

ETUDE DU PROBLEME D'ORDONNANCEMENT OPEN SHOP $O4|\tau_j|\bar{F}$ PAR LES REGLES DE PRIORITES AU NIVEAU DES POSTES : APPROCHE PAR SIMULATION

N. Ghazi, M. Tadjine

LCP ENP Alger
10, Avenue Hassen Badi, BP. 182,
16200 El Harrach
ghazi_nawel@yahoo.fr, tadjine@yahoo.fr

M. Bakalem

Département Génie Industriel, ENP Alger
10, Avenue Hassen Badi, BP. 182,
16200 El Harrach
Mohammed.bakalem@gmail.com

RESUME : Dans ce papier, nous traitons un problème d'ordonnancement du type Open Shop dans un atelier d'assemblage flexible à convoyeur circulaire. L'objectif de cette étude est la réduction du temps total de séjours des pièces dans le système, en considérant des règles de priorité au niveau des postes associées à des plans d'assemblage non linéaires non prédéterminés. Les temps de transfert entre les stations sont également considérés. Il s'agit du problème $O_m|\tau_j|\bar{F}$. Du fait de la complexité, NP-difficile au sens fort du problème considéré, la nature dynamique des règles d'ordonnancement testées et la typologie circulaire de la cellule étudiée (rendant le problème « plus combinatoire » par rapport aux lignes d'assemblage linéaires conventionnelles), une approche purement expérimentale moyennant la simulation a été retenue et adoptée. L'instance étudiée est le problème $O4|\tau_j|\bar{F}$.

MOTS-CLES : Cellule flexible d'assemblage ; Open Shop, Ordonnancement ; gamme non linéaires ; Simulation, temps de séjour.

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Une concurrence de plus en plus accrue d'une part, et un marché de plus en plus instable et imprévisible d'autre part, poussent les entreprises à rechercher, de plus en plus, des aptitudes de réadaptation et de réaffectation des moyens de production dans le temps, tant au niveau des types de produit, du procédé utilisé que des volumes réalisés. On parlera de flexibilité et les systèmes de production utilisés sont dits systèmes ou ateliers flexibles.

Le développement de l'automatique et de l'informatique au début des années 80 a fortement favorisé le recours à de tels systèmes. Les Systèmes Flexibles de Production (SFP) ou les Ateliers Flexibles ou encore Flexible Manufacturing System (FMS) sont des systèmes de production fortement automatisés et adaptés à la fabrication en petites et moyennes séries de produits ayant des gammes différentes et ceci à faible coût. La littérature propose différentes définitions des SFP, parmi lesquelles nous retenons celle de Pruvost (M. Jubin, 2003) :

« Un atelier flexible permet la production automatique de pièces de types divers et en quantités variables. Les opérateurs n'interviennent pas directement dans le processus de fabrication et limitent essentiellement leurs interventions à l'entretien. L'ordonnancement est géré par un système informatique. ».

Parmi les SFP, l'open-Shop constitue, incontestablement, l'évolution la plus remarquable dans le sens où les contraintes de précédence entre les opérations d'une gamme de production sont éliminées. Il demeure entendu

que l'Open-shop ne présente d'intérêt qu'à partir du moment où il est de configuration circulaire. Une étude sur la performance d'un atelier Open-shop circulaire d'assemblage a été effectuée par Finke et Dupont (Finke et Dupont, 1993). Cette étude a montré que les performances d'un tel système d'assemblage cyclique sont conditionnées par le robot goulot d'une part, et que la performance, en terme de temps de séjour (C_{max}), ne présentait qu'une amélioration peu significative (moins de 5%) par rapport à celle du même atelier en configuration Job-Shop. Dans les deux cas (Open-Shop et Job-Shop) les pièces sont traitées au niveau des robots selon la règle FIFO.

