

**PLANIFICATION ET ORDONNANCEMENT DES
PRODUCTIONS COMPLEXES : LA RECHERCHE D'UNE
ARTICULATION COHERENTE**

Armand Hatchuel, Jing LIU, Jean-Claude SARDAS

RESUME

Les recherches dans le domaine de la planification de la production ont débouché sur trois types principaux d'outils : la planification hiérarchique classique des besoins en composants (MRP), les techniques d'ordonnancement d'atelier (heuristiques, règles de priorité), et la gestion de projet (PERT). Chaque méthode est basée sur un modèle implicite du système de production, allant des industries manufacturières aux activités structurées en projets.

Les nouvelles technologies ont engendré un type industriel particulier regroupant plusieurs caractéristiques en général séparées auparavant :

- des cycles de productions longs et incertains,
- des produits complexes dont les nomenclatures peuvent contenir plusieurs milliers de liens,
- des productions en petites séries.

Pour un tel type industriel, la maîtrise des délais requiert une intégration des trois approches mentionnées plus haut. Il convient notamment de mettre en relation les différents concepts de marge dérivés de chaque théorie afin d'obtenir un système d'outils de planification cohérent. En particulier, la question suivante devient essentielle : les études classiques d'ordonnancement laissent dans l'ombre le fait que le mode d'arrivée des ordres de fabrication dans un atelier dépend de la "stratégie de planification", aussi quelle est l'influence de cette stratégie sur la performance des règles de priorités?

Des travaux de simulation spécifiques nous ont permis d'étudier cette influence. Les résultats sont clairs : l'efficacité, évaluée selon les critères classiques (longueur des cycles de fabrication, retard de livraison) dépend de l'interaction entre stratégie de planification et règle d'ordonnancement. On peut repérer les meilleures combinaisons et expliquer certaines erreurs pratiques courantes. Ceci conduit aussi à entreprendre une nouvelle réflexion sur l'intégration des théories de planification et d'ordonnancement.

La présente communication permettra de présenter une démarche originale en matière de planification de la production, sans la séparer du contexte industriel et organisationnel (en particulier les grandes

entreprises dans les domaines de l'électronique et de l'aéronautique) dans lequel la nécessité d'une telle réflexion s'impose aujourd'hui.

1. ORIGINES DE LA REFLEXION : UN PROBLEME INDUSTRIEL SPECIFIQUE ET UN CHAMP THEORIQUE INSUFFISAMMENT EXPLORÉ

A partir d'une réflexion menée en commun avec un industriel du secteur de l'électronique professionnelle, s'est progressivement dégagée l'idée que certaines industries complexes présentaient des problèmes de planification et d'organisation spécifiques généralement peu évoqués ou peu analysés dans les revues spécialisées.

1.1 Caractérisation des "systèmes complexes de production"

De manière archétypale, nous parlerons de "systèmes complexes de production" en présence des caractéristiques suivantes :

- **Complexité des produits** : une description sous forme de nomenclature comporte de nombreux niveaux (au-delà de 7 ou 8) et une multitude de composants (de quelques centaines à plusieurs milliers d'articles fabriqués ou achetés). Il s'ensuit une grande difficulté à représenter et à manipuler globalement les données techniques et donc à définir et à faire évoluer les paramètres usuels (délais, marges, politique des lots, etc ...)
- **Une fabrication multi-unitaire à renouvellement rapide** : les produits sont vendus en petite quantité et comportent souvent des adaptations spécifiques à chaque commande. De plus, l'innovation technologique impose un rythme de renouvellement élevé. L'activité d'étude et de réalisation de maquettes et de prototypes est importante. Dans certains cas, l'existence de moyens communs de production pour la fabrication en série et les prototypes oblige à gérer les conflits potentiels entre ces deux types d'activités.
- **Complexité du processus de production** : ce dernier fait intervenir la plupart des métiers classiques dont,

notamment, usinage, fabrication de composants, traitements divers, montage, essais. La fabrication nécessite des installations sophistiquées regroupées par technologies, en raison de la très petite taille des séries. Les problèmes de charge imposent souvent un recours régulier à la sous-traitance. Les cycles de fabrication sont longs (de quelques mois à plusieurs années). Les aléas sont nombreux et rendent difficiles la maîtrise des délais autrement qu'en planifiant d'importantes marges d'ordonnancement, ce qui ne va pas dans le sens d'une réduction du cycle global.

Il faut ici noter que ce que nous appelons "systèmes complexes de production" ne se réduit pas à un atelier, même flexible et intégré (type FMS) mais renvoie plutôt à un ensemble d'ateliers de production interdépendants, plus ou moins automatisés, avec des problèmes spécifiques pour lesquels les concepts généraux du type CIM restent à préciser.

