

UN SYSTEME INTERACTIF D'AIDE A LA DECISION POUR L'ORDONNANCEMENT EN TEMPS REEL D'ATELIER

François Roubellat*, C. Artigues** et M. Villaumié***

Résumé. - La réduction des cycles de fabrication et les incertitudes sur l'environnement de l'entreprise nécessitent une maîtrise accrue de la fabrication. Celle-ci passe par des méthodes d'ordonnancement d'atelier efficaces, qu'il faut concevoir dans une optique de conduite en temps réel. Un système interactif d'aide à la décision est proposé pour répondre à ce défi. Il repose sur une approche originale de caractérisation d'un ensemble d'ordonnements qui permet en temps réel d'explicitier des degrés de liberté qui sont exploités pour réagir aux diverses situations imprévues. Cette méthode et le logiciel associé constituent le coeur d'un progiciel d'ordonnancement en temps réel d'atelier actuellement implanté dans une soixantaine d'entreprises.

Mots-clés : ordonnancement, aide à la décision, conduite en temps réel.

1. Introduction

Pour les entreprises qui travaillent à la commande, le contexte actuel impose des délais de fabrication de plus en plus courts alors que la demande de plus en plus irrégulière ne permet plus d'anticiper la production. Dans cet environnement incertain, l'intérêt d'un système informatisé d'ordonnancement d'atelier est évident pour organiser la réalisation du programme de fabrication prévu à l'aide des ressources de l'atelier, pour intégrer au mieux dans cette organisation les commandes imprévues ou urgentes, ainsi que pour maîtriser les conséquences des aléas internes sur des programmes de fabrication de plus en plus tendus. Pour qu'un tel système soit efficacement utilisé, il doit gagner la confiance des différents acteurs de la production dans l'atelier. Cette confiance repose sur des caractéristiques essentielles telles que la prise en compte des contraintes réelles de l'atelier, la cohérence des

* Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS, Toulouse.

** ORDOSOFTWARE, Besançon.

*** Cabinet Villaumié S.A., Besançon.

solutions proposées, leur robustesse face aux aléas, la flexibilité du système pour permettre l'intervention des hommes dans la conduite de l'atelier.

Pour répondre à de telles caractéristiques, les méthodes classiques d'ordonnement d'atelier ne sont pas réellement adaptées, car elles visent à rechercher un ordonnancement unique, solution optimale ou approchée du problème considéré (Buxey, 1989 ; Conway, 1967).

C'est pourquoi nous avons choisi de considérer le problème d'ordonnement d'atelier comme un problème de prise de décision en temps réel, que nous avons abordé dans une optique d'aide à la décision, afin de préserver le rôle essentiel de l'homme pour la conduite en temps réel d'un atelier. Ceci nous a conduits à proposer une approche originale pour organiser cette aide à la décision, approche qui a permis de développer le logiciel ORABAID : celui-ci constitue le cœur du progiciel interactif de conduite en temps réel d'atelier ORDO, commercialisé et actuellement implanté dans une soixantaine d'entreprises appartenant à des secteurs industriels très variés.

Le but de cet article est de présenter les principes généraux de notre approche et de montrer comment, dans le cadre d'une étroite collaboration avec la société qui commercialise ORDO, des problèmes d'ordonnement de plus en plus complexes ont été considérés, permettant ainsi de prendre en compte des caractéristiques de plus en plus variées de la fabrication dans les ateliers de l'industrie manufacturière.

2. Caractéristiques générales du problème d'ordonnement considéré

2.1 *Caractéristiques des ordres de fabrication*

On a un ensemble de n ordres de fabrication (OF) à réaliser. Chaque ordre de fabrication i a une date de début au plus tôt r_i et une date de fin au plus tard (ou délai) d_i . Il est caractérisé par son processus de fabrication (ou gamme), qui définit l'ensemble des opérations à réaliser et leur enchaînement. La réalisation de chaque opération nécessite la mise en oeuvre de ressources selon des modalités qui seront précisées par la suite.

2.2 *Caractéristiques des ressources*

Chaque ressource k est disponible en quantité limitée C_k , C_k entier. Deux types particuliers de ressources sont considérés :

- les ressources de type disjonctif (machines par exemple), qui ne peuvent exécuter qu'une opération à la fois. Pour ces ressources $C_k = 1$.
- les ressources de type cumulatif (équipes d'hommes par exemple), qui peuvent exécuter plusieurs opérations simultanément. Elles sont consommées en quantités entières lors de l'exécution d'une opération et disponibles en quantité limitée C_k , C_k entier supérieur à 1 représentant la capacité de la ressource k .

Chaque ressource de type disjonctif et chaque unité de ressource de type cumulatif constitue une « ligne de charge ». Les lignes de charge d'une ressource cumulative sont interchangeables.

2.3 Caractéristiques des opérations

Lorsqu'une opération (i,j) (opération i du rang j de la gamme) nécessite une ressource cumulative, on fait l'hypothèse qu'elle utilise un nombre de lignes de charge compris entre deux entiers $e_{\min}(i,j)$ et $e_{\max}(i,j)$.

Si un choix de ressources est possible pour réaliser une opération, on suppose que la durée de cette opération dépend de la ressource effectivement choisie, ainsi que du nombre de lignes de charge utilisées si cette ressource est cumulative.

Différentes modalités d'utilisation des ressources pour réaliser une opération ont été considérées. Elles seront précisées au paragraphe 4.

3. Approche retenue pour l'ordonnancement en temps réel

3.1 Principe général

Nous proposons une approche pour résoudre le problème d'ordonnancement en temps réel (Erschler, 1976 ; Billaut, 1996), qui vise à :

- offrir au décideur responsable de l'ordonnancement un choix d'actions compatibles avec les contraintes à satisfaire (plan de production, processus de fabrication, limitation des ressources), chaque fois qu'il a une décision à prendre. Dans un tel contexte, les dates souhaitées de fin de fabrication des ordres de fabrication sont considérées comme des contraintes ;
- pouvoir faire évoluer simplement cet ensemble d'actions compatibles lorsqu'un événement modifie l'état de l'atelier.

