

LES CELLULES DYNAMIQUES : UN CONCEPT POUR PME

Martin RHEAULT*
Jocelyn DROLET**
Georges ABDULNOUR***

Université du Québec à Trois-Rivières

RÉSUMÉ

Le concept de cellules dynamiques permet aux PME manufacturières d'accroître leur efficacité et leur efficience en améliorant leur flexibilité. Ces entreprises sont exposées à un environnement de plus en plus turbulent, ce qui, traditionnellement, les forçait à conserver un mode de production compatible avec un aménagement fonctionnel. À partir d'un nouveau paradigme, ce concept permet de déplacer les postes de travail pour ainsi reconfigurer des cellules afin de mieux répondre aux exigences de production à l'intérieur d'un horizon donné. Ce concept est articulé à l'intérieur d'un système manufacturier cellulaire dynamique, dont le coeur est un algorithme minimisant le coût marginal de manutention et de configuration. Un exemple est présenté pour démontrer le fonctionnement des cellules dynamique et plus particulièrement cet algorithme.

Mots clés : Cellule virtuelle - production -gestion, heuristique cellule.

Introduction

Dans un contexte de mondialisation des marchés, les entreprises manufacturières sont exposées à un environnement de plus en plus complexe où tout est en perpétuel mouvement (Hayes et Pisano, 1994). Parmi ces entreprises, les PME produisant à la commande ou sous-traitantes évoluent dans un environnement extrêmement dynamique qui exige une grande flexibilité et une capacité d'adaptation.

* Martin Rheault est détenteur d'un baccalauréat en génie industriel de l'Université du Québec à Trois-Rivières et est présentement étudiant à la maîtrise en productique à la même institution. Il a travaillé à titre de professionnel à la Chaire Bombardier Sea-Doo/Ski-Doo pendant près de trois ans et occupe présentement un poste d'ingénieur chez GRS International de Boucherville.

** Jocelyn Drolet est professeur en génie industriel à l'Université du Québec à Trois-Rivières depuis 1989. Il détient un baccalauréat en génie industriel de cette université, une maîtrise et un doctorat en génie industriel de l'Université de Purdue en Indiana. Il s'intéresse à la gestion de production assistée par ordinateur, au Juste-à-Temps et d'une manière plus générale aux techniques modernes de planification et de gestion des opérations. Il a donné plusieurs conférences au Canada, aux États-Unis et en Europe et il a publié plus de 50 articles scientifiques. Il est membre de l'Ordre des ingénieurs du Québec et de l'Association internationale de génie industriel.

*** Georges Abdulnour est professeur en génie industriel à l'Université du Québec à Trois-Rivières. Il a reçu son B.Sc.A. et sa M.Sc.A. en génie industriel de l'Université de Moncton ainsi qu'un Ph.D. en génie industriel de la Texas Tech. University (1991). Ses intérêts de recherche portent sur la qualité, la fiabilité la maintenance et la gestion de production. Il est membre de l'ASQC, le MQQ, l'IIE, l'Informs, l'Academic Science de New York, l'Ordre des ingénieurs du Québec, l'ACFAS, etc. Monsieur Abdulnour est membre de l'« Editorial Board » de l'International Journal of Production Research et chercheur associé à la Chaire Bombardier en transfert technologique pour le volet Qualité-Juste-À-Temps.

Ce graphique démontre qu'il y a une relation étroite entre le volume de production et la diversité des produits. Ainsi, si l'on veut produire une faible variété de produits à très grand volume, il serait préférable de spécialiser les processus. À l'inverse, si l'on désire produire une grande variété de produits à faible volume on optera pour des processus très versatiles, ce qui entraînera une diminution de la cadence de production. Par conséquent, ce graphique illustre pourquoi la plupart des PME et particulièrement les sous-traitants sont forcées de conserver un mode de production compatible avec les ateliers multigammes. Or, bien que l'atelier multigammes soit le mode de production le plus flexible, il est souvent le moins efficient. En fait, en excluant la flexibilité, une production en atelier multigammes ne comporte aucun avantage concurrentiel.

