

Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes

Guillaume Pinot

IRCCyN, équipes ACSED et PsyCoTec

Christian Artigues	CR, CNRS, Toulouse	Rapporteur
Jacques Carlier	Pr., UTC, Compiègne	Rapporteur
Jean-Charles Billaut	Pr., Université de Tours	Examineur
Stéphane Dauzère-Pérès	Pr., École des Mines, St Étienne	Examineur
Pierre Castagna	Pr., Université de Nantes	Directeur
Jean-Michel Hoc	DR, CNRS, Nantes	Codirecteur
Nasser Mebarki	MdC, Université de Nantes	Coencadrant

Soutenue publiquement le 14 novembre 2008

Table des matières

- ① Introduction
- ② L'ordonnancement de groupes
- ③ Coopération homme-machine pour la phase réactive
- ④ Le meilleur des cas
- ⑤ Conclusion

Introduction

Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes

L'atelier de production

La compagnie *industrial art* est composée de 3 artistes. Elle effectue des œuvres d'art sur commande.

Trois artistes :

- Artiste 1 : photographe, infographiste ;
- Artiste 2 : peintre, dessinateur ;
- Artiste 3 : sculpteur, plasticien.

Leur but est de réaliser les trois commandes suivantes le plus rapidement possible.

Commande 1

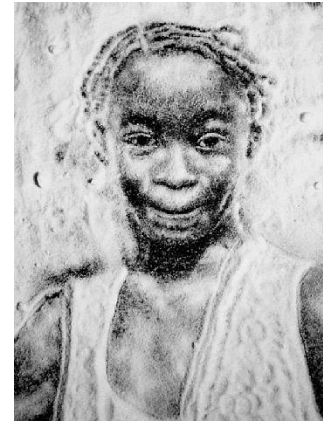


Jean Widmer (1992),
*Affiche Cubismes
Tchèques Architecture,
design, arts plastiques*

Gamme de fabrication :

- L'artiste 1 réalise la photographie de base à l'affiche pendant 3 jours ;
- L'artiste 2 réalise la police de caractères adaptés à la photographie pendant 3 jours ;
- L'artiste 3 réalise l'affiche en se basant sur la photo et la police de caractères pendant 3 jours.

Commande 2



Vik Muniz (1996),
Valentina, The Fastest

Gamme de fabrication :

- L'artiste 2 réalise le croquis pendant 4 jours ;
- L'artiste 3 réalise le montage avec le sucre pendant 3 jours ;
- L'artiste 1 réalise la photographie du montage pendant 1 jours.

Commande 3



Asus F6V-3P147CS

Gamme de fabrication :

- L'artiste 3 réalise le design de la coque de l'ordinateur pendant 2 jours ;
- L'artiste 1 modélise sur ordinateur la coque de l'ordinateur pendant 2 jours ;
- L'artiste 2 réalise le dessin sur la coque pendant 2 jours.

Le problème d'ordonnement

i l'index des opérations ;

$\Gamma^-(i)$ l'ensemble des prédécesseurs de O_i ;

m_i la ressource utilisée par O_i ;

p_i le temps d'exécution de O_i .

Le problème

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Gamma^-(i)$	\emptyset	{1}	{2}	\emptyset	{4}	{5}	\emptyset	{7}	{8}
m_i	M_1	M_2	M_3	M_2	M_3	M_1	M_3	M_1	M_2
p_i	3	3	3	4	3	1	2	2	2

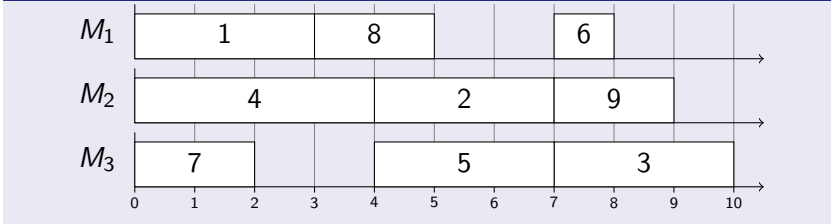
Objectif : minimiser le temps total d'ordonnement (le *makespan*, noté C_{\max}).