Pour atteindre ces deux objectifs, nous proposons de rechercher un ensemble d'ordonnements compatibles avec les contraintes retenues, et non pas un seul, comme dans les méthodes classiques. Cet ensemble permettra de mettre en évidence des degrés de liberté disponibles pour aider le décideur à construire en temps réel un ordonnancement compatible avec le plan de production demandé et les contraintes retenues (Erschler, 1976 ; Billaut, 1996).

Pour mettre en oeuvre cette approche, une procédure en deux étapes a été définie :

- dans la première étape, les caractéristiques d'un ensemble d'ordonnements compatibles avec les contraintes essentielles du problème sont définies : c'est une étape d'analyse ;
- dans la deuxième étape, ces caractéristiques servent de base à la définition en temps réel d'un ensemble d'actions possibles, chaque fois qu'une décision est à prendre. C'est une étape d'aide à la décision, pour laquelle des informations complémentaires peuvent être associées aux actions proposées afin d'aider au choix de l'action la mieux adaptée.

3.2 Caractérisation d'un ensemble d'ordonnements admissibles

La problématique de la représentation d'un ensemble d'ordonnements a fait l'objet d'un certain nombre de travaux, parmi lesquels on peut citer les PQR arbres (Baptiste, 1991), les réseaux de Petri (Carlier, 1988), les groupes de tâches à rang équivalent ou à rang inclus (Levy, 1995), ou encore les séquences semi-rigides (Amamou, 1992).

Pour ce qui nous concerne, notre démarche se situe dans la problématique de l'Analyse Sous Contraintes (Erschler, 1976 ; Billaut, 1996) qui vise essentiellement à rechercher les caractéristiques de tout ou partie de l'ensemble des ordonnements compatibles avec l'ensemble des contraintes définies au paragraphe 2. Ceci veut dire en particulier que les délais des ordres de fabrication sont pris en compte comme des contraintes à satisfaire. La caractérisation complète de l'ensemble des ordonnements admissibles étant illusoire pour un problème réel, nous nous limitons uniquement à la caractérisation d'un sous-ensemble des ordonnements admissibles, ce qui revient à expliciter seulement des conditions suffisantes d'admissibilité. Le sous-ensemble particulier d'ordonnements considéré est caractérisé par une affectation précise de chaque opération à une ressource, lorsqu'un choix de ressource est possible, et par la définition sur chacune des ressources, d'une séquence de groupes d'opérations ordonnés, les opérations d'un même groupe étant totalement permutables. Ceci permet, au sein de chaque groupe, de mettre en évidence une flexibilité de nature « séquentielle », qui sera utile pour réagir aux aléas lors de la conduite en temps réel de l'atelier. Par contre, la flexibilité « d'affectation » éventuellement possible n'est pas explicitée a priori, mais sera effectivement utilisée lors de la conduite en temps réel, comme cela sera précisé. Un groupe d'opérations permutables est constitué d'opérations utilisant le même ensemble de ressources, ainsi que les mêmes lignes de charges pour toute ressource cumulative. Une séquence de groupes est dite admissible lorsque tous les ordonnements qu'elle contient satisfont l'ensemble des contraintes du modèle décrit au paragraphe 2. Elle est dite réalisable lorsque certains de ces ordonnements violent uniquement les délais de certains ordres de fabrication. L'admissibilité d'une séquence de groupes peut être analysée, en considérant la longueur du chemin critique d'un graphe potentiels-tâches particulier que nous avons défini (Thomas, 1980).

Exemple :

Considérons le problème d'ordonnement défini par les tables 1 et 2, dans lesquelles (i,j) représente l'opération de rang j dans la gamme supposée linéaire de l'ordre de fabrication i , la table 1 donnant la ressource, supposée disjonctive, nécessaire pour exécuter chaque opération, la table 2 donnant la durée de cette opération.

Les dates de début r_i des ordres de fabrication sont $r_1 = 1, r_2 = r_3 = r_4 = 0$, et les dates de fin d_i sont $d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = 5$.

Pour cet exemple, on peut définir la séquence de groupes décrite sur la figure 1. En considérant, au sein de chaque groupe, les 2 ordres possibles pour l'exécution des 2 opérations qui les composent, on obtient 16 ordonnements admissibles. Chaque groupe met ainsi en évidence des degrés de liberté de nature séquentielle qui sont disponibles pour organiser l'exécution des 4 ordres de fabrication considérés.

M =

	j	1	2
i			
1		m_1	m_2
2		m_1	m_2
3		m_2	m_1
4		m_2	m_1

Table 1 : Matrice des ressources

P =

	j	1	2
i			
1		1	1
2		1	1
3		1	1
4		1	1

Table 2 : Matrice des durées

ressource	1er groupe	2ème groupe
m_1	(1,1) et (2,1)	(3,2) et (4,2)
m_2	(3,1) et (4,1)	(1,2) et (2,2)

Figure 1 : Séquence de groupes

Pour un problème donné, la recherche d'une séquence de groupes admissible est basée sur les principes suivants (pour plus de détail, voir (Billaut, 1993)).

3.2.1 Génération d'une séquence initiale de groupes

Une séquence initiale de groupes réalisable et si possible admissible est générée selon une procédure itérative de construction progressive qui vise à ajouter à une séquence partielle de groupes une nouvelle opération sélectionnée au sein d'un ensemble d'opérations candidates à l'aide d'une règle de priorité visant à favoriser la satisfaction des délais des ordres de fabrication. Cette procédure s'inspire des procédures de génération d'ordonnements actifs bien connues (Conway, 1967).