En partant de ce constat, nous nous proposons d'étudier le comportement du même système Open-shop combiné à un ordonnancement judicieux (règles de priorité autre que FIFO) au niveau des postes robots. L'objectif est de trouver différentes stratégies d'ordonnancement à adopter au niveau des postes et d'analyser leurs impacts sur les performances du système, en termes de réduction du temps de séjours en particulier. Il s'agira de réduire les temps de séjours des pièces dans la cellule par saturation des postes de travail d'où l'intérêt de la relaxation des contraintes de précédence et l'application de règles de priorités au niveau des files d'attente d'entrée des stations de travail.

Le problème d'ordonnancement que nous nous proposons d'étudier est du type Open Shop ou à cheminements libre et notre fonction objectif est la minimisation du temps total de séjours avec considération des temps de transport,

il relève de la classe : $O_m | \tau_j | \bar{F}$ selon la classification de Graham & al. 1979 (ou encore $O_m | \tau_j | \sum C_i$ (A.H.G. Rinnooy Kan, 1976)).

2. DESCRIPTION DU SYSTEME ETUDIE

Le système étudié est caractérisé par des stations de travail arrangées dans un ordre circulaire autour d'un convoyeur en boucle non bloquant à vitesse régulière. Les pièces à assembler sont toujours montées sur des palettes et restent solidaires tout au long du processus d'assemblage. Ainsi la typologie du processus d'assemblage considéré est l'assemblage par pièce maîtresse (F. Fontanili, 1999).

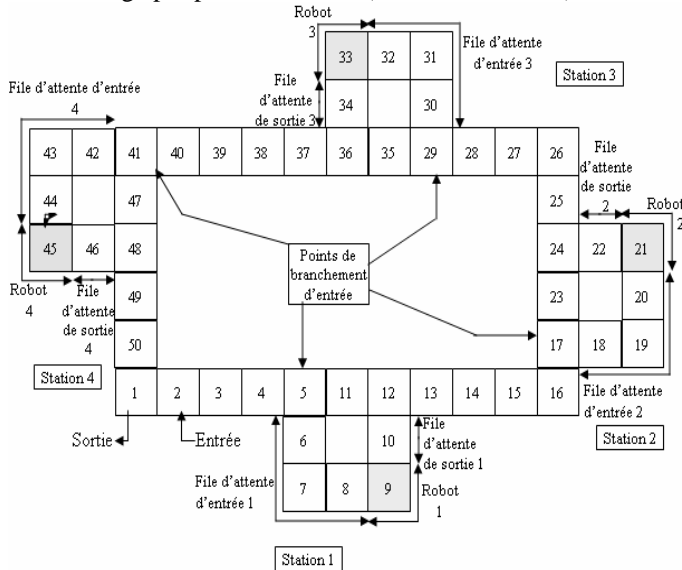


Figure 1. La cellule flexible étudiée

Les palettes circulent en permanence sur le convoyeur avec un transfert du type asynchrone. Lorsqu'une palette arrive à un point de branchement d'une station, un dispositif de lecture vérifie si la prochaine opération à effectuer est à réaliser par la station considérée, si c'est le cas, la palette pénètre dans la file d'attente d'entrée, si sa capacité n'est pas saturée. Dans les autres cas (file d'attente saturée, robot déjà visitée ou robot ne faisant pas partie de la gamme), elle continue à circuler. À la fin de l'assemblage du produit, la palette correspondante est déchargée au niveau de la sortie du système et tout de suite réintégrée à l'entrée du système pour un nouveau chargement d'un produit à assembler. Dans cette configuration, la priorité est au convoyeur c'est à dire que les palettes ne quittent pas les boucles périphériques si les sorties des stations sur le convoyeur sont occupées. La capacité des files d'attente d'entrée est d'au moins de deux unités. La capacité des files d'attente de sortie est d'au moins une unité afin d'éviter tout blocage (Finke et Dupont, 1993).

3. COMPLEXITE

La plupart des travaux recensés traitent de la minimisation du makespan. Gonzales et Sahni ont démontré, dans S. Gonzalez, 1976, que l'optimisation d'un ordonnancement

du type Open-Shop est un problème NP-difficile au sens fort dès que $m > 2$. De plus, les problèmes carrés ($n = m$) sont considérés comme plus difficiles que les problèmes rectangulaires ($n > m$) (C. Guéret, 1998).