Un ordonnancement

Le problème

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Gamma^-(i)$	\emptyset	{1}	{2}	\emptyset	{4}	{5}	\emptyset	{7}	{8}
m_i	M_1	M_2	M_3	M_2	M_3	M_1	M_3	M_1	M_2
p_i	3	3	3	4	3	1	2	2	2

Solution optimale pour le makespan



Phase prédictive et phase réactive

Deux phases d'ordonnement :

- la phase prédictive, qui a lieu avant l'exécution de l'ordonnement dans l'atelier :
 - pas de contrainte forte de temps ;
 - repose intégralement sur un modèle.
- la phase réactive, qui a lieu pendant l'exécution :
 - temps de réaction imposé ;
 - connaissance exacte des événements passés.

Incertitudes

Définition

Les incertitudes correspondent à la différence entre les prévisions effectuées durant la phase prédictive et les données réelles obtenues après la phase réactive.

Exemples :

- l'artiste 3 peut prendre plus de temps que prévu pour réaliser son montage en sucre ;
- l'artiste 2 peut réaliser la police de caractères de l'affiche en 2 jours au lieu de 3 ;
- suite à un problème de livraison d'objectif, l'artiste 1 ne peut commencer la photo du garçon en sucre avant le 7^e jour.

Ces incertitudes peuvent avoir une influence importante dans l'ordonnement. Il est donc utile de les prendre en compte.

Méthodes d'ordonnement sous incertitudes

En fonction des phases prenant en compte les incertitudes :

- approches proactives (méthode de la chaîne critique, *Just In Case scheduling*) ;
- approches réactives :
 - approches prédictives-réactives (réordonnements) ;
 - approches dynamiques (règles de priorité) ;
- approches proactives-réactives (ordonnement de groupes).

Coopération homme-machine

L'humain joue un rôle central dans le processus d'ordonnancement :

- présent lors de la phase prédictive (l'ordonnanceur) et lors de la phase réactive (opérateur) ;
- ses connaissances du terrain sont précieuses (l'artiste 2 est plus inspiré par telle tâche que telle autre) ;
- il peut modifier certaines contraintes du problème (renégocier une date de livraison) ;
- il est généralement nécessaire dans l'atelier pour des tâches annexes au processus d'ordonnancement comme la qualité ou la sécurité.

Proposer des systèmes homme-machine pour réaliser l'ordonnancement dans un atelier de production en présence d'incertitudes.

Ordonnancement de groupes

L'ordonnancement de groupes [Artigues et al., 2005] :

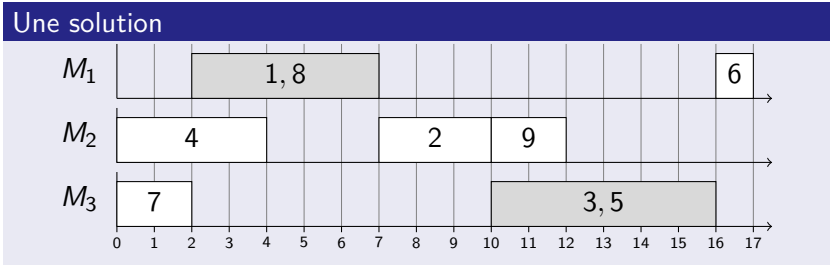
- méthode bien étudiée durant les 30 dernières années : [Thomas, 1980, Erschler and Roubellat, 1989, Billaut and Roubellat, 1996, Wu et al., 1999, Artigues et al., 2005] ;
- est une méthode d'ordonnancement sous incertitudes proactive-réactive ;
- fournit un ensemble de solutions ;
- garantit une certaine qualité (correspondant au pire des cas).

Pour fournir un ensemble de solutions, utilisation des « groupes d'opérations permutablees ».