3.2.2 Amélioration d'une séquence de groupes

L'amélioration d'une séquence de groupes repose essentiellement sur l'emploi d'une méta-heuristique de type Tabou (Artigues, 1997). Celle-ci recherche, dans le voisinage d'une séquence, une autre séquence qui améliore ou dégrade le moins possible le plus grand retard des ordres de fabrication.

Pour construire une séquence voisine, une opération située sur le chemin critique du graphe associé à la séquence de groupes est déplacée, soit à affectation inchangée, soit à une autre affectation. Ainsi, la séquence de groupes peut être améliorée et on converge vers une séquence, soit admissible, soit encore non-admissible. Dans ce dernier cas, soit le décideur accepte les retards constatés, soit il souhaite encore les réduire, ce qui ne peut être obtenu qu'en modifiant certaines contraintes du problème. Bien sûr, notre approche étant heuristique, ceci ne veut pas dire qu'il n'existe pas réellement d'ordonnement admissible avec les contraintes initiales.

Il est important de remarquer que cette approche heuristique trouve sa justification dans la taille des problèmes que l'on rencontre lorsqu'on veut traiter des cas industriels réels.

Exemple :

Nous considérons un atelier composé de 5 ressources fonctionnant en continu.

La ressource 1 est une ressource cumulative, de capacité C_3 égale à 3, constante au cours du temps. Ses trois lignes de charge sont notées l_1, l_2 et l_3 .

Les ressources 2, 3, 4 et 5 sont des ressources disjonctives.

Sept ordres de fabrication sont à réaliser. Les ordres de fabrication i tels que $1 \leq i \leq 6$ ont une date de disponibilité r_i identique et égale à 0, l'ordre de fabrication 7 a une date de disponibilité égale à 20. Toutes les dates de livraison d_i telles que $1 \leq i \leq 7$ sont identiques et égales à 100.

La matrice M (table 3) fournit pour chaque opération les numéros des ressources susceptibles de l'exécuter. Pour chaque opération (i,j) utilisant une ressource cumulative, $e_{\min}(i,j)$ et $e_{\max}(i,j)$ sont indiqués entre parenthèses après le numéro de la ressource.

Il est important de remarquer que les opérations $(2,1)$, $(4,1)$ et $(6,1)$ peuvent être exécutées indifféremment par la ressource 4 ou par la ressource 5 (concept de pool de ressources, voir paragraphe 4).

La matrice P (table 4) fournit pour chaque opération (i,j) :

- si (i,j) utilise une ressource disjonctive, la durée opératoire de (i,j) pour chaque ressource du pool M_{ij} , dans l'ordre où les ressources apparaissent dans la matrice M ;
- si (i,j) utilise une ressource cumulative, la durée opératoire de (i,j) selon le nombre de lignes de charge utilisé compris entre $e_{\min}(i,j)$ et $e_{\max}(i,j)$.

M =

$i \setminus j$	1	2	3	4
1	1(2,3)	2	3	-
2	4/5	2	1(1,1)	-
3	3	5	1(1,1)	3
4	4/5	2	3	-
5	2	1(3,3)	3	-
6	4/5	2	3	-
7	2	1(1,1)	-	-

Table 3: Matrice des ressources

P =

$i \setminus j$	1	2	3	4
1	(15,10)	15	5	-
2	10/10	20	(15)	-
3	2	3	(10)	15
4	10/10	15	10	-
5	5	(20)	15	-
6	10/10	5	20	-
7	2	(5)	-	-

Table 4 : Matrice des durées

Il est à noter que cet exemple est uniquement pédagogique et qu'il ne cherche pas à refléter un atelier réel.

