

ORDONNANCEMENT ET GESTION DES FILES D'ATTENTE PAR LES REGLES DE PRIORITE DANS UN SYSTEME FLEXIBLE DE PRODUCTION

Zoheir KARAOUZENE, Zaki SARI

LAT : Laboratoire d'Automatique de Tlemcen
Faculté des sciences de l'ingénieur
Université ABOU-BEKR BELKAÏD
BP 230 Tlemcen, ALGERIE
zoheir_karaouzene@yahoo.fr, zaki_sari@yahoo.com

RESUME : *Le contexte des ateliers n'est pas stable, en face des imprévus comme la panne d'une machine, existence d'une station goulot ou recevoir une commande urgente, il faut réagir devant ces problèmes et trouver une solution capable d'assurer la bonne continuité du système de production. Dans cette situation, plusieurs approches sont proposées pour résoudre les problèmes d'ordonnancement, la gestion des files d'attente par des règles de priorité est l'une des approches les plus simples pour ordonnancer en temps réel les opérations dans un atelier flexible.*

Nous proposons dans ce travail de recherche de faire le point sur les méthodes de gestion des files d'attente par des règles de priorité et d'établir une classification des règles les plus usuelles et les plus efficaces en fonction des types d'atelier, des conditions opératoires et des critères de mesure. Par ailleurs, le but de ce travail est de tenter de déterminer les règles les plus robustes, c'est-à-dire celles qui donnent les meilleurs résultats en présence d'aléas.

MOTS-CLES : *Règles de priorité, Ordonnancement dynamique, Gestion des files d'attente, simulation.*

1. INTRODUCTION

Le système de production rassemble l'ensemble des moyens qui permettent la transformation de ressources en produits ou en services (Artigues C, 1998).

La fonction d'ordonnancement, dans un système de production, a pour rôle d'assurer la production des quantités de produits fixés dans le plan de production (plan directeur) dans les délais (Doumeingts G, Breuil D, Pun L, 1983).

Dans un problème d'ordonnancement Job-Shop $n \times m$, n jobs doivent être effectués par m machines, sachant que chaque machine ne peut travailler que sur un seul job à la fois (Mebarki N, 1995). Le problème Job-Shop est NP-difficile, considéré parmi les problèmes les plus difficiles à traiter, le nombre de solutions possibles est de l'ordre de $(n!)^m$, où n est le nombre de tâches à effectuer et m le nombre de machines. La gestion des files d'attente par des règles de priorité est l'une des approches les plus simples pour ordonnancer en temps réel les opérations dans un atelier flexible, nous avons adopté dans ce travail cette solution pour résoudre le problème d'ordonnancement.

L'article est organisé de la façon suivante. Nous commençons d'abord par une introduction sur les règles de priorité, nous montrons à la fin de cette partie le but de ce travail. Puis, nous décrivons dans les sections suivantes les critères d'évaluations des règles

de priorité et les différentes conditions opératoires liées à l'atelier. Nous présentons ensuite le modèle test d'atelier simulé puis les résultats de la simulation et l'interprétation de ces résultats.

2. REGLES DE PRIORITE

Les règles de priorité permettent de sélectionner parmi une liste de lots en attente, le prochain lot à traiter sur la machine, en fonction de critères purement locaux (données dépendant uniquement du lot) ou plus globaux (prenant en compte tout ou partie de l'état du système) (Mebarki N, 1995).

Une règle peut être très simple, par exemple « choisir un travail au hasard (aléatoire) », « choisir le travail avec le plus grand temps d'attente (FIFO) », ou extrêmement complexe, par exemple « choisir le travail dont la prochaine opération est réalisé sur la ressource la moins utilisée ». Le choix d'une telle règle est réalisé en fonction des objectifs fixés et les conditions opératoires propres à cet atelier.

La règle choisie peut apparaître la plus performante pour satisfaire un objectif, comme elle peut être la plus mauvaise pour d'autres objectifs, alors l'utilisation d'une seule règle pour ordonnancer les opérations n'est pas toujours efficace. Pour satisfaire le plus d'objectifs possible, plusieurs chercheurs proposent de combiner les règles de priorité, d'autres proposent de faire une sélection dynamique de ces règles, en fonction des

conditions opératoires, des objectifs de production et de l'état de l'atelier. La classification des règles de priorité est la phase la plus importante pour implémenter ces approches.