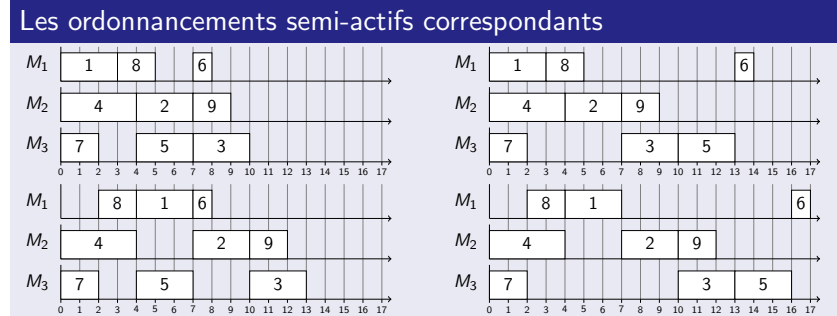
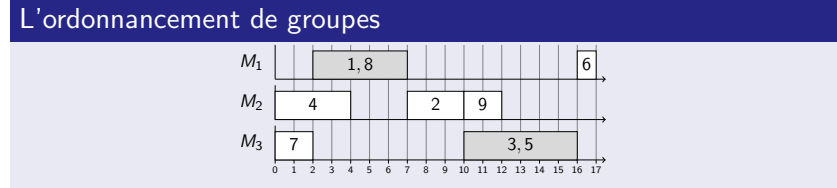
Exemple : un problème de job shop

Le problème

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Gamma^-(i)$	\emptyset	{1}	{2}	\emptyset	{4}	{5}	\emptyset	{7}	{8}
m_i	M_1	M_2	M_3	M_2	M_3	M_1	M_3	M_1	M_2
p_i	3	3	3	4	3	1	2	2	2



Ordonnements décrits



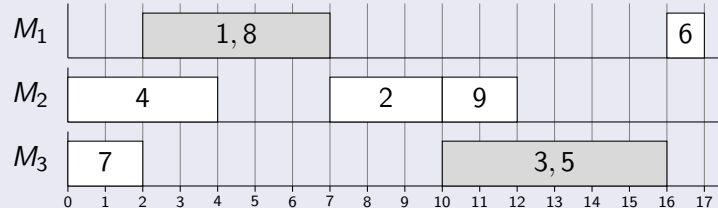
Phase prédictive de l'ordonnancement de groupes

But : obtenir un ordonnancement de groupes.

Le problème à résoudre

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Gamma^-(i)$	\emptyset	{1}	{2}	\emptyset	{4}	{5}	\emptyset	{7}	{8}
m_i	M_1	M_2	M_3	M_2	M_3	M_1	M_3	M_1	M_2
p_i	3	3	3	4	3	1	2	2	2

Le résultat de la phase prédictive

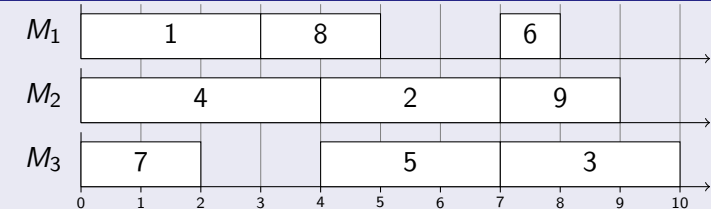


Phase réactive de l'ordonnancement de groupes

But : choisir un ordonnancement parmi ceux décrits par l'ordonnancement de groupes choisi dans la phase prédictive.

$$t = 0347 \quad \begin{aligned} M_1 &: [\{1, 8\}, \{8\}, \{6\}] \\ M_2 &: [\{4\}, \{2\}, \{9\}] \\ M_3 &: [\{7\}, \{3, 5\}, \{3\}] \end{aligned}$$

Exécution de l'ordonnancement de groupes



Avantages

Pourquoi l'ordonnancement de groupes est-il intéressant ?