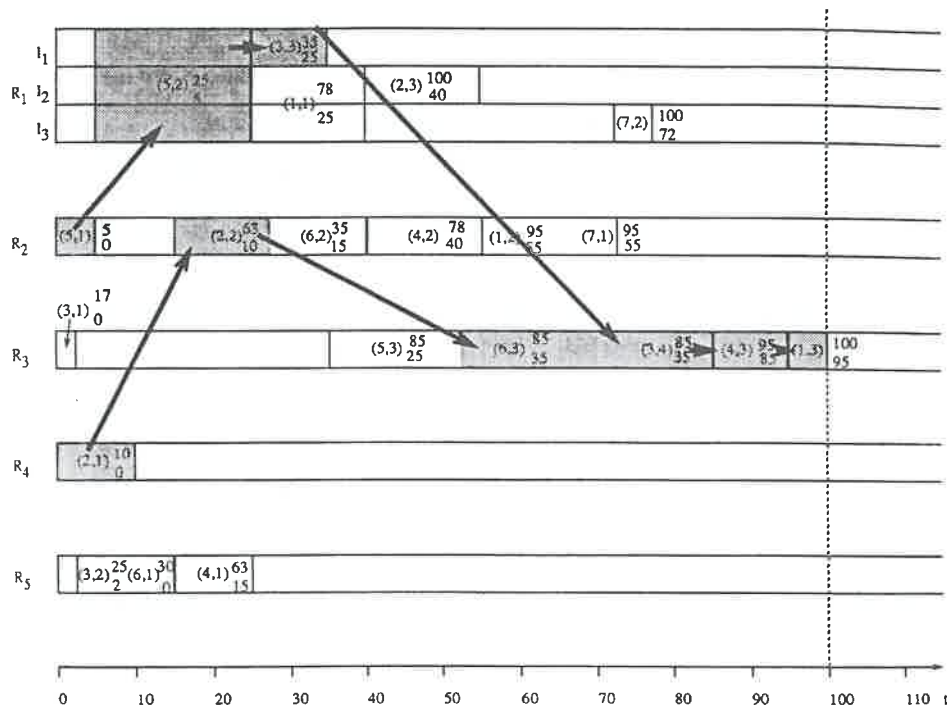


Figure 2 : Séquence de groupes

La figure 2 présente sous forme de diagramme de Gantt une séquence de groupes admissible obtenue pour cet exemple, calée à gauche. On voit apparaître 4 groupes d'opérations, un de 3 opérations et 3 de 2 opérations. Ainsi, cette séquence de groupes explicite 48 ordonnancements admissibles en termes de séquences d'exécution des opérations. Du point de vue temporel, et en tenant compte de la flexibilité séquentielle ainsi explicitée, la fenêtre d'exécution (α, β) de chaque opération apparaît sur la figure (notation $(i,j)_\alpha^\beta$ où α est la date de début au plus tôt et β la date de fin au plus tard de (i,j)). Ainsi, les opérations grisées sont sur un chemin critique, c'est-à-dire qu'il existe au moins un des ordonnancements admissibles pour lequel le chemin critique associé inclut l'une au moins de ces opérations. Donc tout problème lié à l'exécution de l'une de ces opérations critiques entraînera la non-admissibilité du ou des ordonnancements correspondants, réduisant ainsi la flexibilité disponible.

3.3 Conduite en temps réel de l'atelier

Cette conduite de l'atelier repose sur les décisions qui doivent être prises en temps réel pour assurer la réalisation des ordres de fabrication à l'aide des ressources disponibles, et en tenant compte des aléas qui surviennent. Pour assurer cette conduite, il faut savoir répondre aux quatre questions suivantes :

- Q_1 : lorsqu'une opération se termine, quelle opération faut-il engager sur les ressources qui se libèrent ?

- Q_2 : lorsqu'une opération se termine, et si une nouvelle opération de l'ordre de fabrication concerné devient exécutable, au sens des contraintes de gamme, peut-on engager l'exécution de cette opération et sur quelles ressources ?
- Q_3 : lorsqu'un aléa se produit, cette nouvelle situation justifie-t-elle une décision ? Si oui, laquelle ?
- Q_4 : lorsqu'un aléa se termine, cette nouvelle situation justifie-t-elle une décision ? Si oui, laquelle ?

On voit ainsi apparaître que toute décision de conduite repose sur trois concepts majeurs :

- la surveillance, qui permet de détecter l'occurrence des événements susceptibles d'entraîner une décision ;
- le diagnostic, qui confirme qu'une décision doit être prise suite à l'événement constaté ;
- la décision, qui vise à sélectionner l'action à appliquer au système, la mieux adaptée à la situation constatée.

Pour ces deux derniers points, rappelons que nous nous sommes placés dans une logique d'aide à la décision avec interaction permanente avec le décideur.

3.3.1 Événements significatifs pour la prise de décision

Cinq événements significatifs pour la prise de décision ont été retenus :

- FE : Fin d'exécution d'une opération ;
- P : Panne d'une ressource qui rend celle-ci momentanément inutilisable ;
- B : Blocage d'un ordre de fabrication, qui interdit momentanément l'exécution d'une opération de cet ordre de fabrication, indépendamment des ressources nécessaires ;
- FP : Fin de panne ;
- FB : Fin de blocage.

FE, FP, FB sont des événements attendus, tandis que P et B sont des événements inattendus.

3.3.2 Décisions associées à la conduite en temps réel

Pour pouvoir répondre en temps réel aux questions Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 qui caractérisent la conduite en temps réel, quatre types de décision ont été retenus :

- Décision de type E, pour début d'exécution : une opération choisie parmi un ensemble d'opérations candidates est mise en exécution à l'aide d'un ensemble de ressources qui lui sont affectées et auxquelles elle est « couplée » pendant la durée de cette exécution. Cette décision intervient pour répondre à Q_1 , Q_2 et Q_4 .
- Décision de type I, pour interruption : cette décision interrompt le couplage entre une opération et les ressources qui lui ont été attribuées pour permettre son

exécution. Elle intervient pour répondre à la question Q_4 , lorsqu'un aléa s'étant produit, il devient nécessaire soit de poursuivre l'exécution de l'opération qui était en cours si cet aléa était de type panne de ressource, soit de pouvoir utiliser les ressources couplées à une opération en cours si celle-ci se trouve bloquée ;

- Décision de type R, pour reprise d'exécution : cette décision, comparable à la décision de type E, permet de reprendre l'exécution d'une opération précédemment interrompue, pour la terminer, et ainsi de la coupler à nouveau à un ensemble de ressources nécessaires pour cette exécution.
- Décision de type C, pour changement d'affectation : cette décision a pour but de changer l'affectation d'une opération sur tout ou partie des ressources prévues pour son exécution. Elle vise à exploiter les degrés de liberté liés au choix des ressources utilisables pour exécuter une opération, qui ne sont pas explicités dans la séquence de groupes, puisque celle-ci repose sur le choix d'une affectation pour chaque opération. Cette décision ne peut pas s'appliquer à une opération couplée à des ressources. Dans ce cas, si on veut changer d'affectation, il faut au préalable interrompre l'opération correspondante. Elle intervient donc de façon complémentaire à la décision de type I pour répondre à la question Q_4 .

3.3.3 Etat de l'atelier

En relation avec les événements et les décisions mentionnés ci-dessus, on peut associer aux opérations et aux ressources un ensemble d'états dont l'enchaînement peut être modélisé à l'aide de réseaux de Petri (Artigues, 1997) et qui permet, grâce au système de suivi implanté dans l'atelier, de connaître en permanence l'état réel de l'atelier.

