la philosophie TG. Pour mesurer la similarité (recip. la dissimilitude) entre deux produits, on utilise, en général, une fonction qui calcule les similitudes (recip. Les dissimilitudes), entre les vecteurs lignes associés, de la matrice d'incidence MIPM. Le pionnier de cette technique est McAuley [45] qui a utilisé le coefficient de similarité de Jaccard (*JSC* pour Jaccard's Similarity Coefficient) défini par la formule :

$$JSC = \frac{\text{Nombre de paires dont les composants sont égaux à un}}{\text{Nombre de paires dont un composant, au moins, est égal à un}}$$

Quatorze coefficients de similarités sont analysés dans [5]. Un autre survol est réalisé dans [74]. Les approches relativement récentes, ayant opté pour les coefficients de similarité, utilisent des formules plus élaborées incluant des informations concernant les volumes de production, les temps de fabrication et les séquences d'opérations. Parmi les travaux qui ont choisis ce critère, nous citons [59, 25, 64, 67, 37, 3, 32, 71, 4]. Pour tenir compte de ce critère, nous avons besoin d'informations sur l'affectation des produits aux familles.

A.13 Minimisation du coût de reconfiguration

Ce critère est exclusivement considéré par les

approches dynamiques. Dans ce type d'approche certains inputs (tels que séquences d'opérations, demandes en produits) peuvent changer dans le temps. Par conséquent, l'horizon de planification est subdivisé en un ensemble de périodes dans lesquelles vont être implantées des compositions distinctes. Ceci engendre un coût de reconfiguration qui mesure le double coût des changements devant être appliqués sur la structure du système et leurs effets (déplacements de machines, temps improductif). Les auteurs de [16, 73, 49, 20] calculent ce coût de manière classique sur la base des machines déplacées. [10] après exposé des limites de la méthode classique, calcule ce coût de manière indirecte en se basant sur une codification des compositions de cellules.

A.14 Maximisation de la flexibilité

Bien que le terme flexibilité soit un leitmotiv de la littérature traitant de composition de cellules, le passage suivant permet de se rendre compte de la difficulté de sa définition : «Ten or fifteen years ago, quality was much like flexibility is today: vague and difficult to improve yet critical to competitiveness ... Flexibility is only beginning to be explored ... It means different things to different people» [66]. Nous invitons le lecteur, désireux de découvrir les différentes facettes de ce concept, à consulter [21]. Ce qui nous intéresse c'est la manière avec laquelle ce critère a été pris en compte par les travaux de recherche effectués dans le domaine. Nous avons pu recensé deux applications :

La première [37] consiste à mesurer la flexibilité par le nombre de produits pouvant être directement fabriqué par le système cellulaire. En effet, les auteurs proposent une approche qui consiste à convertir un système *jobshop* en un système cellulaire. Certains produits du système d'origine, qui n'ont pu être assignés à des familles pendant le procédé d'optimisation, sont amenés à être sous-traités. Mais au lieu de minimiser le coût de sous-traitance, les auteurs procèdent à la maximisation du nombre de produits retenus. Ceci nous permet de tirer le constat que le critère ainsi défini est dual au critère de minimisation du coût de sous-traitance.

Dans la deuxième application [71], les auteurs partent du fait que si une machine tombe en panne, il est utile de pouvoir réaffecter sa charge sans pour autant produire un grand retard de production. Pour ce faire, les auteurs proposent de définir pour chaque machine un seuil d'utilisation inférieur à la capacité réelle de la machine en question (une proposition similaire est donnée dans [67], mais sans faire allusion à son utilisation pour mesurer la flexibilité). Ce seuil d'utilisation n'est pas imposé comme contrainte mais par une pénalité. S'il n'est pas respecté une pénalisation est calculée mesurant le degré de violation du seuil d'utilisation par rapport à la capacité de la machine. Ainsi, à chaque solution est affecté un degré de conformité, avec ce souhait, égal à la moyenne des

pénalisations associées à l'ensemble des machines.