Notre but est de faire une étude approfondie sur les règles de priorité, afin de les classer selon certains critères de performance, tels que le retard et le retard conditionnel. De plus, nous proposons des techniques permettant d'implémenter à partir des résultats obtenus, un système de sélection dynamique de ces règles dans un atelier de type Job-Shop.

Nous présentons dans la section suivante les principaux critères pour évaluer les performances d'une telle règle.

3. CRITERES D'EVALUATION

Le temps de cycle et les délais sont les critères les plus étudiés.

3.1. Temps de cycle

Temps de cycle pour le job i : $F_i = C_i - r_i$ représente le temps passé par le job i dans le système.

C_i : date de fin effective du job i .

r_i : date d'arrivée du job i

3.2. Délais

Il existe plusieurs types de délais, parmi eux :

- Le retard algébrique définit par : $L_i = C_i - d_i$.

d_i : date échue du job i .

Deux cas sont possibles:

$L_i < 0$: c'est-à-dire $C_i > d_i$, alors le job i est en avance.

$L_i > 0$: $C_i < d_i$, dans ce cas le job i est en retard.

- Le retard vrai (retard global) :

$T_i = \max(0, L_i)$, c'est le retard maximal sur le job i .

- Le Nombre de job en retard défini par :

$$NT = \sum u_i \quad \text{Où:} \quad u_i = \begin{cases} 1 & \text{si } C_i > d_i \\ 0 & \text{si } C_i \leq d_i \end{cases}$$

- Pourcentage de jobs en retard :

$PT = NT/n$, on s'intéresse dans ce cas au nombre de jobs en retard est non pas au retard lui-même.

n : nombre total de job.

- Retard conditionnel moyen :

Pour le retard conditionnel moyen, la moyenne est calculée uniquement sur les jobs effectivement en retard, nous avons calculé ce critère à l'aide de la relation suivante :

$$\overline{CT} = \text{Max}(0, C_i - d_i) / NT$$

La qualité de l'ordonnement obtenu est souvent évaluée par rapport à deux problèmes principaux dans les ateliers : la réduction des en-cours et le respect des

délais. Pour mesurer l'efficacité du système par rapport aux volumes d'en-cours, on utilise généralement les critères liés aux temps de présence des produits dans l'atelier (*Flowtime*) ou aux dates d'achèvement des produits (*Completion time*). Pour évaluer les performances de l'atelier par rapport aux délais, on utilise les critères mesurant la performance du système par rapport aux dates échues (retard, retard algébrique, retard conditionnel, pourcentage de jobs en retard) (Mebarki N, 1995).

4. CONDITIONS OPERATOIRES

La plupart des études réalisées sur les règles de priorité indiquent que les conditions opératoires liées à la nature de l'atelier, influent grandement sur la performance des règles de priorité. Les principales conditions sont :

4.1. Dates d'échéance

La manière d'établir la date échue pour un job influe sur la performance des règles de priorités, plusieurs méthodes ont été proposées pour le calcul des délais, le bon choix d'une méthode est important, car plusieurs critères d'évaluation sont liés aux dates échues.

Nous utilisons la règle Total Work Content (TWK) pour le calcul des dates échues

$TWK \quad a_i = \text{coefficient} \times p_i$ (Conway R W, 1965), (Kiran A S, Smith M S, 1984), (Baker K R, 1974) .

Où :

a_i : délai du job i

p_i : la durée totale des opérations du job i .

Coefficient est une constant

4.2. Dates de fin au plus tard des opérations

Plusieurs auteurs ont proposé de découper, pour chaque job, le délai accordé (a_i) afin de créer pour chaque opération du job une date de fin au plus tard de l'opération, en anglais opérationnel due date (Mebarki N, 1995). Ce qui permet de détecter un job qui n'est pas en retard mais risque d'être en retard. Dans le cas où les opérations déjà réalisées ont pris du retard par rapport à leur date de fin programmée, alors le job doit être accéléré pour qu'il ne prenne aucun retard. La figure 1 montre le découpage du délai, pour un job en dates de fin au plus tard des opérations. La date de fin d'une opération pour chaque job est calculée par la méthode TWK :

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} + p_{i,j} \times a_j / \sum_i p_{i,j} \quad (\text{Baker K R, 1974), (Schultz C R, 1989).}$$

Les indices i, j représentent la i ème opération du job j .