Les lignes d'assemblage

À l'opposé, la ligne d'assemblage est le mode le plus efficient, mais un tel mode de production est pratiquement impossible dans un environnement turbulent avec une clientèle diversifiée. En fait les lignes d'assemblages sont peu flexibles et répondent difficilement à des modifications de la gamme d'opérations (Masuyama, 1985). Ce mode de production est plus avantageux lorsque le cycle de vie du produit est dans sa phase de maturité, c'est-à-dire lorsqu'il faut produire à grand volume au plus bas coût possible (Hayes et Pisano, 1994).

Les systèmes manufacturiers cellulaires

La production cellulaire est considérée comme une alternative entre l'efficacité de la ligne d'assemblage et la flexibilité de l'atelier multigammes. Une cellule manufacturière est un regroupement de tous les équipements nécessaires à la production d'une famille de produit. Qu'ils s'agissent de cellules manufacturières ou de cellules flexibles (" *Flexible Manufacturing System - FMS* "), l'approche pour les configurer est similaire, c'est dans leur développement, leur gestion et dans leur capacité qu'elles diffèrent (Greene et Cleary, 1985; Kusiak et Heragu, 1987).

Les techniques de formation des cellules reposent sur la technologie de groupe (*Group Technology*). Il s'agit d'une stratégie qui cherche à exploiter économiquement les similitudes dans la conception, la fabrication et l'assemblage des produits (Harvey, 1992). Il existe plusieurs approches pour la formation des familles et des cellules (Greene et Cleary, 1985; Kusiak et Heragu, 1987). La technique la plus utilisée, à cause de sa simplicité et de son efficacité, s'appuie sur l'utilisation de la matrice pièces/machines ou la PFA (*Production flow analysis*) de Burbidge.

L'efficacité des cellules manufacturières classiques dépend de l'homogénéité des gammes d'opérations d'une même famille de produits. Idéalement, une cellule produit permet de réaliser toutes les gammes d'opérations d'une même famille de produits, minimisant ainsi les flux intercellulaires. Avec le temps, les cellules produits se transforment en cellules désuètes, puis peu à peu, il y a une augmentation des échanges intercellulaires rendant les cellules désuètes (Greene et Cleary, 1985; Kusiak et Heragu, 1987); il s'agit du phénomène de vieillissement des cellules qui est amplifié par la fréquence des changements de la gamme de produits (Kusiak et Heragu, 1987). Dans le cas des PME, le vieillissement des cellules est souvent trop rapide et décourage la plupart des dirigeants à adopter un mode de production cellulaire.

Ce qui complique le choix d'un mode de production, c'est qu'il est lié à l'aménagement de l'usine. Or, un aménagement d'usine est considéré comme une décision stratégique à long terme où la localisation des machines et des postes de travail est souvent maintenue fixe le plus longtemps possible. La plupart des techniques permettant l'élaboration d'un aménagement cherchent donc à définir une disposition flexible des installations industrielles qui prolongerait le temps de services de cet aménagement (Chen et Chung, 1991; Montreuil *et al.*, 1992). C'est pour cela que les PME fonctionnent très souvent en atelier multigammes, elles peuvent ainsi perdurer

leur aménagement tout en maintenant un haut niveau de flexibilité, lequel s'obtient au détriment de l'efficacité.

Ces techniques d'élaboration des aménagements d'installations industrielles se basent sur un vieux paradigme; une machine ne doit pas être déplacée. Par conséquent, l'emplacement d'un poste de travail est planifié à très long terme, de sorte que les coûts de déplacement du poste n'ont que très peu d'influence sur la décision.

Le concept cellulaire dynamique

Or le concept des cellules dynamiques s'appuie sur un autre paradigme: tout poste de travail ou machine peut être déplacé à tout moment, si c'est économiquement justifiable de le faire.

Le concept des cellules virtuelles (Montreuil *et al.*, 1992, Drolet *et al.*, 1995) stipule quant à lui que des postes de travail physiquement dispersés peuvent constituer une cellule virtuelle si les membres de la cellule font partie d'un regroupement logique au sein d'un contrôleur.

Maintenant, dans le cas d'équipements déplaçables, supposons que l'on ajoute cette possibilité aux cellules virtuelles, ceci permettrait la formation de cellules virtuelles physiquement reconfigurables que l'on nomme **cellules dynamiques** (Rheault *et al.*, 1995; Rheault *et al.*, 1996).

