

## ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES DANS LE PILOTAGE EN TEMPS RÉEL DES ATELIERS

par Jean-Marie PROTH

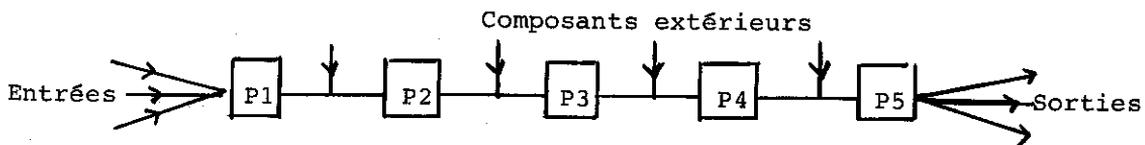
*Ingénieur de Recherche,  
Responsable d'un groupe de Gestion de Production à l'INRIA*

### I. LES SYSTEMES DE PRODUCTION

On distingue classiquement, dans le domaine discret auquel nous nous limiterons, la production linéaire (flow-shop) et la production non-linéaire (job-shop).

Dans une production de type linéaire, tous les produits ont à subir la même succession d'opérations, en des temps éventuellement différents. La production à la chaîne en est l'exemple extrême.

La figure 1 schématise une production de type linéaire. Un tel système nécessite un bon équilibrage des différents postes de travail, un excellent système d'approvisionnement, et il se contente souvent d'une main-d'oeuvre de faible qualification. L'implantation d'un système de production linéaire exige la fabrication de volumes importants et une bonne stabilité de la demande dans le temps.

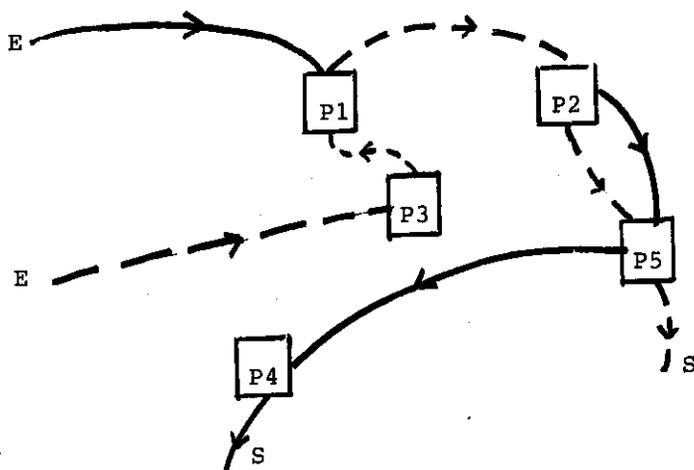


$P_i$  : poste de travail

PRODUCTION LINEAIRE

FIG. 1

On parle de production non-linéaire lorsque les produits utilisent les postes de travail disponibles dans des ordres variables, et y séjournent durant des périodes également variables (voir figure 2). Un tel système pose, à moyen terme, le problème de la régulation des capacités et, à court terme, celui de l'ordonnancement des produits. Il emploie généralement une main d'oeuvre plus qualifiée que le précédent, et polyvalente.



E : Entrées  
 S : Sorties  
 P<sub>i</sub> : Postes de travail

—————> Gammes n° 1  
 - - - - -> Gammes n° 2

#### PRODUCTION NON LINEAIRE

FIG. 2

## II. LES TENDANCES DANS LES PAYS DEVELOPPES

Les productions de masse de type linéaire sont progressivement transférées vers les pays en voie de développement. Deux raisons essentielles à cela :

1. le faible coût de la main-d'oeuvre dans ces pays
2. le fait que les pays développés consentent à vendre des usines "clefs en main".

Les pays développés conservent les fabrications non linéaires et les enrichissent de plusieurs manières, entre autres :

1. sorties de plus en plus diversifiées, pour répondre aux exigences croissantes de la clientèle,
2. augmentation de la rentabilité et de la régularité de la production,
3. contrôle accru de la qualité, ce qui est une autre exigence de la clientèle,
4. augmentation de la complexité des produits, conséquence du progrès technologique.