Tandis qu'il y a quelques récents travaux sur des problèmes d'ordonnancement multi-critères, où l'un des objectifs est la minimisation du temps moyen de séjours sujet à réduire le makespan, tels que les travaux de Kyparisis et Koulamas (G.J. Kyparisis, 2000) et ceux de Gupta et al. (J.N.D. Gupta et al., 2003), **il existe seulement** quelques uns traitant exclusivement la minimisation du temps moyen de séjour (Andresen M. et al., 2006). Achugbue and Chin (J. Achugbue, 1982) ont montré que le problème Open Shop à deux machines avec minimisation de la somme des temps d'achèvement (également notés comme minimisation de temps moyen ou total de séjour) noté $O2 || \sum C_i$ est NP-difficile au sens fort. Même pour le problème correspondant avec préemptions, le problème à deux machines est NP-difficile au sens ordinaire (J. Du, 1990) et le problème à trois machines est NP-difficile aux sens fort (C.Y. Liu, 1985).

De ce qui précède, nous constatons que les problèmes Open Shop sont déjà NP-difficiles dans le cas général et que l'ajout de ressources de transport, en plus des ressources de transformation (les machines), rend le problème encore plus difficile (C. GUERET, 1997). De plus, dans notre cas, la préemption est non autorisée (ressources disjonctives). Enfin, La typologie circulaire du convoyeur accroît le caractère « combinatoire » du problème comparativement aux lignes d'assemblage linéaires conventionnelles. De ce fait, nous pouvons affirmer que notre problème est un problème NP-difficile au sens fort.

4. APPROCHE DE RESOLUTION

Du fait de la complexité du problème étudié, nous avons opté pour une approche empirique de prise en charge du problème considéré, $O_m | \tau_j | \bar{F}$. Il s'agira d'évaluer la performance du système pour diverses règles de priorité au niveau des robots. Ces performances seront comparées à celles obtenues en configuration FIFO.

Pour ce faire nous avons opté pour la simulation comme outil d'expérimentation. La mise en œuvre du processus de simulation est réalisée en dix étapes tel que définit par PRITSKER (A.A.B. Pritsker, 1986). Ces étapes constituent un processus itératif qui, très souvent, n'est pas rigoureusement séquentiel (M. Bakalem, 1996).

Du fait des nombreux paramètres à considérer, pouvant avoir chacun une influence sur la performance globale du système, nous faisons face à une situation combinatoire qui pourrait « exploser » exponentiellement. De plus, pratiquement, il n'existe pas de méthodes directes permettant de définir de façon optimale les types et le nombre d'expériences à mener en vue de bien cerner un problème ou un système étudié. Toutefois, une planification judicieuse des expériences à mener pourrait

permettre une couverture suffisante du problème. Ceci peut se faire par recensement des paramètres à varier d'une part, et la détermination de l'intervalle et le pas de variation pour chaque paramètre d'autre part.

Pour la modélisation et la simulation de la cellule flexible circulaire, objet de notre étude, nous avons opté pour le logiciel SIMAN/Arena (Arena, 2002), développé par « Systems Modeling Corporation ». Il est notamment dédié à la modélisation, simulation et animation de systèmes de production. Le logiciel est basé sur les concepts de simulation orientée processus et de modélisation hiérarchique. A l'aide d'arena on peut développer un projet complet de simulation. En effet, il comporte des supports intégrés pour l'analyse des données d'entrée, la construction du modèle, l'exécution interactive, l'animation, la traçabilité et la vérification de l'exécution et l'analyse des résultats. Suivant la description précédente de la cellule d'assemblage étudiée, nous avons conçu un programme sous Rockwell ARENA 7.1 dont la modélisation a fait l'objet d'une communication (Ghazi, N. et al, 2007).