Or, c'est justement l'une des principales sources de flexibilité des PME, elles utilisent généralement des équipements plus versatiles et facilement déplaçables (ex.: des perceuses à colonne, des presses à petit tonnage, des tables d'assemblage, etc.). D'ailleurs, lorsqu'une commande représente un volume suffisamment grand, il arrive que l'on forme une cellule spontanément, le temps de produire cette commande, puis on replace les équipements dans leur département (Kusiak et Heragu, 1987). Dans de telles circonstances, il est évident que les coûts de configuration de la cellule soient moindres que les coûts qui auraient été engendrés par la manutention interdépartementale.

Le concept de cellules dynamiques permet donc d'exploiter une force qui est souvent propre aux PME pour en faire un avantage concurrentiel. Techniquement, on cherche à diminuer le nombre des produits retenus pour l'évaluation de l'aménagement en réduisant l'horizon considéré et ainsi, permettre, comme le démontre la figure 1, l'utilisation de la technologie de groupe afin de constituer des cellules manufacturières.

La figure 2 présente les champs d'action des différents modes de production selon la variété des produits. On peut constater que les cellules virtuelles et les cellules dynamiques permettent l'utilisation de la technologie de groupe bien au-delà des cellules classiques. Ce qui distingue une cellule virtuelle d'une cellule dynamique est principalement le niveau technologique des machines et équipements qui les rend plus difficiles à déplacer.

FIGURE 2
Les modes de production selon la variété des produits

	Cellules virtuelles	
	Cellules dynamiques	
Lignes d'assemblages	Cellules classiques ou statiques	Ateliers multigammes
Faible	Variété de produit	Très grande

Le concept de cellules dynamiques est articulé à l'intérieur d'un **Système Manufacturier Cellulaire Dynamique** (SMCD) composé de 4 modules (Rheault *et al.*, 1996). Ces modules sont:

1- Cheminement et affectations; 2- Configuration des cellules dynamiques; 3- Ordonnancement; 4- Monitoring du système. Le coeur de ce système est l'algorithme de configuration des cellules dynamiques puisqu'il permet de déterminer la meilleure configuration des cellules dynamiques pour un horizon donné en assignant les postes de travail à des zones. Le SMDC ne considérera que les pièces présentes dans l'horizon de planification.

Le module de cheminement et affectations

Le module "Cheminement et affectations" détermine le cheminement des produits de même que le volume des échanges en considérant la gamme, les temps d'opérations, la capacité des équipements et la similarité des ajustements ou des opérations. En fait, il existe plusieurs études qui ont couvert le sujet (Greene et Sadowski, 1982; Greene et Cleary, 1985; Kusiak et Heragu, 1987; Chobineh, 1988; Rajmani *et al*, 1992; Drolet *et al*. 1995). Les modèles proposés dans ces études peuvent être utilisés relativement aux performances désirées et favorables au contexte de l'entreprise (Chen et Chung, 1991). Ce module fournit les informations nécessaires au module de configuration des cellules dynamiques. Ce module influence significativement le niveau de performance du système.

Le module de configuration des cellules dynamiques

Le module de configuration des cellules dynamiques détermine la meilleure configuration pour l'ensemble des postes de travail à l'intérieur des zones. Il s'agit d'une évaluation basée exclusivement sur des critères économiques, soient les coûts de manutentions interzones et les coûts de déplacement des postes de travail. Plus précisément, le modèle utilisé cherche à réduire le coût marginal total de toutes les manutentions de produits et de machines l'intérieur de l'horizon de planification à partir d'une programmation en nombres entiers.

On considère une zone comme étant une division logique ou physique du plancher de production. Contrairement à un département ou à une cellule, une zone est une section du plancher pouvant contenir potentiellement n'importe quel poste de travail selon l'espace disponible. Une zone n'est dédiée ni à une famille de produits, ni à un type de processus.

Afin de simplifier le problème, on considère que les échanges intrazones correspondent aux meilleurs flux possibles. Par conséquent, seuls les coûts marginaux des échanges interzones sont considérés. La disposition des postes de travail à l'intérieur des zones n'est pas considérée puisqu'elle n'affecte pas significativement la performance du système. De plus, le nombre limité de postes de travail à l'intérieur des zones rend leur positionnement trivial.