Il est évident que ce procédé ne peut être réalisé avec des approches classiques qui ne considèrent pas des routages alternatifs (la considération de la duplication de machine est un cas particulier de la prise en compte des routages alternatifs) car les utilisations des machines sont dans ce cas constantes.

A.15 Maximisation de l'efficacité de production

Dans [37], les auteurs affirment que l'efficacité d'un système de production est le résultat de la simplification des flux de production, de la réduction des tâches de manutention et des temps de fabrication. Par conséquent, ils jugent que la mesure de l'efficacité passe par l'évaluation de ces trois paramètres. Or, ils estiment que la détermination de ceux-ci dans l'étape de composition est difficile, voire impossible, car certaines informations qui y sont liées telles que les distances des trajets (dépendant de l'emplacement des cellules et des machines sur le sol de l'atelier) et les temps de fabrication (influencés par les décisions d'ordonnancement) sont inconnues. Les auteurs finissent alors par utiliser les coefficients de similarité en guise de mesure indirecte de l'efficacité.

B. Observations sur les critères

Après avoir survolé les critères proposés dans la littérature, quelqu'un serait tenté par l'élaboration d'un modèle incluant cette pléthore de critères. Cependant, considérer un nombre élevé de critères peut conduire à des difficultés de résolution. En particulier, lorsque celle-ci se conforme à l'esprit d'optimisation Pareto, car la taille du front Pareto devient trop grande à la mesure que le nombre de critères croît [22, 19].

Si on se trouve amené à opérer une réduction du nombre d'objectifs, il est nécessaire que ça soit avec une démarche rigoureuse. Parmi les efforts déployés dans ce contexte, il y a le travail réalisé dans [53]. L'auteur essaye d'apporter une approche formelle à ce que fait de façon non formelle tout chercheur confronté à un problème comportant un nombre consistant de critères. Il classe les relations pouvant lier les critères en trois : indépendance, harmonie et conflit (voir figure 1 [53]). À la lumière de ces relations, les critères sont analysés pour n'en garder en fin qu'un sous-ensemble restreint.

Deux critères sont en conflit si l'amélioration de l'un cause la dégradation de l'autre. Ils sont en harmonie si l'amélioration de l'un entraîne l'amélioration de l'autre. Enfin, l'indépendance décrit le fait qu'une amélioration sur l'un des critères n'a aucune influence sur l'autre. Cependant, l'auteur exploite ces différentes relations en se fiant à un échantillon tiré de la population de solutions que procure son approche évolutionnaire. Or, une telle démarche peut conduire à des déductions erronées, à la mesure où l'échantillon peut ne pas être représentatif. En

outre, qui est ce qui empêche que le caractère conflictuel ou harmonique de deux critères donnés dépende des instances du problème : i.e. pour les uns ils y a conflit, pour les autres il y a harmonie ?

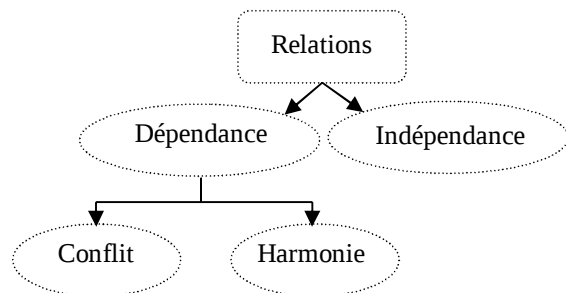


Fig. 1. Relations entre critères.

Une autre démarche que nous proposons repose sur la redondance et l'incohérence dans la prise en compte simultanée de certains critères.

Pour notre problème, le recours à une définition indirecte pour le critère d'efficacité l'a rendu redondant, du moment qu'il est devenu avec la définition précédente équivalent au critère de similarité (voir paragraphe IV.A.15). En outre, le critère de minimisation des éléments spéciaux est redondant à la mesure qu'il est pris en considération par le critère des mouvements intercellulaires. Ce dernier est à son tour redondant, car il est pris en compte par le critère de trafic intercellulaire.