Le terme $d_{0,j}$ est défini comme étant la date d'arrivée du job j , soit $d_{0,j} = r_j$ (date d'arrivée du job j). a_j est le délai autorisé (allowance) du job j .

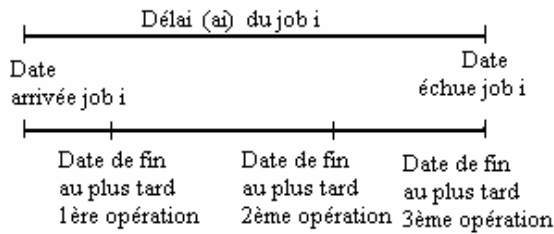


Figure 1. Dates de fin au plus tard des opérations.

4.3. Charge de l'atelier

Est le taux moyen d'utilisation des machines, c'est égal à :

$$\rho = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \rho_i \quad \text{Où :}$$

ρ_i Représente la somme des durées opératoires des opérations réalisées sur la machine i divisé par la période considérée. Cette valeur représente le taux d'utilisation en régime permanent de la i ème machine ; et m étant le nombre de machines dans l'atelier ;

La charge de l'atelier peut influencer sur les performances des règles de priorité par rapport au retard, le retard sera plus ou moins important suivant la valeur de la charge

Plusieurs chercheurs, Mebarki (1995); Baker (1984); Schultz (1989) ont utilisé des taux moyens d'utilisation de 80% et 90%. Un taux d'utilisation de 90% ou plus correspond à une charge élevée, un taux compris entre 80% et 90% correspond à une charge modérée.

5. MODELE TEST

Nous présentons dans cette partie le modèle test utilisé pour simuler l'ensemble des règles de priorité les plus connues, il s'agit d'un modèle job-shop à 4 machines, présenté par Ramasesh (1990). Kiran et Smith ont conclu -à partir des travaux des autres chercheurs- qu'un modèle composé de 4 machines est suffisant pour exprimer la complexité d'un atelier Job-Shop, ce qui justifie l'utilisation de ce modèle par plusieurs auteurs.

Dans son travail, Ramasesh (1990) décrit les hypothèses habituellement faites dans les études consacrées à l'ordonnancement dynamique en Job-Shop comme étant :

- Un job ne peut allouer deux fois de suite la même machine ;

- Pas de préemption des opérations sur les machines ;

- Pas de gamme de remplacement, chaque job suivra une séquence d'opérations qui lui est propre, celle-ci pouvant être choisie aléatoirement lors de la simulation ;

- Pas de pannes sur les machines ;

- Pas de temps de changement d'outils entre les gammes ;

- Pas de temps de transport entre les machines ;

- Pas d'opérations d'assemblage.

Nous avons créé le modèle à l'aide du logiciel Arena, de Rockwell Software. Ce logiciel a été choisi de par sa disponibilité et son aptitude à la création d'une interface graphique pour modéliser les flux.

Ce modèle d'atelier Job-Shop présente les caractéristiques suivantes :

- Il comporte quatre machines; chaque machine ne peut réaliser qu'une seule opération à la fois ;

- Pour chaque pièce entrant dans l'atelier, le nombre d'opérations, compris entre deux et six inclus, suit une loi discrète uniforme ;

- Pour chaque pièce entrant dans l'atelier, sa gamme est aléatoire. Les machines sur lesquelles sont réalisées les opérations sont choisies aléatoirement, avec la contrainte suivante : deux opérations consécutives ne peuvent avoir lieu sur la même machine ;

- Les durées opératoires sont aléatoires et suivent toutes une distribution exponentielle de moyenne 1. En moyenne, la durée totale des opérations d'un job est de quatre unités de temps ;

- Le processus d'arrivée des pièces est modélisé par une loi de Poisson. Du fait des particularités de ce modèle, (nombre de stations, nombre moyen d'opérations, durée totale moyenne des opérations), la charge moyenne de l'atelier est égale au taux moyen d'arrivée des pièces ;

- Les dates échues sont établies en utilisant la méthode TWK.