Le problème d'affectation des postes de travail dans des zones est un problème d'optimisation en nombres entiers formulé généralement comme un problème d'assignation quadratique (PAQ) (Francis *et al*, 1992). Cependant, un PAQ est plus facile à formuler qu'à résoudre. Nous avons donc contourné cette difficulté en transposant les variables quadratiques en une série de contraintes. Il s'agit de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques.

L'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques

La formulation de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques est :

$$\text{MIN} \sum_k \sum_z (\text{CG}_{kz} * X_{kz}) + \sum_p \sum_k \sum_l (\text{CM}_{pkl} * E_{pkl} * D_{kl}) \quad (1)$$

Sujet à:

$$\sum_k u_k X_{kz} \leq U_z \quad \forall z \quad (2)$$

$$\sum_z X_{kz} = 1 \quad \forall k \quad (3)$$

$$M(X_{kz} + X_{lw} - 2) + d_{zw} \leq D_{kl} \quad \forall z, \forall w, \forall E_{pkl} > 0 \quad (4)$$

$$X_{kz} + X_{lz} \leq 1 \quad \forall z \quad (5)$$

Les variables et les paramètres sont:

- k un poste de travail ;
- z une zone ;
- l le poste de travail suivant ;
- w la zone pouvant contenir le poste de travail suivant l ;
- p un produit ;
- X_{kz} variable binaire valant 1 si le poste de travail k est dans la zone z, 0 autrement ;
- X_{lw} variable binaire valant 1 si le poste de travail suivant l est dans la zone w, 0 autrement ;
- CG_{kz} le coût de configuration du poste de travail k dans la zone z ;
- CM_{pkl} le coût de manutention d'un lot de transfert du produit p entre les postes k et l par unité de distance ;
- E_{pkl} le nombre d'échanges du produit p entre les poste k et l ;
- d_{zw} la distance entre les zone z et w ;
- D_{kl} la distance entre la zone contenant le poste de travail k et la zone contenant le poste de travail l ;
- u_k l'espace requis par le poste de travail k dans une zone ;
- U_z l'espace disponible de la zone z ;
- M un très grand nombre (millier, million, etc).

La fonction principale (équation 1) minimise la somme des coûts de configuration des postes de travail dans les zones et des coûts de manutention interzones pour tous les lots de transfert considérés dans l'horizon de planification. Comme il s'agit d'une approche dynamique, les coûts de configuration (CG_{kz}) sont recalculés avant chaque activation du modèle selon la localisation des postes de travail. Le nombre d'échanges de produits (E_{pkl}) est défini par le module précédent.

Cette fonction est limitée par au moins trois séries de contraintes. La première série (2) s'assure que l'espace requis par le poste de travail assigné à la zone z ne dépasse pas l'espace disponible. La deuxième série (3) voit à ce que chaque poste de travail soit assigné à une et une seule zone.

La troisième série de contraintes (4) est la formulation qui a permis la transposition du PAQ en un problème de programmation en nombres entiers. Pour chaque paire de postes de travail ayant au moins un échange, la valeur de D_{kl} est définie par la condition la plus restrictive; lorsque les deux variables X_{kz} et X_{lw} sont égales à 1.

Si deux postes ne doivent pas se retrouver dans la même zone, on peut ajouter les contraintes de l'équation 5. Par contre, pour forcer deux postes à toujours être ensemble, il suffit de les modéliser comme une seule machine. Si on veut qu'un poste de travail soit affecté à une zone précise, il suffit d'imposer un coût de configuration nettement plus élevé pour les autres zones.

Le module d'ordonnement

L'ordonnement de la production dans un SMCD relève encore d'études à venir puisqu'il n'y a pas encore de modèle conçu spécifiquement pour ce concept. Cependant, l'attribution des postes de travail, le cheminement des produits et la configuration des cellules dynamiques sont déjà connus pour un horizon donné. Donc, ce module doit élaborer un calendrier de production à partir de ces résultats et des données concernant les temps d'opération, les temps de mise en course, les temps de déplacement des postes, ainsi que les séquences d'opération. Selon les performances que l'on veut rencontrer (minimiser le temps de passage, respecter les dates due, etc.), le module emploiera des règles d'ordonnement soient à un ou deux niveaux (Ruben *et al*, 1993) et estimera le début et la fin de la production des commandes. En plus, ce module doit déterminer le moment le plus judicieux de déplacer les postes pour reconfigurer les cellules. Notons qu'à ce niveau, il peut être stratégique d'attendre le plus longtemps possible avant de reconfigurer les cellules, en particulier, si on s'attend à de nouveaux événements forçant une réévaluation des modules précédents. Autant que possible, un poste de travail doit être déplacé à un moment qui n'engendre pas un arrêt de production. En fait, ce module joue trois rôles distincts qui se résument ainsi:

1. minimiser les arrêts de production ;
2. fournir au module suivant (le contrôleur du système) les informations lui permettant de suivre l'évolution de la production ;
3. établir un plan de production compréhensible pour le personnel concerné.

Le module de contrôle du système

Le dernier module doit maintenir le système aussi stable que possible en activant les modules appropriés seulement lorsque certaines variables d'écarts dépassent des seuils (Rheault *et al*, 1995). Ces seuils ont été pré-établis par le gestionnaire afin de donner le niveau souhaité de sensibilité aux turbulences. Si les seuils sont trop faibles, le module de contrôle tentera continuellement de reconfigurer la disposition des machines, créant une activité ou une dynamique trop grande dans l'atelier. À l'opposé, si les seuils sont trop élevés, le module de contrôle pourrait manquer certaines occasions très profitables.

La détermination des seuils et des stratégies d'activation est un autre champ de recherche pour lequel il reste encore beaucoup à faire. Les recherches en cours évaluent l'impact sur les performances d'un SMCD pour les facteurs suivants:

- L'arrivée de nouvelles commandes à l'intérieur de l'horizon de planification ;
- La durée d'un arrêt de production ;
- Les retards de production ;
- Une panne d'équipement ;
- L'horizon de planification ;

etc.

Exemple

L'exemple qui suit permet de représenter de façon concrète le concept de cellules dynamiques et plus particulièrement le comportement de l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques. Nous avons élaboré un exemple simple, à partir d'une petite usine, pour faciliter la compréhension de son déroulement. Voici les hypothèses préalables proposées pour simplifier l'exemple:

1. l'arrivée des commandes est aléatoire ;
2. Les gammes ont en général de 2 à 3 phases (une phase étant une visite à un poste de travail) ;
3. Les postes de travail sont déterminés à l'aide d'une distribution discrète uniforme allant de 1 à 13. Ce numéro identifie le poste correspondant ;
4. Le nombre de lots de transfert par produit est fixées arbitrairement entre 1 et 200 lots, afin de générer de grands écarts de volume.

Les coûts de manutention et de reconfiguration ont été déterminés sur la base des connaissances des PME manufacturière, lesquelles, découlent directement des observations effectuées lors des études de caractérisation en juste-à-temps des entreprises membres de la Chaire Bombardier sea-doo/ski-doo.

L'exemple compare une production en ateliers multigammes à un système manufacturier cellulaire dynamique à partir des paramètres suivants:

FIGURE 3

Configuration initiale de l'usine en ateliers multigammes

L'aménagement initial:

- 13 postes de travail,
- 4 zones (z) de dimension identiques ($U_z=4$).
- le poste #9 nécessite 2 fois plus d'espace que les autres.
- Le poste #10 ne peut être localisé dans la zone #2
- Le poste #13 est le plus cher à déplacer.
- Le poste #11 est le moins cher à déplacer
- Le coût de manutention des lots est le même pour tous les produits, soit 0,20\$/pied (0,65\$/m).