5. LE PLAN D'EXPERIMENTATION

Pour l'élaboration du plan d'expérimentation, nous avons commencé par arrêter une configuration de base de la cellule comportant quatre stations. Le nombre de palettes est de 20 et la longueur du convoyeur est de 500 palettes. Le nombre de produits finis (travaux) à assembler est de quatre. Sachant qu'un temps de séjours d'une pièce dans la cellule est composé des temps d'attente dans les files d'attente, des durées opératoires sur les différents postes de travail ainsi que des temps de transfert entre les stations (les temps de chargement et déchargement sont considérés nuls), sa minimisation fera intervenir plusieurs paramètres. Parmi ces paramètres la capacité des FAEs (un temps d'attente dans une FAE pouvant être beaucoup plus faible qu'un tour complet sur le convoyeur central).

Pour chaque expérience, Les paramètres pris en considération pendant la simulation sont :

☞ les durées opératoires sur les robots qui sont fonction des types de pièces traitées. Le nombre de gammes non-linéaires testées est de 50. Dans un souci de maintien de l'équilibre entre les robots (Line balancing), les durées opératoires ont été choisies de sorte que les différences relatives entre les durées des travaux (jobs) (écarts entre la plus grande et la plus petite durée) ne dépassent pas les 25 %.

☞ La capacité des Files d'Attente d'Entrée (FAEs) : les capacités choisies sont 3, 4, 5, 10, et 20 (Nous nous arrêtons à ces cinq valeurs afin d'éviter une explosion exponentielle du nombre d'expériences à effectuer). Les trois premières valeurs de la capacité des FAEs sont arrêtées de sorte que le nombre d'emplacements d'attente globale dans les stations de la cellule soit proche du nombre de palettes en circulation sur le convoyeur central ($3 \times 4 = 12$, $4 \times 4 = 16$, $4 \times 5 = 20$). En

additionnant le nombre de postes de charge (considérés comme emplacement de stockage momentané), ces chiffres deviennent 16, 20 et 24. Les deux derniers choix sont des situations extrêmes. Par ce paramètre, nous voulons tester si la capacité des files d'attente d'entrée pourrait avoir une influence sur les temps de séjours des pièces dans la cellule par la diminution des temps de transfert sur le convoyeur central.

☞ les règles de priorité (possibilité de réduction des temps d'attente des pièces par un ordonnancement plus efficace au niveau des robots). Le but est de tester plusieurs stratégies d'ordonnancement et d'en choisir la meilleure. Nous avons choisi les règles de priorité minimisant les temps de séjours des pièces dans la

cellule ; c'est-à-dire minimisant $\sum_{i=1}^n (c_i - r_i)$ où c_i est la

date fin de l'opération i , r_i est la date d'arrivée de l'opération i et n est le nombre d'opérations à ordonnancer (C. Chu et J.M. Proth, 1996). Les règles choisies sont : La SPT (Shortest Processing Time), la LPT (Longest Processing Time), la MWKR (Most Work Remining First), et la LWKR (Least Work Remining First). Les deux règles la LWKR et la MWKR sont appliquées en deux étapes, d'abord selon la durée d'exécution totale restante (MWKR1 et LWKR1), par la suite selon le nombre d'étapes d'assemblage restantes (MWKR2 et LWKR2).

Finalement le problème considéré est $O4|\tau_j|\bar{F}$, tel que τ_j représente les temps de transport entre les stations et \bar{F} le temps moyens de séjours (Average Flow Time). Le nombre d'opérations de chaque travail est de quatre ce qui abouti à un problème carré $n=m=4$.

Lors de l'élaboration de notre plan d'expérimentation, nous avons d'abord arrêté le nombre d'expériences en arrêtant la configuration physique de base (disposition des points d'entrée et de sortie des stations de la cellule ainsi que leurs files d'attente d'entrée et les Files d'attente de sortie) de la cellule. Par la suite, nous avons commencé par faire varier la capacité des FAEs selon les variantes déjà arrêtées (3, 4, 5, 10 et 20). Ainsi cinq expériences ont été définies. Par la suite, pour chacune de ces expériences, nous avons fait varier les durées opératoires afin d'obtenir les différentes variantes de produits ce qui nous donne 50 cas possibles pour chacune des expériences. Enfin, nous avons fait varier les règles de pilotage, ce qui nous donne 7 expériences pour chaque combinaison produit/capacité de file d'attente. Ainsi, pour chacune des expériences nous obtenons 350 tests pour une capacité donnée de la FAE, ce qui fait un total de 1750 expériences à mener.

6. ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Conformément au plan d'expérimentation arrêté précédemment, nous avons mis en oeuvre la simulation des différentes configurations et relevé les résultats que

nous avons analysés par la suite. Nous avons, dans un premier temps, étudié la performance globale induite par l'application des règles d'ordonnancement. Pour ce faire, nous avons procédé à l'étude des temps de séjour dans la cellule d'un ensemble de pièces correspondant à une commande. Il s'agissait d'analyser le Cmax. Le nombre de pièces arrêté est de 120 (dans notre cas, c'est le nombre maximal de pièces autorisé par la version académique d'Arena 7.1). Les taux d'amélioration des temps de séjours d'une commande dans la cellule $\tau_{TSCRègle}$ sont calculés par la formule (1) :

$$\tau_{TSCRègle} = \frac{(T_{SCFIFO} - T_{SCRègle})}{T_{SCFIFO}} * 100 \quad (1)$$

tels que : T_{SCFIFO} est le temps de séjours d'une commande sous un pilotage FIFO ;
 $T_{TSCRègle}$ est le temps de séjours d'une commande sous un pilotage de la Règle utilisée.

Les taux d'amélioration (la proportion de réduction) des temps de séjours d'une commande dans la cellule sont insignifiants, comparativement à la règle FIFO (figure 2). La moyenne des taux de réduction ne dépassent pas 0.5% avec un écart type de l'ordre de 2%. Ces améliorations sont obtenues pour des d'ordonnements LWKR2 et MWKR1. Par ailleurs, les temps de séjour moyens des pièces dans la cellule d'assemblage \bar{F} ne sont réduits que pour les ordonnements LWKR1, MWKR2 et la SPT. Ces réduction ne dépassent pas 5.2% avec un écart type de l'ordre de 2.5% (Figure 3).

Finalement, nous n'avons constaté aucune amélioration significative, régulière et continue. De ce fait, nous avons étudié des paramètres secondaires tels que les temps de transfert et les temps d'attente afin de définir les causes de détérioration des performances, et ainsi les paramètres susceptibles de les améliorer en vue d'agir dessus. Ainsi, en comparants les résultats obtenus (figure 4), nous constatons une adéquation (voire une corrélation) entre les taux d'amélioration du Cmax et les temps de transfert moyens. Ceci signifie que la réduction du Cmax est principalement dépendante de la réduction des temps de transfert. Nous constatons, de même, une autre adéquation (corrélacion) entre les \bar{F} et les temps moyens d'attente, ce qui signifie que la réduction du \bar{F} dépend également de la réduction des temps d'attente dans les files d'attente.