6. SIMULATION

Le tableau 1 représente les règles de priorité, parmi les plus connues et les plus efficaces, nous allons simuler le modèle job-shop présenté dans le paragraphe précédent, pour étudier les performances de ces règles en tenant compte des conditions opératoires et des critères de performances les plus utilisés.

Règle	Description
CR/SPT	Critical Ratio Shortest Processing Time $Min([Max(p+ t_{ij}, p+t_{ij} \times (d_i - p) / \sum_{j \in S_i} t_{ij})])$
EDD	Earliest Due Date: $Min (d_i)$
FIFO	First In First Out: on choisit l'opération dont l'O.F. est arrivé le premier (seule règle à respecter une priorité des O.F.).
LIFO	Last In First Out: on choisit l'opération dont l'O.F. est arrivé le dernier
LUS	Lowest Utilized Station: Sélectionner le job dont l'opération suivante doit être traitée sur la ressource ayant été le moins utilisée jusqu'à présent
MOD	Modified Operation Due date: $Min[Max(d_{ij}, p + t_{ij})]$
OCR	Operation Critical Ratio: $Min(d_{ij} - p / t_{ij})$
ODD	Operation Due Date: $Min (d_{ij})$
OST	Operation Slack Time: $Min(d_{ij} - p - t_{ij})$
SCR	Smallest Critical Ratio: $Min(d_i - p / \sum_{j \in S_i} t_{ij})$
SLACK	SLACK: $Min (s_i / \sum_{j \in S_i} t_{ij})$
SPT	Shortest Processing Time: $Min (t_{ij})$.
WINQ	Work IN Queue: Sélectionner le job dont l'opération suivante doit être traitée sur la ressource ayant la plus faible durée opératoire totale en attente (pour tous les jobs en attente, somme des durées opératoires).

Tableau 1. Liste des règles de priorité simulées

- i : Job concerné par l'opération.
- j : Rang de l'opération concerné dans le job i .
- t : Temps courant.
- r_i : Date d'arrivée du job i dans le système.
- d_i : Date échu du job i .
- $d_{i,j}$: Date de fin au plus tard de la j ème opération du job i .
- p : Date courant.
- p_i : Durée totale des opérations du job i
- $t_{i,j}$: Durée opératoire de la j ème opération du job i .
- S_i : Ensemble des opérations restant à réaliser pour le job i
- s_i : Marge du job i $s_i = d_i - p - \sum_{j \in S_i} t_{ij} .$

Nous avons déterminé à l'aide de la valeur du *coefficient* utilisé par la méthode TWK, trois type de dates échués :

- Serrées dans le cas ou les dates échués pour les produit sont très proches à leurs dates de livraison et

alors il y'aura un grand risque qu'un produit soit en retard ;

- Modérées dans le cas où les dates échués sont un peu loin par rapport aux dates de livraison ;

- Larges dans le cas ou il y a un temps libre large entre les dates échués et les dates de livraisons.

Les différents degrés de proximité des dates échués correspondant aux différents délais d'obtention des jobs sont présentés dans le tableau 2.

allowance	30	50	60
Charge élevée ($\rho=90\%$)	dates échués serrées (coefficient = 7.5)	dates échués modérées (coefficient = 12.5)	dates échués larges (coefficient = 15)
allowance	20	30	35
Charge modérée ($\rho=80\%$)	Dates échués serrées (coefficient = 5)	dates échués modérées (coefficient = 7.5)	dates échués larges (coefficient = 8.75)

Tableau 2. Degrés de proximité des dates échués

Nous allons donc simuler six configurations possibles telles que présentées dans le tableau 2.

Pour chacune des six configurations testées, dix répliquions indépendantes sont réalisées. Pour chaque répliquion, la durée transitoire est estimée à 500 jobs, et les mesures de performances sont collectées pour 5000 jobs, ces paramètres sont choisis a partir de la recherche bibliographique. Les mesures de performance estimées sont le temps de cycle moyen (\bar{F}), le retard moyen (\bar{T}), le retard conditionnel moyen (\bar{CT}), le pourcentage moyen de retard $P\bar{T}$ et Le nombre de pièces moyen dans l'atelier (Mean Work In Process), ce dernier est calculé en utilisant un compteur dans le modèle test, on incrémente le compteur à chaque arrivée d'un job, et on le décrémenté lorsque un job quitte le système. Ces mesures sont calculées sur dix répliquions indépendantes.

7. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Nous présentons dans le tableau 3, les trois meilleures règles pour chaque configuration, ainsi que les valeurs numérique obtenus par la simulation pour chaque critère.

A partir de ces résultats, nous remarquons que la règle SPT figure comme la meilleur règle pour réduire la moyenne du temps de cycle dans toutes les configurations, quelque soit la charge. Elle est aussi efficace pour réduire le nombre moyen de pièces dans le système, ceci est dû à sa capacité d'accélérer la

Temps de cycle moyen \bar{F}				
	Charge élevée		Charge Modéré	
Dates échues Serrées	SPT LUS WINQ	16,53 18,92 20,3	SPT LUS CR/SPT	11,49 12,6 12,79
Dates échues Modérées	SPT LUS WINQ	16,51 18,90 21,13	SPT LUS CR/SPT	11,49 12,6 13,16
Dates échues Larges	SPT LUS CR/SPT	16,53 18,92 21,03	SPT LUS CR/SPT	11,49 12,6 13,63
Retard moyen \bar{T}				
Dates échues Serrées	CR/SPT MOD OCR	0,91 1,3 1,7	MOD CR/SPT OCR	0,43 0,6 0,86
Dates échues modérées	CR/SPT MOD OST	0,03 0,15 0,15	CR/SPT MOD EDD	0,03 0,1 0,23
Dates échues larges	CR/SPT OST SLACK	0,01 0,01 0,01	CR/SPT EDD MDD	0,02 0,04 0,06
Retard conditionnel moyen \bar{CT}				
Dates échues serrées	OCR CR/SPT SCR	4,38 7,31 7,52	OCR CR/SPT SCR	2,6 3,27 3,76
Dates échues modérées	CR/SPT MOD OCR	1,74 2,48 2,69	OCR SCR CR/SPT	1,55 1,64 2,05
Dates échues larges	SCR CR/SPT OCR	1,12 1,39 1,57	SCR OCR CR/SPT	1,31 1,56 1,83
Pourcentage de job en retard \bar{PT}				
Dates échues serrées	SLACK WINQ LUS	7,13 8,42 8,75	CR/SPT SPT MOD	8,34 9,52 10,17
Dates échues modérées	CR/SPT MOD SPT	0,91 1,55 2,54	CR/SPT MOD SPT	1,51 2,41 3,08
Dates échues larges	CR/SPT SLACK ODD	0,27 0,43 0,68	CR/SPT MOD EDD	0,92 1,1 4,42
Le nombre de pièces moyen dans l'atelier				
Dates échues serrées	SPT CR/SPT SRT	15,6 19,81 22,19	SPT CR/SPT SRT	9,38 10,56 11,77
Dates échues modérées	SPT CR/SPT SRT	15,6 20,93 22,19	SPT CR/SPT SRT	9,38 10,83 11,77
Dates échues larges	SPT CR/SPT SRT	15,6 20,95 22,19	SPT CR/SPT SRT	9,38 11,22 11,77

Tableau 3. Les résultats de la simulation

grande majorité des jobs, donc réduire le temps de cycle. Notons que les règles LUS, WINQ, CR/SPT donnent des résultats acceptables, les règles FIFO, LIFO figurent parmi les plus mauvaises stratégies pour ce modèle.

Selon Beker, les règles basées sur les dates de fin au plus tard des opérations tel que MOD, ODD, OCR, OST donnent de très bons résultats pour réduire la moyenne de retard. Pour notre part, nous remarquons que la règle CR/SPT figure comme la plus performante par rapport au retard moyen, pour des conditions opératoires très variées.

Pour le retard conditionnel moyen, les règles basées sur le ratio critique (SCR, OCR, CR/SPT) sont les plus performantes. Par contre, La règle SPT semble peu performante par rapport au retard conditionnel moyen.

La règle SPT a pour effet d'accélérer le flux et donc de diminuer, la moyenne des retards et le nombre de pièce dans l'atelier, mais si un retard va se produire, il sera très important ceci est du au fait que les opérations à longue durée restent en dernier.