- une méthode d'ordonnancement sous incertitudes proactive-réactive ;
- flexibilité sur les séquences ;
- les incertitudes n'ont pas à être modélisées ;
- méthode permettant de pallier certaines incertitudes : [Wu et al., 1999, Esswein, 2003, Pinot et al., 2007] ;
- évaluation de l'ordonnancement dans le pire des cas en temps polynomial pour les objectifs de type *minmax* [Artigues et al., 2005].

Points améliorables

Points améliorables de l'ordonnancement de groupes :

- en complément du pire des cas, le meilleur des cas pourrait être utile ;
- cette méthode peut être améliorée pour favoriser la coopération avec l'humain.

ORABAID

La méthode ORABAID est :

- la première méthode à utiliser l'ordonnancement de groupes ;
- utilisée dans le progiciel ORDO [Roubellat et al., 1995] ;
- la seule méthode utilisant l'ordonnancement de groupes utilisée dans des ateliers de production.

Description du système homme-machine

Le système homme-machine pour la phase réactive est basé sur la marge libre séquentielle [Thomas, 1980] :

- marge libre adaptée à l'ordonnancement de groupes ;
- représente le retard maximum de l'opération garantissant qu'aucune opération ne sera en retard ;
- facilement calculable ;
- permet de surveiller la satisfaction des dates de livraisons ;
- il est recommandé d'exécuter l'opération possédant la plus grande marge.

Décision	Marge
O_1	-2
O_2	0
O_3	3

Analyse du système homme-machine

Avantages :

- la machine alerte l'humain lorsque les dates de livraison peuvent ne pas être satisfaites ;
- l'humain prend la décision.

Inconvénients :

- la machine recommande une décision ;
- la charge mentale pour analyser d'autres décisions est très grande ;
- l'humain risque de devenir inactif.

Buts de ce nouveau système

Corriger les inconvénients d'ORABAID :

- la machine ne doit pas recommander une décision ;
- la machine doit exposer ses connaissances à l'humain pour aider l'humain à prendre sa décision ;
- le système doit favoriser l'activité de l'humain.

Description du système homme-machine

Différents indicateurs :

- marge libre séquentielle ;
- qualité dans le pire des cas ;
- qualité dans le meilleur des cas ;
- temps d'exécution des opérations.

Critère de qualité : retard algébrique maximum (L_{max}).

Décision	Marge	L_{max}^{PC}	L_{max}^{MC}	p_i
O_1	-2	2	0	5
O_2	0	1	0	3
O_3	3	-1	-2	7

Évaluation de ce système homme-machine

Une expérimentation permettant d'évaluer ce système homme-machine est en cours de réalisation :

- en collaboration avec Clément Guérin ;
- Comparer ORABAID et le nouveau système ;
- Étudier l'impact des indicateurs sur les performances ;
- Étudier l'activité de l'opérateur ;
- Comprendre le fonctionnement du système homme-machine.

Plan de l'expérience

Facteurs (données maîtrisées) :

- les indicateurs proposés ;
- le niveau d'activité de l'opérateur.

Variables dépendantes (résultats de l'expérimentation) :

- les performances de l'ordonnement ;
- l'utilisation des différents indicateurs.

Date de fin d'une opération dans le meilleur des cas

Formulation intuitive

$$\begin{cases} \theta_i = \max \left(r_i, \max_{j \in g^-(i)} \chi_j, \max_{j \in \Gamma^-(i)} \chi_j \right) \\ \chi_i = \theta_i + p_i \end{cases}$$

Formulation améliorée

$$\begin{cases} \theta_i = \max \left(r_i, \gamma_{g^-(i)}, \max_{j \in \Gamma^-(i)} \chi_j \right) \\ \chi_i = \theta_i + p_i \\ \gamma_{g_{\ell,k}} = C_{\max} \text{ of } 1|r_i|C_{\max}, \forall O_i \in g_{\ell,k}, r_i = \theta_i \end{cases}$$