Deux moyens pour répondre à ces nouvelles contraintes :

1. automatisation de la production
2. amélioration de la gestion de la production

L'automatisation de la production (linéaire ou non linéaire) est une démarche maintenant classique. Elle s'est d'abord manifestée par l'automatisation de tâches isolées, puis s'est étendue à l'automatisation des transferts entre machines et/ou cellules de fabrication. L'intérêt des automatisateurs pour la gestion de la production est récent. Il est né de la nécessité d'augmenter les possibilités des modules de fabrication et des

transferts qui les lient afin de répondre à des sollicitations de plus en plus difficiles à satisfaire.

Les ateliers flexibles sont l'aboutissement de cette démarche.

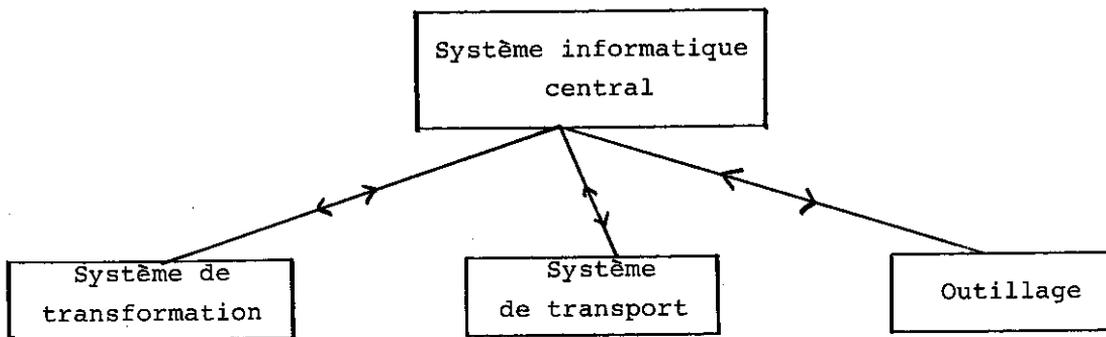
### III. ATELIERS FLEXIBLES : AUTOMATISATION COMPLETE DE SYSTEMES NON LINAIRES

Un atelier flexible est en mesure de produire, en proportions variables, un ensemble donné de produits différents. Toute modification des quotas demandés est immédiatement et automatiquement prise en compte par le système. De même, certaines pannes peuvent être prises en compte par le système qui modifie automatiquement son fonctionnement au mieux des moyens disponibles : c'est un fonctionnement en dégradé.

On distingue dans un atelier flexible :

1. le système de transformation (machine)
2. le système de transport (chariots filo-guidés, balancelles)
3. l'outillage.

Chacun de ces sous-ensembles dispose d'une gestion locale. Ces gestions locales sont coordonnées par un système informatique centralisé qui, en outre, décide des règles de gestion à appliquer en fonction des demandes des utilisateurs.



SCHEMA D'UN ATELIER FLEXIBLE

FIG. 3

Un atelier est d'autant plus flexible que le nombre de produits différents qu'il peut fabriquer est élevé et qu'il est capable d'absorber plus de pannes de ses propres composants.

On comptait 93 ateliers flexibles au Japon fin 82, 15 aux Etats-Unis et 25 en Europe fin 81. On prévoit une croissance mondiale de 20% par an. Nous avons vu qu'un système hautement automatisé comme l'est tout atelier flexible s'adapte automatiquement et immédiatement aux fluctuations de la demande ou à ses propres perturbations. La gestion est donc elle-même automatisée et s'effectue en "temps réel".

La gestion d'un système automatisé se réduit au choix d'une règle de gestion dans une liste finie de règles établies à l'avance. Pour pouvoir établir ces règles, il est nécessaire d'effectuer une étude approfondie au moment de la conception du système. Cette étude fait largement intervenir la simulation. Celle-ci peut utiliser des langages de simulation (SLAM II/ Q-NAP/ Q-GERT...) qui font intervenir un nombre plus ou moins important d'hypothèses a priori, ou des programmes dédiés écrits spécialement pour l'application considérée. Ces derniers utilisent des langages de haut niveau classiques (FORTRAN, BASIC, PASCAL...). Ils sont longs à mettre en oeuvre, mais conduisent à des résultats plus précis et sont d'utilisation aisée.