3.4 Procédures d'aide à la décision (Artigues, 1997)

La séquence de groupes et le graphe potentiels-tâches associé servent de base pour le système interactif d'aide à la décision qui a été développé. Dans la logique de l'approche proposée, la satisfaction des délais des ordres de fabrication transmis à l'atelier constitue l'objectif principal de la conduite en temps réel. Il est donc essentiel de pouvoir référencer toute décision par rapport à ces délais. De plus, au delà des degrés de liberté de nature séquentielle et temporelle que met en évidence une séquence de groupes, il est indispensable de savoir faire évoluer ces degrés de liberté en fonction des aléas qui surviennent d'une part, et de permettre au décideur d'envisager des actions au delà de celles qui lui sont proposées d'autre part, en particulier pour les choix possibles d'affectation.

3.4.1 Surveillance de l'admissibilité d'une séquence de groupes

L'utilisation d'une séquence de groupes pour l'aide à la décision suppose que tous les ordonnancements qu'elle contient soient admissibles, donc que la séquence elle-même soit admissible. La surveillance de cette admissibilité peut se faire à l'aide de marges temporelles que l'on peut associer à chaque opération et que l'on calcule à l'aide du graphe potentiels-tâches associé à la séquence (Thomas, 1980). Ces marges renseignent sur la variation temporelle maximale de la date de début ou de fin d'une opération qui préserve tous les degrés de liberté de nature séquentielle inclus dans la séquence de groupes. Elles constituent donc des indicateurs locaux d'admissibilité associés à chaque opération, dont l'actualisation, pour tenir compte des aléas, est facile et rapide.

3.4.2 Aide à la décision dans le respect du contexte planifié

Pour la prise de décision, le respect du contexte planifié est possible et souhaitable tant que la séquence de groupes est admissible. Dans ce cas, le (ou les) décideur(s) exécute(nt) les opérations à l'aide des ressources et dans l'ordre des groupes tel que prévu au terme de la procédure de génération de la séquence de groupes. A un instant donné, on appelle « groupe en cours d'exécution sur une ressource » le premier groupe de la séquence de groupes contenant des opérations non encore exécutées qui utilisent cette ressource. Ainsi, en reprenant l'exemple du paragraphe 3.2, le premier groupe en cours d'exécution sur la machine m_1 sera le groupe composé des opérations (1,1) et (2,1). Puis, lorsque ces deux opérations seront terminées, le nouveau groupe en cours d'exécution sera composé des opérations (3,2) et (4,2). Le décideur dispose alors de degrés de liberté séquentiels (choix de l'ordre d'exécution des opérations du premier groupe en cours d'exécution de la séquence) et temporels (marges) qu'il exploite à sa guise. On peut toutefois, à travers les marges, lui indiquer l'opération du groupe dont l'exécution préservera le plus les degrés de liberté disponibles, ce choix étant bien sûr le plus favorable pour contrer les aléas à venir. Cette aide à la décision intervient pour les décisions de type E ou R.

Ainsi, en reprenant l'exemple du paragraphe 3.2, la marge de l'opération (1,1) est égale à 0 et celle de l'opération (2,1) est égale à 1. Ceci signifie que pour le groupe en cours d'exécution composé de (1,1) et (2,1), si l'on choisit d'exécuter d'abord (2,1), on dispose d'une marge de 1 unité de temps sur la date de fin de (2,1) qui préserve l'admissibilité de l'ensemble des ordonnancements caractérisés par cette séquence de groupes. Si, par contre, on choisit de commencer par (1,1), alors la marge de (1,1) étant nulle, le moindre aléa survenant au cours de l'exécution de (1,1) remet en question l'admissibilité de la séquence de groupes, c'est-à-dire que les 16 ordonnancements initialement prévus comme admissibles deviennent tous non-admissibles. On perd ainsi tous les degrés de liberté de nature séquentielle associés à la séquence de groupes considérée. Il vaut donc mieux, dans le cas considéré, exécuter l'opération (2,1) avant l'opération (1,1).

3.4.3 Aide à la décision en présence d'aléas

Lorsqu'un aléa survient, la première question concerne le diagnostic, c'est-à-dire l'estimation de l'impact de cet aléa. Si une durée estimée de cet aléa est disponible, on peut, par actualisation des marges, mesurer la conséquence sur l'admissibilité de la séquence de groupes. Si la séquence reste admissible, il n'y a pas lieu de réagir. Si la séquence devient non-admissible, il faut essayer de rétablir son admissibilité. Si la durée de l'aléa n'est pas connue, les marges permettent d'estimer la durée maximale au delà de laquelle une dérive des dates de fin de certains ordres de fabrication est à craindre. Ceci peut être utile pour décider des moyens à mettre en oeuvre pour confiner la panne ou le blocage dans cet intervalle de temps. On dispose ainsi d'un outil de diagnostic efficace.

S'il s'avère que pour préserver l'admissibilité, une réaction est nécessaire, il peut être intéressant de tenter de mettre en oeuvre un ensemble de décisions locales correctives, sur la base de propositions effectuées par le système ou le décideur, qui correspondent à des actions non prévues dans le contexte planifié par la séquence de groupes.

On peut ainsi envisager d'engager (décision E) une opération disponible qui ne se trouve pas dans le premier groupe en cours d'exécution sur la ressource où s'est produit un

blocage. Le système permet d'examiner, pour chaque opération disponible, la conséquence de son engagement sur la tenue des délais, le choix définitif appartenant au décideur.

On peut également envisager de changer l'affectation (décision C) d'une opération du premier groupe en cours d'exécution sur la ressource où s'est produit l'aléa. Ceci restituera bien sûr de la marge sur cette ressource. Le système permet de rechercher pour cette opération une nouvelle affectation qui est compatible avec la séquence de groupes en cours d'exécution et qui l'améliore au mieux. Le décideur choisira alors le changement d'affectation qui lui paraît le plus favorable. Pour sa mise en oeuvre, il utilisera bien sûr, si nécessaire, la décision I d'interruption avant de demander le changement d'affectation C.