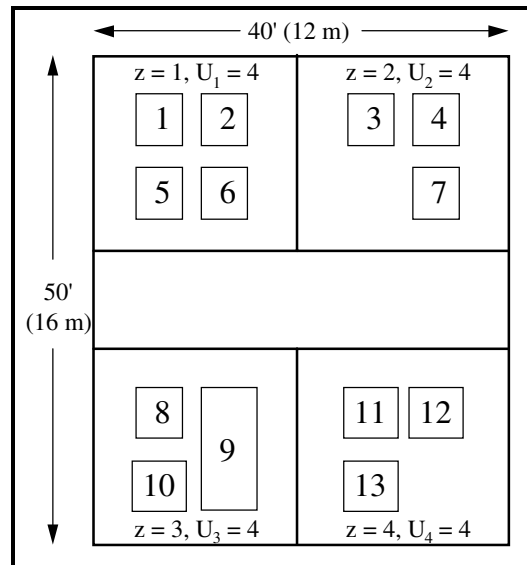


TABLEAU 1
Commandes à produire pendant l'horizon de production

Commande ou Produit	Cheminement	Quantité (nombre de lots de transfert)
1	8 Ø 5	1
2	5 Ø 10 Ø9	5
3	5 Ø 10	7
4	2 Ø 4	5
5	11 Ø 12	10
6	1 Ø 6 Ø 13	15
7	2 Ø 4 Ø 3	50
8	11 Ø 7	100
9	6 Ø 13	200

TABLEAU 2
Matrice des distances interzones (pieds)

De - À	zone #1	zone #2	zone #3	zone #4
zone #1	0	20	30	50
zone #2	20	0	50	30
zone #3	30	50	0	20
zone #4	50	30	20	0

Les produits du carnet de commande devant être fabriqués à l'intérieur de l'horizon de production sont présentés au tableau 1.

TABLEAU 3
Matrice des coûts de configuration des postes (\$)

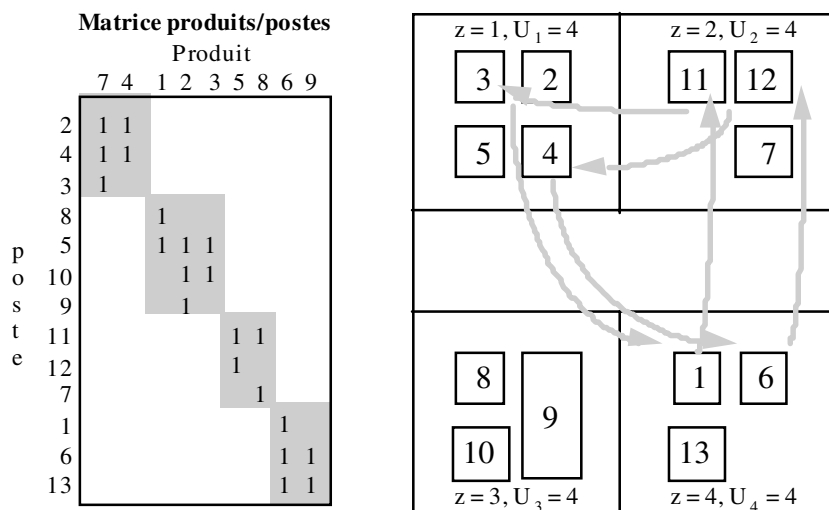
# poste	zone #1	zone #2	zone #3	zone #4
1	0	12	13	15
2	0	50	53	55
3	30	0	35	33
4	41	0	49	45
5	0	52	55	53
6	0	62	64	68
7	70	0	70	70
8	24	25	0	20
9	20	23	0	15
10	40	400	0	40
11	11	9	8	0
12	25	25	25	0
13	130	120	100	0

Le tableau 2 présente les distances interzones qui resteront constantes, tandis que le tableau 3 présente les coûts de configuration des postes de travail selon l'aménagement en cours. Ces coûts sont réajustés avant chaque activation du module de configuration des cellules dynamiques.

La figure 4 présente la nouvelle configuration suggérée par le système cellulaire dynamique. Le coût de cette reconfiguration est de 188\$ ($15\$+68\$+9\$+25\$+30\$+41\$$) pour les déplacements de machines et de 36\$ ($6\$+30\$$) pour la manutention des lots de transferts pour un total de 224\$. Ceci en supposant qu'il y a eu 25 lots de transfert de complétés pour la commande/produits #7 et 50 lots de transfert pour les commandes/produits #8 et #9. Les commandes/produits #1 et #2 sont quant à elles terminés.

On peut comparer la solution proposée par l'algorithme de configuration des cellules dynamique avec la matrice pièces/machines équivalente puisqu'ils sont pratiquement similaire, sauf pour le poste #5 qui n'est pas regroupé avec les autres postes de sa cellule. En fait, le déplacement de ce poste n'aurait pas été économiquement justifié puisque la zone #3 n'avait plus d'espace.