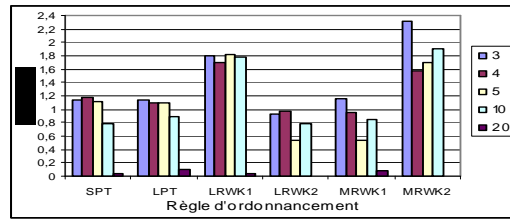


Figure 2. Moyenne des taux de séjours d'une commande dans la cellule

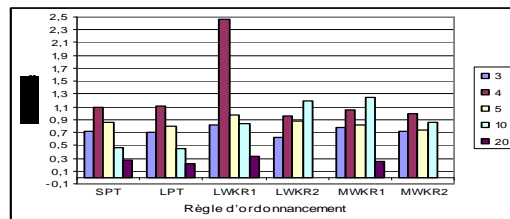
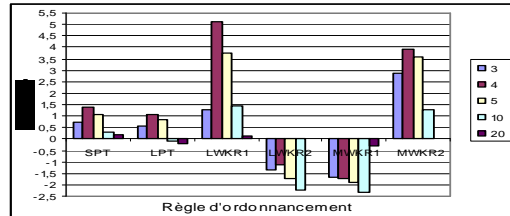
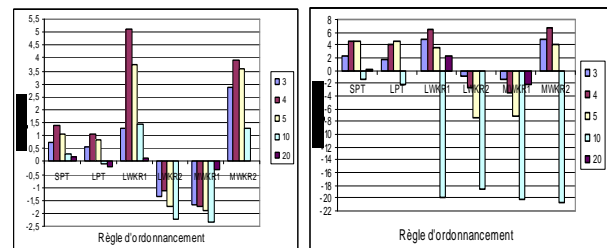
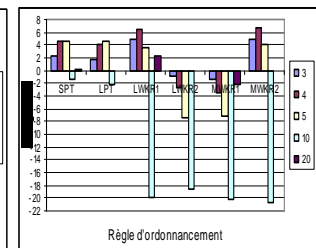


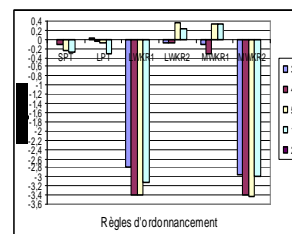
Figure 3. Moyennes et écart type des taux d'amélioration des temps de séjours moyens des pièces dans la cellule par les règles d'ordonnement



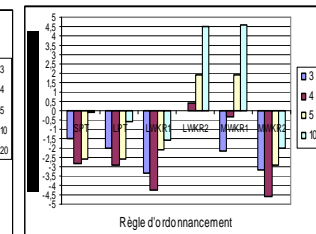
-a-



-b-

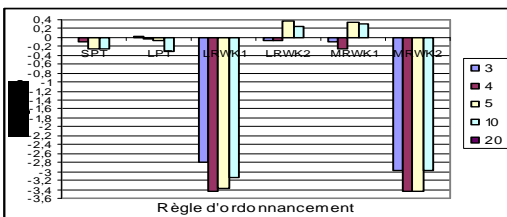


-c-



-d-

Figure 4 : Correspondance entre les taux d'amélioration des temps moyens de séjour (-a-), et les temps moyens d'attente (-b-) et entre les taux d'amélioration des temps d'assemblage d'une commande et les temps moyens de transfert



L'analyse des résultats de la simulation a montré que les règles de priorité n'améliorent pas significativement les performances du système. La même analyse montre que les axes sur lesquels il sera pertinent d'agir sont les temps d'attente et le temps de transfert. Ceci ne pourra se faire que via une coordinations entre les différents postes robots

de l'atelier en vue de minimiser les attentes des pièces au niveau des postes et leur « cyclage » sur le convoyeur. Ces constats posent la question sur l'apport d'un ordonnancement collaboratif ou distribué. En effet, une collaboration entre les robots pour le choix de la pièce à traiter est à même de réduire les temps d'attente d'une part et le temps de transfert d'autre part. Ceci constitue la prochaine étape de ce travail.

CONCLUSION

Les FMS open-shop peuvent constituer une opportunité d'amélioration des performances des plus intéressantes. Toutefois, cette amélioration ne peut être obtenue que via un pilotage efficace. Ce pilotage suppose un ordonnancement adapté. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude.

Après une multitude de tests, nous avons constaté qu'aucune amélioration significative, stable et régulière n'est réellement apportée à la performance de la cellule d'assemblage par l'adoption de règles de priorité adaptées, autre que la règle FIFO. En effet, la réduction ne dépassent pas 0.5% avec un écart type de l'ordre de 2%.

Pendant l'analyse des temps de séjours, nous avons d'abord constaté des réductions considérables sur certains types de pièces qui sont généralement absorbés par des retards acquis par d'autres types de pièces dus aux interactions entre pièces. Par la suite, durant la comparaison des temps d'attente et des temps de transfert par rapport au temps de séjour, nous avons constaté que la réduction de ces derniers était toujours liée à la réduction des temps d'attente.