On comprend que l'on ne peut établir une liste finie de règles de gestion possibles, chacune d'elles étant associée à un ou plusieurs états du système, que si le nombre d'états du système est fini. C'est une des raisons du nombre limité de sorties des ateliers flexibles (moins de 20 produits différents).

On peut donc dire que, dans un atelier flexible, la contrainte "temps réel" est assouplie par la limitation du nombre des états du système et par l'utilisation de règles de gestion dont l'étude a été menée au moment de la conception.

#### IV. SYSTEME DE FABRICATION NON LINEAIRE FAIBLEMENT OU LOCALEMENT AUTOMATISE

Un atelier de fabrication mécanique est un exemple de systèmes de fabrication non linéaire faiblement et localement automatisé, et dont le nombre de sorties possibles et pratiquement illimité. La gestion à court terme d'un tel système est, en utilisant la terminologie des mathématiciens, un problème NP-complexe.

Plus simplement, les calculs à effectuer pour trouver le bon ordonnancement, c'est à dire celui qui optimise une fonction choisie par l'utilisateur, augmentent plus vite que le nombre de produits concernés et, plus précisément, ils augmentent comme l'exponentielle de ce nombre. Ce volume de calculs rend impossible la satisfaction de la contrainte "temps réel". Or elle doit être satisfaite : il est hors de question d'arrêter un système de fabrication sous prétexte qu'il faut un certain temps pour rechercher l'ordonnancement optimal. Le problème posé semble donc impossible à résoudre.

Les solutions adoptées ont toutes pour objectif de se ramener à des problèmes de faible taille, donc compatibles avec la contrainte "temps réel". Bien entendu, plus cette simplification est importante, plus la solution obtenue sera, en moyenne, éloignée de l'optimum.

Dans la pratique, on utilise essentiellement deux méthodes :

1. l'ordonnancement global contraint
2. l'ordonnancement local par règles de gestion.

L'ordonnancement global contraint a pour but de décider du passage de l'ensemble des produits à traiter sur l'ensemble des machines, et ceci sur une période fixée (généralement, la semaine). Un tel problème étant impossible à résoudre en un temps raisonnable, on fait disparaître les choix d'ordonnements en donnant une priorité aux produits (par exemple, priorité aux produits de délais les plus faibles). Cette manière de procéder est classique : qui n'a suivi la constitution du planning d'un atelier en fin de semaine ?

Les inconvénients de ce procédé sont connus : il est lourd et la moindre panne, la plus petite modification du carnet de commande, remettent en question un plan de travail péniblement obtenu. Le diagramme de Gantt conserve cependant de nombreux partisans, peut-être faute de méthode plus efficace et plus fiable.

L'ordonnancement local par règles de gestion consiste à effectuer à chaque point de décision une règle de gestion. On peut par exemple décider que, devant chaque machine, on appliquera la règle "Premier arrivé, premier pris en charge par la machine". Ces gestion locales ont le grand avantage d'absorber toutes les perturbations du carnet de commande et, partiellement, celles du système lui-même. Il n'est cependant pas certain qu'une règle reste "bonne" lorsque le carnet de commande est profondément modifié.

Soulignons encore que toutes les méthodes utilisées évacuent l'aspect combinatoire du problème.

Nous allons montrer qu'il est possible d'envisager un système de gestion qui, tout en satisfaisant la contrainte "temps réel", fournit une "bonne" solution, à condition de bien utiliser le passé.

#### V. LA MEMOIRE EN GESTION DE PRODUCTION

On observe que le passé d'un système de production est rarement utilisé pour prendre les décisions qui s'imposent dans le présent, sauf lorsque la situation se reproduit périodiquement à l'identique. Ainsi est perdue une masse d'informations qui pourrait être utile. Et ce gaspillage de l'information s'explique d'abord par le fait que le volume d'informations brutes à stocker serait énorme, et ensuite parce qu'on serait incapable de retrouver l'information utilisable. Notre démarche nous a permis de résoudre ces deux problèmes.