D'autre part, un cas d'incohérence est généré par la considération simultanée des critères de minimisation des mouvements *inter* et *intracellulaires*. En effet, les mouvements des produits peuvent être déduits directement des routages. Du moment qu'un mouvement est soit intercellulaire soit intracellulaire, en considérant des routages fixes pendant la totalité de l'horizon de planification, la somme de ces mouvements est toujours constante. Certains chercheurs [26] ont opté pour la combinaison de ces deux critères dans un modèle multicritère en utilisant la technique de la somme pondérée. On peut affirmer qu'en réalité, cette combinaison ne permet d'optimiser qu'un seul critère. En effet, la somme des mouvements *inter* et *intracellulaires* étant constante, en supposant f_1 et f_2 les fonctions objectif mesurant les mouvements *inter* et *intracellulaires* respectivement, nous aurons :

$$\text{Min } Z = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 \Leftrightarrow \text{Min } Z = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot (c - f_1)$$

ceci en posant $c = f_1 + f_2$. Donc,

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 &\Leftrightarrow \text{Min } Z = (w_1 - w_2) \cdot f_1 + w_2 \cdot c \\ &\Leftrightarrow \text{Min } Z' = (w_1 - w_2) \cdot f_1 \end{aligned}$$

car le terme $w_2 \cdot c$ est constant.

Or, w_1 est pris supérieur à w_2 car il est communément admis que le critère de minimisation du trafic intercellulaire est, de loin, plus important que la minimisation du trafic intracellulaire. Par conséquent,

$$\text{Min } Z = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 \Leftrightarrow \text{Min } Z'' = f_1$$

Ce développement permet donc de déduire que la minimisation de la somme pondérée de ces critères revient à minimiser l'un des critères uniquement. Notons que les articles [26, 41] ne considèrent que les deux critères évoqués (L'auteur du survol restreint aux approches multicritères [43] a quand même inclus la référence [26] dans son travail).

La démarche de réduction la plus utilisée et peut être celle qui analyse les différentes combinaisons d'objectifs

dans la littérature. Dans [43], l'auteur retient les critères : coût de duplication de machines, trafic intercellulaire, mouvements intercellulaires et écarts de charge intracellulaires, à minimiser. Le survol que nous avons réalisé, ajoutant plus d'une trentaine d'articles, montre que la minimisation des trafics intercellulaires, qui est une généralisation du critère des mouvements intercellulaires, est de loin le plus récurrent (voir la table 1).

TABLE I
RECENSEMENT DES CRITERES

Articles	Critères														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
[1]	*														
[2]		*							*	*	*				
[4]												*			
[3]												*			
[6]				*		*									
[7]						*		*							
[8]	*														
[10]						*							*		
[13]				*		*									
[16]				*		*							*		
[17]						*	*								
[15]							*								
[18]		*													
[20]				*		*		*					*		
[24]		*					*								
[26]		*	*												
[27]			*						*						
[28]						*									
[29]						*									
[30]								*							
[31]				*											
[32]												*			
[33]							*								
[36]										*					
[37]												*		*	*
[38]			*												
[39]		*	*				*								
[41]		*	*												
[42]				*	*										
[44]		*		*			*			*					
[46]								*				*			
[48]							*								
[50]	*														
[47]				*				*							
[51]						*									
[52]						*				*					
[54]		*					*		*						
[55]								*				*			
[56]								*							
[58]		*			*										
[59]												*			
[60]		*													
[62]			*			*			*	*					
[63]		*	*												
[64]												*			
[65]					*	*									
[67]												*			
[68]						*			*						
[69]						*			*						
[70]		*	*								*				
[71]							*					*		*	
[72]					*				*	*					
[73]			*			*							*		
[75]		*	*						*						
[76]							*								

L'analyse des critères nous permet de retenir les critères suivants consistant en la minimisation :

1. des trafics intercellulaires ;
2. des écarts de charges intercellulaires ;