3.4.4 Aide à la décision lorsque le décideur envisage de sortir du contexte planifié

Les modèles utilisés pour la mise en oeuvre de notre approche ne permettent pas de prendre en compte toutes les caractéristiques d'une fabrication. Aussi est-il indispensable de pouvoir permettre au décideur d'envisager certaines décisions non prévues dans la séquence de groupes proposée, et surtout, de tester leurs conséquences sur la satisfaction des délais. C'est pourquoi, sur requête des décideurs, et en utilisant des procédures semblables à celles qui ont été mentionnées ci-dessus à propos des aléas, le système peut évaluer la conséquence sur la tenue des délais de l'engagement d'une opération qui ne se trouve pas dans le premier groupe en cours d'exécution, ou bien du changement d'affectation d'une opération.

4. Les différents problèmes abordés et le transfert des résultats

Les travaux de recherche relatifs à l'approche qui vient d'être présentée ont débuté au LAAS en 1973. Les bases de l'analyse sous contraintes ont été posées dans la thèse de J. ERSCHLER en 1976 (Erschler, 1976), tandis que les principes de l'approche par séquences de groupes étaient définis dans la thèse de R. DEMMOU (Demmou, 1977). Sur ces principes, V. THOMAS (Thomas, 1980) a développé, pour le contexte des gammes linéaires et des ressources disjonctives sans affectation, les méthodes et un logiciel (ORABAID : Ordonnancement d'Atelier Basé sur l'Aide à la Décision) permettant de générer une séquence de groupes et de l'exploiter pour la conduite en temps réel d'un atelier. En 1985, des contacts avec SYSECA ont conduit à développer la première version du progiciel d'ordonnancement en temps réel d'atelier ORDO, dont ORABAID constitue le coeur et la base. Ce transfert nous a obligé à adapter notre méthode initiale pour traiter le problème d'affectation lorsqu'une opération nécessite une ressource disjonctive choisie au sein d'un pool de ressources. A partir de là, et en coopération permanente avec SYSECA d'abord, puis avec le Cabinet Villaumié ensuite, nous avons considéré successivement divers types de problèmes d'ordonnancement, en relation avec des caractéristiques fréquemment rencontrées dans les ateliers. Pour ces travaux, les modèles d'atelier retenus ont toujours été définis en fonction des besoins exprimés et ils ont été validés a priori dans quelques entreprises pilotes, ainsi qu'au cours des réunions annuelles du Club des Utilisateurs d'ORDO.

Ainsi, nous avons traité successivement les pools de ressources (cumulatives ou disjonctives) lorsque l'exécution d'une opération nécessite une ressource choisie au sein d'un pool (Le Gall, 1989), le contexte multi-ressources lorsqu'une opération nécessite simultanément plusieurs ressources choisies au sein de pools de ressources disjonctives ou cumulatives pour son exécution (Billaut, 1993), et enfin, la prise en compte explicite de

l'activité de préparation des ressources souvent nécessaire avant d'exécuter une opération, dont les caractéristiques dépendent de l'enchaînement des opérations sur les ressources (Artigues, 1997). Ce dernier travail a conduit à une modélisation originale de l'activité de préparation, qui utilise en particulier les résultats obtenus dans le contexte multi-ressources. Il a permis également de développer une procédure de changement d'affectation beaucoup plus performante que celle qui était utilisée jusqu'à présent.

Il est important de noter que les résultats obtenus au cours de ces thèses successives ont permis de faire évoluer le progiciel ORDO et d'étendre son domaine d'utilisation, en répondant à des besoins de plus en plus variés, exprimés par les utilisateurs. Sur le plan de la recherche, il peut être utile de souligner que les principes et les concepts de base de notre approche posés au début de nos travaux se sont adaptés sans problème aux différentes extensions traitées, ce qui confirme leur robustesse et leur généricité.

5. ORDO[®] et le Management Dynamique des Flux[®]

5.1 Structure Informatique d'ORDO[®] (Villaumié, 1998a)

L'industrialisation de la méthode ORABAID par le Cabinet Villaumié SA a suivi les évolutions et les extensions présentées dans le paragraphe précédent. La figure 3 résume l'architecture informatique actuelle du logiciel ORDO[®] construit autour de la méthode ORABAID (rectangle central). Cette architecture informatique a pour objectif :

- de fournir à l'algorithme ORABAID l'ensemble des informations issues de l'atelier dont il a besoin et de présenter les éléments d'aide à la décision qu'il fournit ;
- d'effectuer les arbitrages nécessaires avant l'utilisation d'ORABAID.

ORDO[®] est ainsi composé des modules suivants :

- l'ensemble des données techniques (ordres de fabrication, ressources, gammes,...) ;
- le Planning Prévisionnel à capacité illimitée, qui réalise une étape essentielle consistant à analyser l'adéquation des capacités des postes de charge (ressources), par rapport aux charges matérialisées par les ordres de fabrication à réaliser, dans les délais demandés. Face à une situation de surcharge, le décideur a la possibilité de lisser la charge en ajoutant des heures de travail, en fractionnant les ordres de fabrication, en sous-traitant ou en négociant les dates de livraison ;
- le Planning Réel à capacité limitée, qui exécute le module ORABAID de génération d'une séquence de groupes présenté dans les paragraphes précédents ;
- le Suivi Temps Réel, qui est la partie utilisée dans l'atelier. Chaque module du suivi est un client connecté au serveur ARBITRE (module ORABAID d'aide à la décision). Conversationnel, son utilisation est capitale puisque les déclarations faites sur l'état des ressources et des ordres de fabrication alimentent le recalage temps réel de la séquence de groupes et la distribution du travail dans les files d'attente par ARBITRE ;
- les statistiques et les historiques ;

- les modules complémentaires qui permettent notamment de visualiser les résultats du planning prévisionnel et réel, des statistiques et des historiques sous forme graphique sur PC. Ils permettent aussi de connecter ORDO® en amont avec des logiciels de GPAO et dans l'atelier avec des modules de saisie automatique des événements (lecteurs de codes à barre,...).