Concernant le pourcentage de jobs en retard, la conclusion des auteurs semble unanime, la meilleure règle est sans conteste CR/SPT. Ceci est dû à sa faculté d'accélérer la grande majorité des jobs, donc à générer relativement peu de jobs en retard. D'autre part, n'oublions pas que les dates d'échéance internes sont calculées à partir des temps opératoires.

Cette capacité à produire peu de jobs en retard explique ainsi sa bonne performance par rapport au retard moyen. Néanmoins, avec la règle SPT, si très peu de jobs sont en retard, ceux qui le sont ont souvent des retards très importants.

La classification sert à choisir la règle la plus performante dans une situation donnée, par exemple :
SI [OBJECTIF = Réduire le retard] et CONDITIONS OPERATOIRES = Dates échues larges] ALORS [Appliquer SPT].

Cette condition est appelée une règle de production qu'on peut l'implémenter dans un système intelligent de sélection dynamique des règles de priorité. A partir de la simulation plusieurs règles peuvent être tiré, signalons qu'on peut tirer à partir de l'étude bibliographique d'autres règles en se basant sur les caractéristiques de la règle de priorité par exemple :
Si [un job est trop retardé] alors [appliquer FIFO], la règle FIFO donne l'avantage au job les plus anciens.

Pour sélectionner une règle dynamiquement (DR), le programme prend en considération les conditions opératoires (La charge d'atelier et les dates échues), les objectifs fixés (par exemple réduire le temps de cycle moyen), et l'état du poste de travail (par exemple la

longueur des files d'attente), le système doit réagir en temps réel à chaque événement inattendu dans l'atelier est appliquer la meilleur règle qui peut diminuer l'effet de cet événement.

8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons utilisé dans ce travail, les règles de priorité comme solution pour gérer les files d'attente d'un système flexible de production, nous avons simulé donc les règles de priorité les plus utilisées, sur un modèle job-shop, nous avons classifié ces règles selon des différents objectifs et conditions opératoires, nous avons définis cinq objectifs, le temps de cycle moyen, le retard moyen, le retard conditionnel moyen et le pourcentage de job en retard, le nombre de pièces moyen dans l'atelier. Nous avons remarqué à partir des résultats obtenus qu'une règle de priorité peut être très performante sous certaines conditions de fonctionnement et très mauvaise sous d'autres conditions. De cela nous remarquons la nécessité de changer dynamiquement la stratégie de gestion des files d'attente selon l'état de l'atelier. Cette classification nous aide à choisir la règle la plus performante selon l'état de l'atelier et les objectifs attendus.

Notre perspectives et d'ajouter d'autres critères d'évaluations et conditions opératoires comme par exemple les temps de transport entre stations, pour faire une conclusion assez large sur les règles des priorité. De plus de pouvoir implémenter un système automatique pour la sélection dynamique des règles de priorité, à partir de la classification, basée sur les techniques de l'intelligence artificielle pour piloter en temps réel les FMS.

REFERENCES

- Artigues, C., 1998. *Ordonnancement en temps réel d'atelier avec prise en compte des temps de préparation des ressources*. PhD , Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systemes du C.N.R.S, INSA,1998.
- Doumeings, G., Breuil, D., Pun, L., 1983. *La gestion de production assistée par ordinateur*, Hermès.
- Mebarki,N.,1995. *Une approche d'ordonnancement temps réel basée sur les règles de priorité des files d'attente*, PhD thèse, Université de Claude Bernard Lyon1.
- Conway, R.W., 1965. *Priority dispatching and job lateness in a job shop*, Journal of Industrial Engineering, Vol. 16, No. 4, 288-237.
- Kiran, A.S., Smith, M.S., 1984. *Simulation studies in job shop scheduling: a survey*, Computers and Industrial Engineering, Vol. 8, No. 2, 46-51.
- Baker, K.R., 1974. *Introduction to sequencing and scheduling*, John & Wiley.

Schultz, C.R., 1989. *An expediting heuristic for the shortest processing time dispatching rule*, International Journal of Production Research, Vol. 27, No. 1, 31-41.

Ramasesh, R., 1990. "Dynamic Job Shop Scheduling: A Survey of Simulation Research", OMEGA, Vol. 18, No. 1, 43-57.