3. des écarts de charges intracellulaires ;
et de leur ajouter le cas échéant ;
 4. le coût de fabrication des produits (approche intégrant la flexibilité des routages) ;
 5. le coût de reconfiguration (approche dynamique) ;
- Un tel choix est justifié par les raisons suivantes :

- Le critère de minimisation des trafics intercellulaires est pris en considération dans la majorité des articles survolés.
- La minimisation des écarts de charge est un critère qui se veut palliatif aux effets de bord de la minimisation des trafics sur l'équilibrage des charges de travail intra et inter les cellules.
- Les critères de minimisation des éléments spéciaux et des mouvements intercellulaires peuvent être omis car le critère du trafic intercellulaire en présente une généralisation palliant à leurs insuffisances.
- Le critère de minimisation des mouvements intracellulaires a été omis pour impossibilité de conciliation avec le critère principal.
- La duplication de machines peut ne pas être considérée car elle n'est pas toujours plausible à cause du coût élevé des machines. Ceci a pour effet de rendre négligeable l'apport de certains critères qui ont été justement ajoutés pour pallier aux effets de bord de la duplication, à savoir la minimisation des coûts de duplication, d'évitement et de sous-utilisation de machines. En effet, c'est la duplication qui engendre des problèmes de contournement de machines à l'intérieur des cellules [2]. C'est elle aussi qui est à l'origine de la sous-utilisation des machines engendrée par le surplus de capacité.

Notons enfin que la réduction de critères reste un problème ouvert pour lequel nous proposons une démarche qui consiste à essayer d'élaborer des relations en se fiant à une représentation analytique des critères, les uns par rapport aux autres. Cette représentation permettra de déceler le type de relation liant les différents critères (conflictuelle, harmonique ou non conciliable). Une telle représentation devient de plus en plus difficile lorsque les critères n'utilisent pas les mêmes inputs. Dans ce cas une étude de la corrélation entre ces derniers peut être envisagée.

V. CONCLUSIONS

Afin de mieux appréhender le problème de composition de cellules, nous avons identifié les différentes décisions devant être prise pour sa résolution, les contraintes pratiques à considérer et les critères à ne pas occulter. Tout au long du survol réalisé, quelques problèmes ouverts ont été exposés, tels que l'élaboration d'une approche intégrée incluant la totalité des décisions de manière dynamique et l'adoption d'une démarche de réduction de critères scientifiquement fondée. Autant de questions à développer qui informe que le problème de composition de cellules n'est pas encore prêt à livrer tous ses secrets.