θ_i Borne inférieure de la date de début de O_i

χ_i Borne inférieure de la date de fin de O_i

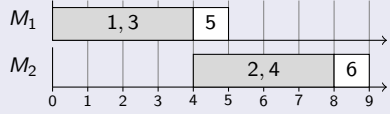
$\gamma_{g_{\ell,k}}$ Borne inférieure de la date de fin de $g_{\ell,k}$

Exemple

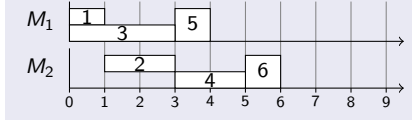
Le problème

i	$\Gamma^-(i)$	m_i	p_i
1	\emptyset	M_1	1
2	{1}	M_2	2
3	\emptyset	M_1	3
4	{3}	M_2	2
5	\emptyset	M_1	1
6	{5}	M_2	1

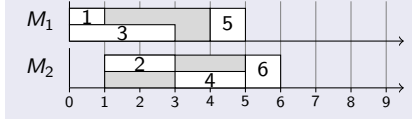
L'ordonnement de groupes



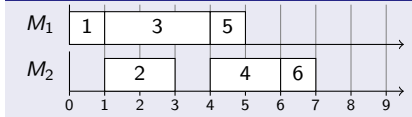
Formulation intuitive



Formulation améliorée



Solution optimale



Bornes inférieures génériques

Objectif régulier : fonction croissante des C_i .

χ_i permet de calculer une borne inférieure pour tout objectif régulier car $\chi_i = LB(C_i)$

Utilisation directe pour calculer une borne inférieure :

$$LB(L_{\max}) = \max_{\forall O_i} L_i(\chi_i) = \max_{\forall O_i} (\chi_i - d_i)$$

$$LB(C_{\max}) = \max_{\forall g_{\ell,k}} \gamma_{g_{\ell,k}}$$

Borne inférieure pour le *makespan*

Borne inférieure classique pour le *job shop* : relaxation en problèmes à une machine [Carlier, 1982] sur chaque machine. La relaxation en problème à une machine a besoin de quelques outils :

- la tête r_i (*head* en anglais) : θ_i ;
- la durée de latence q_i (*tail* en anglais) : θ_i renversé.

Pour l'ordonnement de groupes, la relaxation est faite sur les groupes plutôt que sur les machines (plus de sous-problèmes, mais de plus petite taille).

Résolution des problèmes à une machine : méthode exacte de Carlier [Carlier, 1982].

Utilisation des bornes inférieures

Ces bornes peuvent être utilisées :

- comme évaluation d'un ordonnancement de groupes :
 - lors de la phase proactive ;
 - lors de la phase réactive ;
- Comme outils pour des heuristiques [Pinot and Mebarki, 2008] :
 - règles de priorité ;
 - heuristiques de type *shifting bottleneck* ;
- Comme outils pour des méthodes exactes.

Présentation

Méthode exacte trouvant un ordonnancement optimal pour tout objectif régulier.

Méthode exacte de type procédure de séparation et évaluation (*branch and bound*) :

- Procédure de séparation basée sur l'énumération des ordonnancements actifs ;
- Procédure d'évaluation : borne inférieure présentée, borne supérieure obtenue par l'évaluation d'une solution.

Diminution de l'espace de recherche

La date de fin d'une opération interfère avec l'objectif :

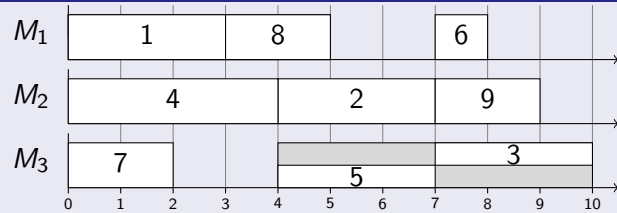
- la date, car la fonction objectif est une fonction des dates de fin des opérations ;
- en interférant avec les dates de fin des autres opérations, à cause des contraintes de précédences ou de ressources.