Nous avons d'abord observé que la recherche d'une gestion optimale n'est pas un objectif raisonnable en gestion, même si les critères et le système sont parfaitement connus. En effet, les décisions raisonnablement applicables sont en nombre limité car, pour être comprises, elles doivent être simples. En outre, elles doivent pouvoir être prises en charge par les structures décisionnelles de l'entreprise. Nous avons donc supposé être en possession d'une liste exhaustive de règles de gestion utilisables. Notre but est de choisir, chaque fois qu'une décision s'impose, la règle qui réalisera au mieux l'objectif visé compte tenu de l'état du système au moment de la décision, et ceci sur un horizon connu. Bien entendu, le choix de la règle de gestion doit avoir lieu en temps réel.

Le premier objectif de cette démarche est de constituer une mémoire du système suffisamment compacte pour ne demander qu'une place raisonnable à l'intérieur de l'ordinateur et suffisamment organisée pour être utilisable. Quatre facteurs interviennent dans notre démarche : l'horizon d'application de la règle de gestion, l'état du système, l'objectif visé et la règle de gestion choisie. L'horizon est la période de temps suivant la décision et au bout de laquelle l'objectif doit être atteint. Il est le même pour toutes les décisions : nous n'en tiendrons donc pas compte.

L'état du système, que nous désignerons par E, regroupe l'état des machines, les en-cours, la charge actualisée de chacune des machines. E sera généralement résumé par un nombre restreint d'indicateurs.

L'objectif visé à l'horizon donné, que nous désignons par O, est également représenté par des indicateurs, dont certains peuvent être qualitatifs (ex : "diminution des en-cours").

La règle de gestion,  $R$ , est une des règles choisies dans la liste exhaustive donnée et établie avec les utilisateurs.

Le passé du système, ainsi que des simulations effectuées à partir d'états possibles du système, nous ont donné un ensemble de triplets  $(E_i, O_i, R_i)_{i=1, \dots, n}$ .

Nous décrivons brièvement l'une des démarches possibles à partir des triplets obtenus.

Elle consiste à classer d'une part l'ensemble des états  $(E_i)_{i=1, \dots, n}$

et d'autre part l'ensemble  $[(O_i^1, O_i^2, \dots, O_i^k)]_{i=1, \dots, n}$ , où  $O_i^k$  est

l'objectif atteint à partir de  $E_i$  si on lui applique  $R_k$ .

Ce classement est effectué à l'aide de distances et/ou d'indices de dissimilarité choisis de telle sorte que si deux états appartiennent à la même classe, les deux ensembles de  $K$  objectifs correspondants appartiennent également à la même classe.

Ces classes constituent la mémoire du système. Le logiciel SICLA, mis au point à l'INRIA, est largement mis à contribution.

Dans la pratique, on observe l'état du système. On cherche à le rattacher à l'une des classes d'états obtenues précédemment. Si la chose est possible il suffit d'aller lire dans la classe des objectifs la suite d'objectifs la plus représentative pour être informé des conséquences qu'il faut attendre de l'application des différentes règles. Sinon, la décision est laissée à l'utilisateur.

Les difficultés liées à cette approche sont nombreuses. Il faut d'abord pouvoir caractériser les classes et les objectifs de manière cohérente. Il faut ensuite disposer de logiciels d'analyse des données suffisamment performants et capables de prendre en compte des problèmes de grande taille.

La mémoire obtenue peut vieillir.

Les machines s'usent et les caractéristiques moyennes du carnet de commande évoluent. La mémoire perd donc de son utilité. Il convient de la rafraîchir périodiquement et l'on procède pour cela par plans glissants. Notons que cette opération n'est plus soumise à la contrainte "temps réel". Pour fixer les idées, alors que la règle de gestion doit être choisie en quelques secondes, le rafraîchissement de la mémoire s'effectue une ou deux fois par mois.

Le niveau haut, qui n'est pas soumis à la contrainte "temps réel", fait largement appel à l'homme. Le niveau bas, soumis à cette contrainte, est automatisé.