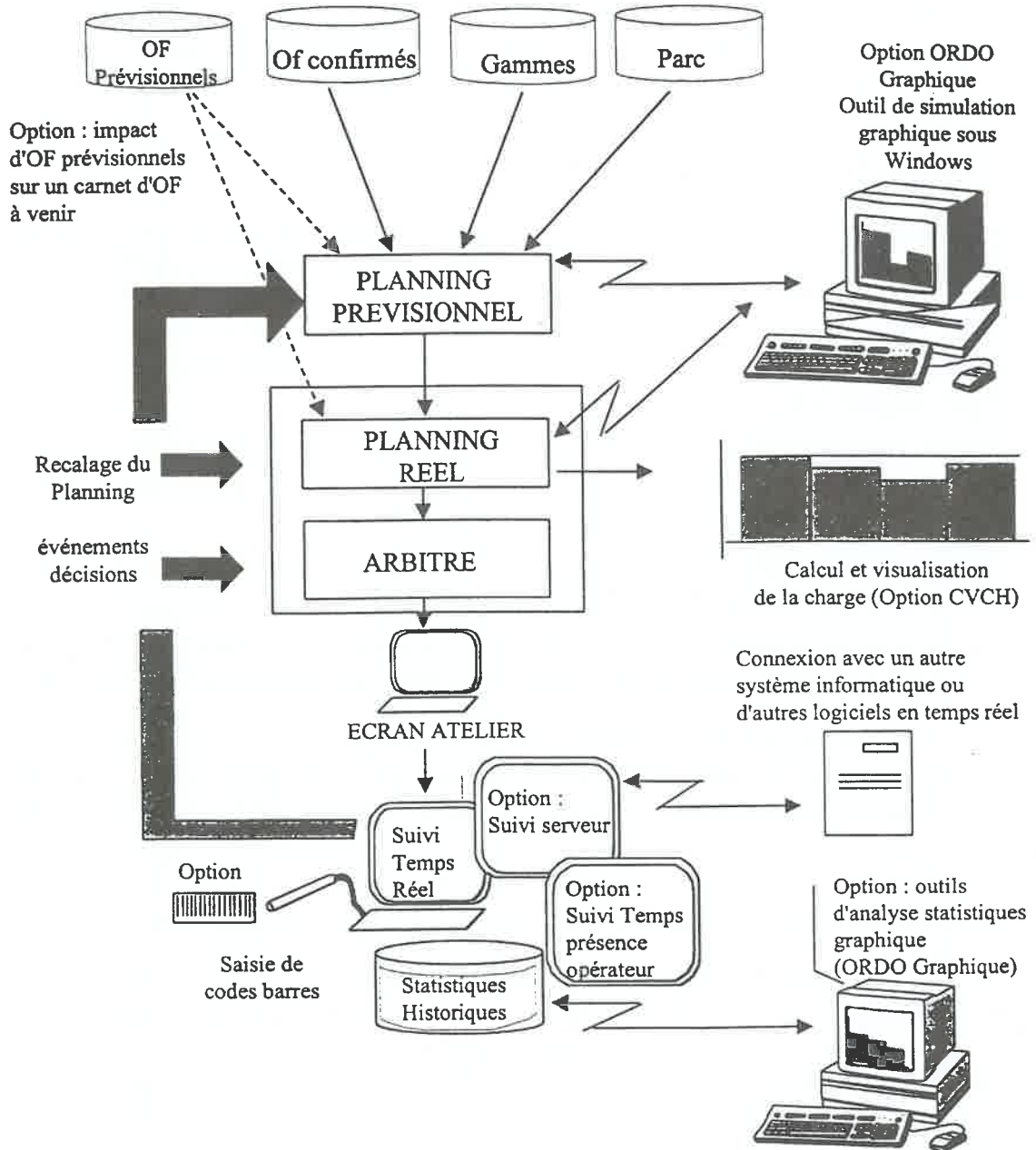


Figure 3 : Architecture informatique d'ORDO®

5.2 Le Management dynamique des flux® (Villaumié, 1998b)

La méthode ORABAID et le logiciel ORDO® sont centrés sur le problème d'ordonnancement de l'atelier qui vise uniquement le pilotage en temps réel des flux d'ordres

de fabrication au sein de l'atelier. Pour une gestion efficace d'une entreprise, il est nécessaire d'adapter tout l'environnement de l'atelier pour considérer la dynamique de la globalité de l'entreprise. C'est pourquoi le concept novateur de Management Dynamique des Flux[®] a été défini. Il vise à synchroniser et à piloter en temps réel l'ensemble des flux de l'entreprise. Il repose sur deux principes essentiels :

- l'intégration des fonctions de l'entreprise réalisée par un ensemble de progiciels : IdFLUX[®] pour la gestion commerciale et la gestion de production, IdMAP[®] pour la maintenance des équipements et des outillages, QUAL-Id[®] pour la maîtrise de la qualité, ADIPROM[®] pour la messagerie et l'administration des procédures ;
- la définition de boucles d'informations événementielles entre fonctions, principalement activées par ORDO[®].