Une condition suffisante au séquençement d'un groupe courant complet tout en conservant la solution optimale est :

- le séquençement ne dégrade pas la fonction objectif ;
- le séquençement n'interfère pas avec les dates de début au plus tôt des autres opérations suivantes.

Exemple

L'ordonnement de groupes : {1, 8} à séquencer



Le problème à une machine

i	r_i	p_i	\tilde{d}_i
1	0	3	4
8	2	2	7

La solution [1; 8] :

- n'interfère pas avec les dates de début des autres opérations ;
 - n'interfère pas avec le *makespan*.
- ⇒ cette solution conserve la solution optimale.

Stratégie de recherche

Parcours de l'arbre de recherche :

- Parcours en profondeur :
 - Avantage : utilise peu de mémoire ;
 - Inconvénient : une mauvaise décision sur l'ordre de parcours des fils peut coûter très cher.
- Parcours des meilleures bornes en premier :
 - Avantage : pas de mauvaise décision possible ;
 - Inconvénient : utilisation mémoire possiblement exponentielle.

Solution retenue : Meilleures bornes en premier, puis, une fois un certain nombre de nœuds stockés, en profondeur.

Protocole

Instances : 1a01 à 1a40 de [Lawrence, 1984].

Pour chaque instance, nous générons un ordonnancement de groupes avec une qualité optimale connue (en utilisant l'algorithme décrit dans [Brucker et al., 1994]) et une très grande flexibilité (en utilisant l'algorithme EBJG décrit dans [Esswein, 2003]).

Différentes variantes :

- Défaut :
 - condition suffisante utilisée;
 - recherche par meilleure borne jusqu'à 1000 nœuds stockés.
- Recherche en profondeur : comme Défaut avec une recherche en profondeur.
- Pas de condition suffisante : comme Défaut sans la condition suffisante.

Résultats généraux

Résultats de Défaut par taille :

- Instances à 5 machines : < 1s;
- 10 × 10 et 15 × 10 : < 1min (sauf 1a24 : 14min);
- 30 × 10 : < 4s;
- 20 × 10 et 15 × 15 : 4 non résolues en 24h sur 10.

Comparaison de Défaut avec les autres variantes :

- Recherche en profondeur :
 - en moyenne 20 fois plus lent;
 - plus rapide sur 4 instances de taille 10 × 10;
- Pas de condition suffisante :
 - en moyenne 3 fois plus lent;
 - jamais meilleur;
 - 28 fois plus lent pour 1a17.

Résultats pour les instances difficiles après 24 heures de calcul

Taille	Inst.	Opt.	BI	Nœuds	BS	Nœuds	Tot. Nœuds
20 × 10	1a27	1252*	1235	0	1279	5150695	9500000
20 × 10	1a29	1202	1202	3836	1221	10343	10000000
20 × 10	1a30	1355	1355	0	1359	2911199	12500000
15 × 15	1a37	1397	1397	2	1412	7623146	9700000

BI : borne inférieure, BS : borne supérieure.

Utilisation de la méthode exacte

Utilisation de cet algorithme comme évaluation d'un ordonnancement de groupes :

- lors de la phase proactive;
- lors de la phase réactive;

Conclusion

Point abordés :

- L'ordonnancement de groupes, une méthode prédictive réactive d'ordonnancement sous incertitudes.
- Les systèmes homme-machine pour la phase réactive :
 - description et analyse d'ORABAID ;
 - Proposition d'un nouveau système homme-machine, dans le but d'améliorer la coopération homme-machine.
- Une méthode exacte pour le meilleur des cas dans un ordonnancement de groupes :
 - pour tout objectif régulier ;
 - utilisation d'une borne inférieure basée sur la relaxation en problème à une machine ;
 - énumération des ordonnancements actifs ;
 - condition suffisante diminuant l'espace de recherche.

Perspectives pour la méthode exacte

Améliorations de l'évaluation de la méthode exacte :

- utilisation d'instances plus réalistes ;
- comparaison avec les algorithmes de résolution du *job shop*.