REFERENCES

- [1] Adil GK., Rajamani D., Strong D., Cell formation considering alternate routings. *Int. J. Prod. Res.*, 34 (5): 1361-80. 1996.
- [2] Akturk MS., Balkose, H. O., Part-machine grouping using a multiobjective cluster analysis. *Int. J. Prod. Res.*, 34, 2299-315. 1996.
- [3] Al-Sultan KS, Fedjki CA. A genetic algorithm for the part family formation problem. *Production Planning & Control*. 8(8):788-96. 1997.
- [4] Albadawi Z., Bashir H. A., Chen M., A mathematical approach for the formation of manufacturing cells, *Computers & Industrial Engineering* 48:3-21. 2005.
- [5] Anderberg, MR., *Cluster analysis for applications* (New York: Academic Press), 1973.
- [6] Askin RG., Chiu K.S., A graph partitioning procedure for machine assignment and cell formation in GT, *IJPR* 28 (2): 1555-72. 1990.
- [7] Atmani A., Lashkari R.S., Caron R.J., A mathematical programming approach to joint manufacturing cell formation and operation allocation in cellular manufacturing. *Int. J. Prod. Res.* 33: 1-15 1995.
- [8] Bector FF., A Linear Formation of the Machine-Part Cell Formation Problem. *Int. J. Prod. Res.*, 29(2):343-56, 1991.
- [9] Boulif M., Atif K., A new branch-&-bound-enhanced genetic algorithm for the manufacturing cell formation problem. *Computers & Operations Research* 33:2219-2245. 2006.
- [10] Boulif M., Atif K., "A new Fuzzy genetic algorithm for the dynamic manufacturing cell formation problem considering Passive and active strategies", *International Journal of Approximate Reasoning*, 47(2):141-165, 2008.
- [11] Burbidge JL. Production flow analysis. *Production Engineer*, 42:742-52. 1963. In [12].
- [12] Burbidge JL., *The introduction of Group Technology*. John Wiley. 1975.
- [13] Cao D., Chen M., "Using penalty function and Tabu search to solve cell formation problems with fixed cell cost", *Computers & Operations research*, 31:21-37. 2004.
- [14] Chandrasekharan MP., Rajagopalan R. "Groupability: an analysis of the properties of binary data matrices for group technology", *Int. J. Prod. Res.*; 27(6):1035-52, 1989.
- [15] Chen SJ., Cheng C., A Neural Network-Based Cell Formation Algorithm in Cellular Manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, 33(2):293-318, 1995.
- [16] Chen M., A Mathematical Programming Model for System Reconfiguration in a Dynamic Cellular Manufacturing Environment". *Annals of Operations Research*, 77(1):109-28, 1998.
- [17] Chen SJ., Hearagu S., Stepwise decomposition approaches for large scale cell formation problems, *EJOR* 113: 64-79. 1999.
- [18] Dahel, N.-E., Smith, S. B., Designing flexibility into cellular manufacturing systems. *Int. J. Prod. Res.*, 31, 933-45. 1993. in [43].
- [19] Deb K., *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2001, in [53].
- [20] Defersha FM., Chen M., "A linear programming embedded genetic algorithm for an integrated cell formation and lot sizing considering product quality", *Euro. J. Operl. Res.*, 187:46-69, 2008.
- [21] De Toni A., Tonichia S., Manufacturing flexibility: a literature review. *IJPR*, 36(6): 1587-617. 1998.
- [22] Fonseca C. M., Fleming P. J., Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms —Part II: An application example, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part A: Systems and Humans 28(1): 38-47. 1998. In [53].
- [23] Garcia H., Proth J.M., 1986, A New Cross-Decomposition Algorithm: The GPM, *Control and Cybernetics*, 15(2), P.155-165.
- [24] Gonçalves JF., Resende MGC., A hybrid genetic algorithm for manufacturing cell formation. AT&TLabs Research Technical Report TD-5FE6RN; 2002.
- [25] Gupta T., Seifoddini H. Production data based similarity coefficient for machine-component grouping decision in the design of a cellular manufacturing system., 28:1247-69. 1990.
- [26] Gupta Y., Gupta M., Kumar, A., Sundram C., Minimizing Total Intercell and Intracell Moves in Cellular Manufacturing: A Genetic Algorithm approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 8(2):92-101, 1995.
- [27] Gupta Y., Gupta M., Kumar A., Sundaram C., 1996, A genetic algorithm-based approach to cell composition and layout design problems. *Int. J. Prod. Res.*, 34, 447-82. In [43].
- [28] Harhalakis G, Proth J-M, Xie X., Manufacturing cell design using simulated annealing. *Int. J. Prod. Res.* 1:185-91. 1990.