FIGURE 4
Première reconfiguration des cellules dynamiques

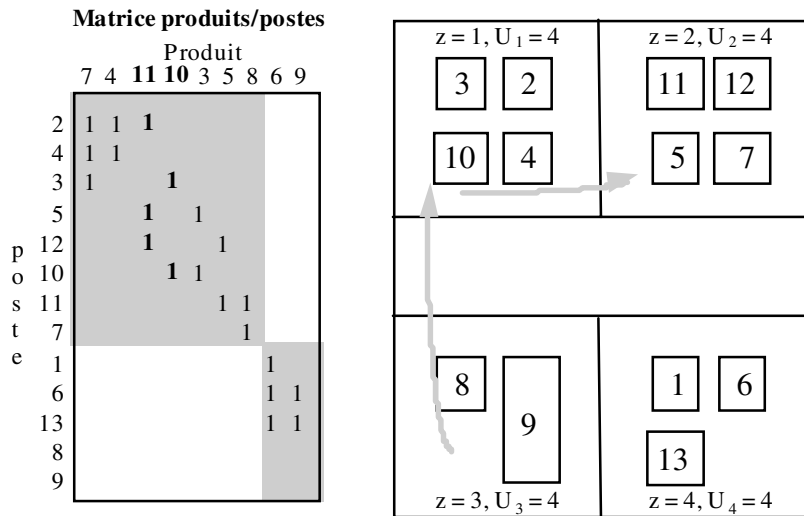


Pour l'atelier dont la configuration est resté en atelier multigammes (l'aménagement initial), les coûts de manutention s'élèvent, à ce moment, à 936\$ (6\$+30\$+100\$+300\$+500\$) contre 224\$ pour les cellules dynamiques.

Après un certain temps, l'arrivée de deux nouvelles commandes incite le module de contrôle à une réévaluation du système.

nouvelles commandes	Routage	Quantité (nombre de lot de transfert)
10	3 - 10	20
11	2 - 5 - 12	5

FIGURE 5
Deuxième reconfiguration des cellules dynamiques



La figure 5 présente une seconde reconfiguration qui tient compte des nouvelles commandes et de l'avancement de la production. Son coût de configuration est de 92\$ (40\$+52\$). On peut noter, à partir de la matrice pièces/machines, qu'il n'y a que deux regroupements distincts. Le module de configuration a aussi obtenu ces regroupements et a concentré les postes du premier regroupement dans les zones #1 et #2.

Après une autre période de temps, deux nouvelles commandes apparaissent dans l'horizon de planification et le système réagit de nouveau. L'état de la production est :

Les commandes #7 et #8 sont maintenant complétées et il ne reste que 100 lots à faire pour la commande #9. Les commandes 3, 4, 5 et 6 ne sont toujours pas commencées.

Les nouvelles commandes sont:

Nouveaux produits	Cheminement	Quantité (nombre de lot de transfert)
12	4 - 9	20
13	2 - 1 - 7	5

Malgré l'arrivée de ces nouvelles commandes, le modèle de configuration des cellules dynamiques recommande de ne rien déplacer et de maintenir la configuration actuelle.

Jusqu'à cette période le système cellulaire dynamique a généré des coûts marginaux de manutention et de configuration de 316\$, tandis qu'avec l'aménagement initial, les coûts seraient de 1 836\$, soit une réduction de 1 520\$ (83%). Cette réduction a été obtenue après seulement deux reconfigurations physiques des cellules. Cependant, il s'agit ici d'un exemple cherchant à démontrer le concept de cellules dynamiques et non le résultats d'un design expérimental complet considérant l'ensemble des modules d'un système manufacturier cellulaire dynamique.

Conclusion

Le concept de cellules dynamiques est tout récent et il reste encore beaucoup de développement à faire avant de pouvoir proposer un système manufacturier cellulaire dynamique entièrement opérationnel. Par contre, nous croyons que l'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques est une base solide permettant la concrétisation de ce nouveau concept. Le cas présenté illustre le fonctionnement des cellules dynamiques, mais il n'est pas assez approfondi pour apprécier toutes ses particularités. Il permet cependant, de démontrer le potentiel de ce concept pour les PME manufacturières qui sont en présence d'un environnement turbulent.