Améliorations de la méthode exacte :

- intégration de la condition suffisante dans la procédure de séparation ;
- optimisation pour la phase réactive (problèmes à résoudre durant cette phase très proches les uns des autres) :
 - utilisation des résolutions précédentes pour trouver une première solution efficace ;
 - mise en commun des espaces de recherche des différents problèmes à résoudre simultanément.

Perspectives pour la coopération homme-machine




Les résultats de l'expérimentation vont ouvrir de nouvelles perspectives :

- différences entre les deux systèmes homme-machine ;
- points forts et points faibles du nouveau système ;
- amélioration grâce à ces résultats.

Merci

Merci pour votre attention.

Bibliographie I

-  Artigues, C., Billaut, J.-C., and Esswein, C. (2005). Maximization of solution flexibility for robust shop scheduling. *European Journal of Operational Research*, 165(2) :314–328.
-  Billaut, J.-C. and Roubellat, F. (1996). A new method for workshop real-time scheduling. *International Journal of Production Research*, 34(6) :1555–1579.
-  Brucker, P., Jurisch, B., and Sievers, B. (1994). A branch and bound algorithm for the job-shop scheduling problem. *Discrete Applied Mathematics*, 49(1-3) :107–127.



Bibliographie II

-  Carlier, J. (1982). The one-machine sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, 11(1) :42–47.
-  Erschler, J. and Roubellat, F. (1989). An approach for real time scheduling for activities with time and resource constraints. In Slowinski, R. and Weglarz, J., editors, *Advances in project scheduling*. Elsevier.
-  Esswein, C. (2003). *Un apport de flexibilité séquentielle pour l'ordonnancement robuste*. Thèse de doctorat, Université François Rabelais Tours.

Bibliographie III

-  Lawrence, S. (1984). Resource constrained project scheduling : an experimental investigation of heuristic scheduling techniques (supplement). Technical report, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.
-  Pinot, G., Cardin, O., and Mebarki, N. (2007). A study on the group sequencing method in regards with transportation in an industrial FMS. In *Proceedings of the IEEE SMC 2007 International Conference*.

Bibliographie IV

-  Pinot, G. and Mebarki, N. (2008). Heuristiques pour le meilleur des cas dans un ordonnancement de groupes. In *Actes de la 7ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'08)*.
-  Roubellat, F., Billaut, J.-C., and Villaumie, M. (1995). Ordonnancement d'atelier en temps réel : d'ORABAID à ORDO. *Revue d'automatique et de productique appliquées*, 8(5) :683–713.

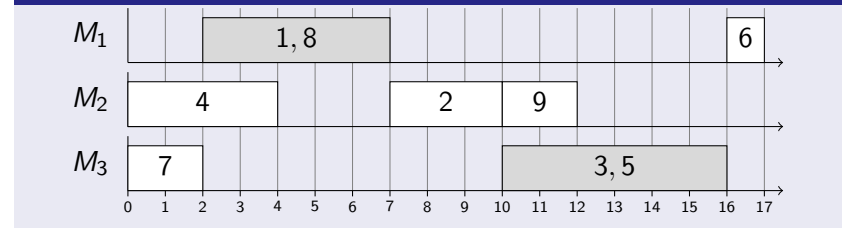
Bibliographie V

- 📄 Thomas, V. (1980).
Aide à la décision pour l'ordonnancement d'atelier en temps réel.
Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- 📄 Wu, S. D., Byeon, E.-S., and Storer, R. H. (1999).
A graph-theoretic decomposition of the job shop scheduling problem to achieve scheduling robustness.
Operations Research, 47(1) :113–124.

Énumération des ordonnancements actifs

Énumération des ordonnancements actifs groupe par groupe (respect du graphe de précédences) :

Le problème



Un ordre valide

$[\{O_4\}, \{O_7\}, \{O_1, O_8\}, \{O_2\}, \{O_9\}, \{O_3, O_5\}, \{O_6\}]$
 $\Rightarrow [\{O_1, O_8\}, \{O_3, O_5\}]$