- [29] Harhalakis G., Ioannou I., Minis I., Nagi R., Manufacturing Cell Formation under Random Product Demand. *Int. J. Prod. Res.*, 32(1):47-64, 1994.
- [30] Ho YC., Moodie C.L., Solving cell formation problems in a manufacturing environment with flexible processing and routing capabilities. *Int. J. Prod. Res.*, 34, 2901-23. 1996. in [43].
- [31] Irani S.A., Cavalier T.M., Cohen P.H., Virtual Manufacturing Cells: Exploiting Layout Design And Intercell Flows For The Machine Sharing Problem, *Int. J. Prod. Res.*, (31)4:791-810. 1993.
- [32] Jayakrishnan Nair G., Narendran T.T., A Clustering Algorithm for Cell Formation with Sequence Data, *Int. J. Prod. Res.*, (36)1:157-79. 1998.
- [33] Joines JA, Kay MG, King RE., A hybrid genetic algorithm for manufacturing cell design. Technical Report, Department of Industrial Engineering, North Carolina State University; 1997.
- [34] King J., Machine-Component Grouping in Production Flow Analysis: An Approach Using a Rank Order Clustering Algorithm. *Int. J. Prod. Res.*, 18(2): 213-32, 1980.
- [35] Kumar KR, Chandrasekharan MP., Grouping efficacy: a quantitative criterion for goodness of block diagonal forms of binary matrices in GT. *IJPR*, 28(2): 233-43. 1990.
- [36] Lee SD., Chen Y.L., A weighted approach for cellular manufacturing design: minimizing intercell movement and balancing workload among duplicated machines. *Int. J. Prod. Res.*, 35, 1125-46. 1997. in [43].
- [37] Liang M., Taboun S.M., Converting functional manufacturing systems into focused machine cells, a bicriterion approach. *Int. J. Prod. Res.*, 33: 2147-61. 1995.
- [38] Logendran R., Impact of sequence of operations and layout of cells in cellular manufacturing, *IJPR*, 29(2): 375-90.
- [39] Logendran R., A binary integer programming approach for simultaneous machine-part grouping in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 24:329-36, 1993. in [43].
- [40] Logendran R., Ramakrishna P., Srisaandarajah C., Tabu search based heuristics for cellular manufacturing systems in the presence of alternate process plans. *IJPR*, 32(2): 273-97. 1994.
- [41] Logendran R., Ramakrishna P., Manufacturing cell formation in the presence of lot splitting and multiple units of the same machine. *Int. J. Prod. Res.*, 33, 675-693. 1995.
- [42] Logendran R., Ramakrishna P., A methodology for simultaneously dealing with machine duplication and part subcontracting in cellular manufacturing systems. *Computers & Operations Research*. 24(2): 97-116. 1997.
- [43] Mansouri S.A., Moattar-Husseini S.M., Newman S.T., A review of the modern approaches to multi-criteria cell design, *Int. J. Prod. Res.*, 38(5):1201-18. 2000.
- [44] Mansouri S.A., Moattar-Husseini S.M., Zegordi SH., Multi-criterion tackling bottleneck machines and exceptional parts in cell formation using genetic algorithms. 2002.
- [45] McAuley J., Machine Grouping For Efficient Production, *Production Engineer*, Vol. 52, February, p.53-57, 1972. In [61].
- [46] Min H., Shin D., Simultaneous formation of machine and human cells in group technology: a multiple objective approach", *Int. J. Prod. Res.*, 31, 2307-18. 1993.
- [47] Moon C., Gen M., A genetic algorithm based approach for design of independent manufacturing cells. *International Journal of Production Economics*, 60-61 pp. 421-426. 1999.
- [48] Mukhopadhyay S.K., Gopalakrishnan A., A vector analytic (VECAN) method for solving the machine-part grouping problem in GT. *IJPR*, 33(3): 795-818. 1995.
- [49] Mungwattana A., Design of Cellular Manufacturing Systems for Dynamic and Uncertain Production requirements with Presence of Routing Flexibility, PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg. 2000.
- [50] Murthy CVR., Srinivasan G., Fractional Cell Formation in Group Technology, *Int. J. Prod. Res.*, 33(5):1323-37. 1995.
- [51] Nagi R., Harhalakis G., Proth J. M., Multiple routings and capacity considerations in Group Technology applications, *Int. J. Prod. Res.*, 28:2243-57. 1990.