De ce fait, nous pensons que le principal apport de ce travail est le fait de permettre d'écarter définitivement une voie qui était considérée comme potentielle, à savoir celle des règles de priorité d'une part, et d'ouvrir une nouvelle voie de résolution de ce type de problème. En effet, au vu des résultats obtenus et analysés, nous pensons qu'un pilotage coopératif de la cellule serait intéressant du moment que la coopération consiste à prendre en considération tous les scénarios d'ordonnancement possibles suivant l'état des paramètres considérés à l'instant courant. Ceci se fera par l'élaboration d'un protocole de communication performant entre les points d'accès aux stations ainsi que l'entrée de la cellule et les postes de travail. L'objectif sera de réaliser un ordonnancement de la cellule d'une performance globale satisfaisante tout en respectant l'autonomie décisionnelle de chaque ressource de la cellule. Ceci fera l'objet de travaux futurs.

REFERENCES

Achugbue, J.O., Chin, F.Y., 1982. *Scheduling the Open Shop to Minimize Mean Flow Time*. *SIAM J. on Computing*, Vol. 11, 709 - 720.

Andresen, M., Bräsel, H., MPrig, M., Tusch, J., Werner, F., Willenius, P., 2006. *Metaheuristic Algorithms for Open Shop Scheduling to Minimize Mean Flow Time*. *Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Mathematik, PSF 4120, 39016 Magdeburg, Germany*. <http://www.math.uni-magdeburg.de/werner/preprints>.

Arena Standard: *User's Guide, Doc ID ARENAS-UM001C-EN-P, Rockwell Software Inc. Rockwell Automation company, 2002.*

Bakalem, M., 1996. *Modélisation et simulation orientées objet des systèmes manufacturiers*. Thèse de doctorat, ESIA, Savoie, France.

Brauner, N. Castagna, P. Espinouse, M-L. Finke, G. Lacomme, Ph. Martineau, P. Moukrim, A. Soukhal, A. Tacquard, C. et Tchernev, N. 2005. *Ordonnancement dans les Systèmes Flexibles de Production*. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*.

Chu, C. et Proth, J.M. 1996. *L'Ordonnancement et ses applications*, édition Masson.

Du, J.; Leung, J.Y.T., 1990. *Minimize Mean Flow Time in Two-Machine Open-Shops and Flow-Shops*, *Journal of Algorithms*, Vol. 14, 24 - 44.

Finke, G. et Dupont, L. 1993. *Combinatorics of Cyclic Assembly Systems*. IEEE Systems, Man and Cybernetics Conference Proceedings; Grenoble, France.

Ghazi, N., Bakalem, M., Tadjine M., 2007. *Etude du problème d'ordonnancement d'Open-shop par les règles de priorités au niveau des postes : approche par simulation*. *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007*.

Gonzalez, S., Sahni, T., 1976. *Open Shop Scheduling to Minimize Finish Time*, *J. Assoc. of Comput. Mach.*, Vol. 23, 665 - 679.

Guéret, C. 1997. *Problèmes d'ordonnancement sans contraintes de précédence*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France.

Guéret, C. et Prins, C., 1998. *Classical and new heuristics for the openshop problem*. *European Journal of Operations Research*.

Gupta, J.N.D., Werner, F., Wulkenhaar, G., 2003. *Two-Machine Open Shop Scheduling with Secondary Criterion*, *Intl. Trans. Oper. Res.*, Vol. 10, 267 - 294.

Jubin, M., 2003. *Ateliers flexibles d'usinage*, Techniques de l'ingénieur, Traité Mesure et contrôle, R7 820.

- Kyparisis, G.J.; Koulamas, C., 2000. *Open Shop Scheduling with Makespan and Total Completion Time Criteria*, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 27, 15 - 27.
- Liu, C.Y.; Bulfin, R.L., 1985. *On the Complexity of Preemptive Open-Shop Scheduling Problems*, *Oper. Res. Lett.*, Vol. 4, 71 - 74.
- Pritsker, A.A.B. 1986. *Introduction to simulation and SLAM II*, Halsted Press, New York, NY, 3rd edition.
- Rinnooy Kan, A.H.G. 1976. *Scheduling Problems: Classification, Complexity and Computations*. Martinus Nijhoff, The Hague, 180 p.