Un système informatique global permettant la mise en oeuvre du Management Dynamique des Flux[®] a été développé. Il intègre les progiciels IdFlux[®], IdMAP[®], QUAL-Id[®], ADIPROM[®] et ORDO[®], ce dernier en étant le coeur, et d'une certaine façon, le « chef d'orchestre », grâce à son orientation temps réel affirmée. Ainsi, à partir des déclarations ou des acquisitions des données effectuées en temps réel, il permet de proposer des analyses et des actions portant sur :

- la convergence synchronisée des flux physiques (recalage de la séquence de groupes, distribution du travail en atelier, listes à servir des matières, départ en sous-traitance, préparation des outillages...);
- le contrôle des flux administratifs et financiers (mouvement de personnel, valorisation des stocks et des en-cours, facturations...);
- la prise en compte des flux d'informations agissant sur l'ensemble du processus (délais clients, spécifications qualité, téléchargement de programmes CFAO).

La poursuite du développement de ces progiciels est assurée par la société ORDO SOFTWARE, filiale du groupe CABINET VILLAUMIE SA. L'ensemble de ces produits sera très prochainement disponible en environnement objet et multi-plateformes (UNIX, Windows NT...).

5.3 Les résultats obtenus avec ORDO[®] : un témoignage (Laurent, 1997)

La table 5 présente les gains obtenus suite à l'utilisation d'ORDO[®] et du Management Dynamique des Flux[®] selon Rémi Laurent, PDG de la société SIOBRA, spécialisée en injection du zamak à Arbois (Jura). On peut ainsi constater une meilleure tenue des délais, la réduction des cycles de fabrication et la réduction des stocks d'en-cours. Il serait par ailleurs maintenant intéressant d'étudier, en partenariat avec des sociologues, les effets induits sur l'organisation du travail dans l'entreprise.

Indicateurs de gains sur 8 ans
- Doublement du chiffre d'affaires
- Doublement du nombre de pièces produites
- Progression limitée des en-cours < 50%
- Effectif +50% Valeur ajoutée par personne : +45%
- Progression du nombre de presses : +60%
- Progression du nombre OF : de 200 à 350 OF/mois
- Horizon de commandes : auparavant : 2 mois, aujourd'hui : 3 semaines
- Retard moyen ramené de 3,5 j à 0-1 jour
- Effectif Ordonnancement : 2 personnes → 1 personne
- Budget de maintenance informatique : environ 200 KF/an

Table 5 : Exemple de gains

6. Conclusion

Pour développer leur performance dans l'environnement économique actuel, les entreprises doivent être flexibles et réactives. Ceci leur impose de disposer de méthodes et de logiciels capables d'assurer une mise en oeuvre efficace de cette flexibilité et de cette réactivité, au niveau des différents centres de décision qui sont en charge de la gestion et de la conduite de l'entreprise.

Pour ce qui concerne l'ordonnancement de la fabrication dans les ateliers, nous avons privilégié une logique d'aide à la décision en temps réel, qui permet de respecter le rôle et la place des hommes de terrain dans le fonctionnement de l'atelier. Le bien-fondé de cette approche a pu être confirmé par sa mise en oeuvre effective à travers un progiciel d'ordonnancement en temps réel qui est actuellement opérationnel dans une soixantaine d'entreprises. Au delà des gains de productivité constatés, il apparaît que le caractère interactif de ce progiciel, malgré ses exigences, contribue à la mise en confiance de ses utilisateurs, puisqu'il les guide plutôt qu'il ne les contraint.

7. Bibliographie

- Amamou, M., Lapiette, M., Staroswiecki, M., (1992), « Decomposition of the single machine scheduling based on the notion of semi-rigid subsequences », *International Conference on Automation Technology, Taiwan*.
- Artigues, C., (1997), « Ordonnancement en temps réel d'ateliers avec temps de préparation des ressources », *Thèse de Doctorat, Univ. Paul Sabatier, Toulouse*.
- Baptiste, P., Cho, C.H., Favrel, J., (1991), « Une caractérisation analytique des ordonnancements admissibles sous contraintes hétérogènes en flowshop », *RAIRO APII*, v. 25, pp. 87-102.
- Billaut, J.C., (1993), « Prise en compte des ressources multiples et des temps de préparation dans les problèmes d'ordonnancement en temps réel », *Thèse de Doctorat, Univ. Paul Sabatier, Toulouse*.
- Billaut, J.C., Roubellat, F., (1996), « A new method for workshop real time scheduling », *International Journal of Production Research*, v. 34, n° 6, pp. 1555-1579.
- Buxey, G., (1989), « Production scheduling: practice and theory », *European Journal of Operational Research*, v. 39, p. 17-31.

- Carlier, J., Chrétienne, P., (1988), « Problèmes d'ordonnancement : modélisation, complexité, algorithmes », *Masson*.
- Conway, R.W., Maxwell, W.L., Miller, L.W., (1967), « Theory of scheduling », *Addison - Wesley*.
- Demmou, R., (1977), « Etude de familles remarquables d'ordonnancement en vue d'une aide à la décision », *Thèse de Doctorat*, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Erschler, J., (1976), « Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement », *Thèse de Doctorat ès-Sciences*, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Laurent, R., (1997), « Gérer la réactivité commerciale et les contraintes de production », *Conférence au Salon Solutions GPAO 1997*, Paris.
- Le Gall, A., (1989), « Un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement et le pilotage en temps réel d'atelier », *Thèse de Doctorat*, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Levy, M.L., Lopez, P., Pradin, B., (1995), « A decomposition approach to characterize feasible schedules for the one machine problem », *Int. Conf. on Industrial Engineering, Marrakech*, pp. 402-411.
- Thomas, V., (1980), « Aide à la décision pour l'ordonnancement d'atelier en temps réel », *Thèse de Doctorat*, Univ. Paul Sabatier Toulouse.
- Villaumié, M., (1998a), « ORDO[®] Ordonnancement Temps réel d'atelier », *présentation fonctionnelle du logiciel*. Cabinet Villaumié s.a.
- Villaumié, M., (1998b), « Management Dynamique des Flux[®] », *présentation commerciale*, 1998. Cabinet Villaumié s.a.