- [52] Pierrelval H., Plaquin M., An evolutionary approach of multicriteria manufacturing cell formation. *Int. Trans. Opl. Res.* 5(1):13-25. 1998.
- [53] Purshouse RC., On the evolutionary optimization of many objectives. PhD thesis, University of Sheffield. 2003.
- [54] Rajagopalan R., Barta J., Design of cellular production systems: A graph-theoretic approach". *Int. J. Prod. Res.*, 13(6):567-79. 1975.
- [55] Rajamani D., Singh N., Aneja Y. P., Design of cellular manufacturing systems. *Int. J. Prod. Res.*, 34, 1917-28. 1996.
- [56] Sankaran S. and Kasilingam R.G., 1993, On cell size and machine requirements planning in group technology. *European Journal of Operational Research*, 69, 373-83.
- [57] Sarker BR., Khan M., "A comparison of existing grouping efficiency measures and a new weighted grouping efficiency measure", *IIE Transactions*, 33:11-27, 2001.
- [58] Shafer SM., Kern G.M., Wei J.C., A mathematical programming approach for dealing with exceptional elements in cellular manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, 30, 1029-36. 1992. In [43].
- [59] Seifoddini H., Single linkage v/s average linkage clustering in machine cells formation applications, *Computers & Industrial Engineering*, 16, 419-426. 1989.
- [60] Sofianopoulou S., Application of simulated annealing to a linear model for the formulation of machine cells in group technology. *Int. J. Prod. Res.*, 35, 501-11. 1997.
- [61] Souilah A., Les systèmes cellulaires de production : Agencement intracellulaire. Thèse de Doctorat; Université de Metz. 1994.
- [62] Su CT., Hsu CM., Multi-objective machine-part cell formation through parallel simulated annealing. *Int. J. Prod. Res.* 36(8):2185-207. 1998.
- [63] Suresh NC., Slomp J., Kaparthi S., The capacitated cell formation problem: a new hierarchical methodology. *Int. J. Prod. Res.*, 33, 1761-84. 1995.
- [64] Taboun SM., Sharma A., A weighted index for the design of cellular manufacturing systems. *Computers & industrial Engineering*, 21: 273-77, 1991.
- [65] Taboun SM., Merchawi NS., Ulger T., Part Family and Machine Cell Formation In Multi-Period Planning Horizons of Cellular Manufacturing Systems. *Production Planning & Control*. 9(6): 561-71. 1998.
- [66] Upton D.M., What really makes factories flexible? *Harvard Business Review*, 1995. In [21].
- [67] Vakharia A.J., Wemmerlov U., Designing a cellular manufacturing system: a material flow approach based on operation sequences, *IIE Transactions*, 22(1):84-97, 1990.
- [68] Venugopal V., Narendran T.T., A genetic algorithm approach to the machine-component grouping problem with multiple objectives. *Computers & Industrial Engineering*, 22(4):469-80. 1992.
- [69] Venugopal V., Narendran T.T., Cell formation in manufacturing systems through simulated annealing: an experimental evaluation. *Euro. J. Operl. Res.*, 63:409-22 1992. In [43].
- [70] Verma P., Ding F.Y., A sequence based materials flow procedure for designing manufacturing cells, 33(12):3267-81. 1995.
- [71] Vin E., Delit P. et Delachambre A., Une approche intégrée pour résoudre le problème de formation des cellules de production avec routage alternatifs, MOSIM'03, France. 2003.
- [72] Wei J. C., Gaither N., A capacity constrained multiobjective cell formation method. *Journal of Manufacturing Systems*, 9, 222-32. 1990.
- [73] Wicks EM., Reasor RJ., Designing cellular manufacturing systems with dynamic part populations. *IIE Transactions*, 31: 11-20. 1999.
- [74] Yin Y., Yasuuda K., Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: a taxonomy and review. From Internet. 2001.
- [75] Zhao C., Wu Z., A genetic algorithm approach for manufacturing cell formation with multiple routes and multiple objectives, *IJPR*, 38(2):385-95. 2000.
- [76] Zolfaghari S., Liang M., An objective-guided ortho-synapse Hopfield network approach to machine grouping problems. *Int. J. Prod. Res.*, 35(10):2773-92. 1997.