Le concept des cellules dynamiques vise à accroître l'efficacité et l'efficience de ces PME tout en conservant leur flexibilité.

Bibliographie

- CHEN, I. J. and C. H. CHUNG (1991), Effects of loading and routing decisions on performance of flexible manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, vol. 29, no. 11, pp. 2209-2225,.
- CHOBINEH, F., (1988), A framework for the design of cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, vol. 26, no. 7, pp. 1161-1172,.
- DROLET, J. , B. MONTREUIL et C.L. MOODIE, (1995), Scheduling Framework for Virtual Cellular Manufacturing Systems, *International Journal of Manufacturing System Design*, World Scientific Publishing Company, Vol. 1, No 4, pp. 351-365.
- FRANCIS, L. R., L. F. MCGINNIS Jr and J. A. WHITE (1992), In: *Facility Layout And Location: An Analytical Approach* , Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- GREENE, T. J. and R. P. SADOWSKI, (1984), Cellular Manufacturing Control, *Journal of Manufacturing Control*, vol. 2, no. 2, pp. 137-145.
- GREENE, T. J. and R. P. SADOWSKI, (1984), A Review of Cellular Manufacturing Assumptions, Advantages and Design Techniques, *Journal of Operations Management*, vol. 4, no. 2, February 1984.
- GREENE, T. J. and C. M. CLEARY, (1985), Is Cellular Manufacturing Right For You ?, *1985 Annual International Industrial Engineering Conference Proceedings*, pp. 181-190.
- HARVEY S., (1992), *Modélisation et implantation orienté organisme d'un système manufacturier cellulaire virtuel* , Essai de maîtrise, Faculté des sciences et de l'administration de l'université Laval, Québec, Qc, Canada,.
- HAYES, R. H. and G. P. PISANO, (1994), Beyond Word-Class: The new manufacturing strategy, *Harvard Business Review*, pp. 77-86, janvier-février.
- IRANI, S. A., (1993), Some new insights on the design of cellular manufacturing systems, *2nd Industrial Engineering Research Conference Proceedings*, IIE, pp. 51-55, 1993.
- KUSIAK, A. and S. HERAGU, (1987), Group Technology, *Computers in Industries*, no. 9, pp. 83-91.

- MASUYAMA, A., (1985), Idea and practice of flexible manufacturing system of Toyota, *Flexibles Manufacturing, Recent developpement in FMS, Robotics, CAD/CAM, CIM*, Elsevier, pp. 141-152.
- MONTREUIL, B., U. VENKATADRI and P. LEFRANÇOIS, (1991), Holographic layout of manufacturing systems, *19th IIE Systems Integration Conference*, Orlando, Florida, USA, octobre.
- MONTREUIL, B., J. DROLET and P. LEFRANÇOIS, (1992), Conception et gestion de systèmes manufacturiers cellulaires virtuels, *Challenging Traditional Thinking Annual International Conférence 1992*, Proceeding of the APICS 35th international conference and exhibition, Montréal, Qc, Canada, publ. by APICS, Falls Church. VA, USA, p.410-414, 1992.
- RAJMANI, D., N. SINGH and Y. P. ANEJA, (1992), A model for cell formation in manufacturing systems with sequences dependence, *International Journal of Production Research*, , vol. 30, no. 6, pp. 1227-1235.
- RAMUDHIN, A. et R. ROCHETTE, (1991), *Just-in-Time practices in an unstable environment: A simulation study*, Document disponible au Département de génie industriel de l'UQTR, CP 500 Trois-Rivières, Québec, Canada.
- RHEAULT, M., J. DROLET and G. ABDULNOUR, (1995), Physically Reconfigurable Virtual Cells : A Dynamic Model for a Highly Dynamic Environment., *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 29, No 1-4, pp 221-225.
- RHEAULT, M., J. DROLET and G. ABDULNOUR, (1996), Dynamic Cellular Manufacturing System (DCMS), présenté au 19e congrès *Computers and Industrial Engineering*, Miami, Floride.
- RUBEN, R. A., C. T. MOSIER and F. MAHMOODI, (1993), A comprehensive analysis of group scheduling heuristics in a job shop cell, *International Journal of Production Research*, vol. 31, pp.1483-1509.