On trouve couramment ce type de situation industrielle dans les secteurs de l'électronique, de l'informatique et de l'aérospatial. Ces secteurs se caractérisent aujourd'hui également par un fort développement de la concurrence internationale qui impose une nouvelle rigueur dans la gestion de l'appareil de production, alors qu'auparavant les performances technologiques suffisaient à obtenir des marchés. La maîtrise de la planification en terme de réduction des cycles et de respect des délais représente ainsi un enjeu considérable.

2. Etat des recherches existantes

On peut distinguer deux grandes orientations dans les travaux de recherche pouvant être mobilisés dans ce contexte industriel :

- les modèles et les outils de planification, actuellement existants,
- les recherches sur les modes de structuration et de coordinations internes aux entreprises,

2.1 Les modèles et outils de planification existants :
en matière de planification on peut distinguer trois grandes catégories de modèles :

- **l'ordonnancement d'atelier** avec d'une part des démarches d'optimisation,; mais ne s'appliquant qu'à des problèmes très simples (par exemple une seule machine) et d'autre part des techniques de simulation permettant de tester l'impact des règles de priorités (locales ou globales, statiques ou dynamiques) sur certains critères globaux de performance (retard moyen, cycle moyen, charge moyenne, etc.) En général, le type d'atelier sous-jacent à ces formalisations est un atelier de transformation de type usinage par exemple. Les problèmes d'assemblage soumis à des impératifs de délai n'ont été étudiés que plus récemment et dans une optique limitée à un seul atelier (SCULLI 1987, FAALAND & SCHMITT 1987)
- **la planification des besoins en composants** qui, elle, se place à un niveau plus élevé, celui d'un centre de production par exemple et vise à programmer les achats et les fabrications des différents articles entrant dans la composition du produit fini en fonction du calendrier des besoins concernant l'ensemble des produits finis. La méthode MRP (Material Requirements Planning) est à ce jour la plus utilisée dans les logiciels de planification, mais son articulation aux problèmes d'atelier est encore peu précisée (cf ouvrage CESTA, 1987)
- **la gestion de "projet"** qui s'applique au cas des réalisations unitaires d'équipements complexes pour lesquelles il s'agit de coordonner un nombre important de tâches interdépendantes. La gestion de projet s'apparente à l'ordonnancement par sa prise en compte fine de l'utilisation des ressources, et à la PBC, dans la mesure où elle manipule un planning global.

Chacune de ces vies de recherche a été féconde et a donné lieu à la réalisation de logiciels spécifiques. Cependant, il faut remarquer que les trois modèles sous-jacents sont plutôt indépendants les uns des autres. Ainsi, par exemple, en PBC on raisonne le plus souvent en supposant la capacité des ateliers infinie et sans se préoccuper des ordres de passage des différentes opérations en attente devant une machine. Or dans de nombreuses situations industrielles concrètes et particulièrement dans les "systèmes complexes de production" les trois problèmes se posent simultanément.

2.2 Les recherches sur les comportements organisationnels

Un courant de recherche-interventions, bien représenté notamment dans les travaux du Centre de gestion Scientifique de l'Ecole des Mines de Paris, a permis de mettre en évidence l'interaction entre les outils globaux de coordination et les structures organisationnelles dans la formation des logiques locales observables; ces interactions peuvent être à la source de conflits et de dysfonctionnements. Ainsi des études récentes dans des entreprises utilisant une GPAO ont montré que le pilotage de ces nouveaux instruments était souvent insuffisant (cf. A.HATCHUEL, JC. SARDAS & B. WEIL, 1987) faute d'un investissement humain et organisationnel important : la mise en place de ces outils et leur exploitation n'ont pas été accompagnées d'une reconception adéquate des découpages fonctionnels ou hiérarchiques. De plus, les qualifications nécessaires à leur exploitation et leur suivi ont eu tendance à être sous-estimés.

D'autres travaux plus généraux sur le fonctionnement des organisations ont tenté de cerner les relations existantes entre les modes d'organisations rencontrées dans les entreprises et plusieurs facteurs explicatifs portant notamment sur la technologie (cf. J. WOODWARD, 1965) et la nature de l'environnement (LAWRENCE & LORCH, 1969). Un des objectifs de ces approches a été de proposer des typologies des situations industrielles permettant de définir les structures et les moyens de coordination les plus adaptés à chaque contexte. Cependant cette démarche mérite d'être approfondie pour bien cerner les problèmes posés par les systèmes complexes de production.

Pour notre part, nous avons défini un programme de travail comportant deux volets:

- l'étude des différentes stratégies de planification et d'ordonnancement actuellement utilisées dans les entreprises, dans le cadre d'un groupe d'industriels issus notamment des secteurs de l'électronique et de l'aérospatial.
- la recherche de nouvelles approches en matière de planification des systèmes complexes de production, basée sur des travaux de simulation.

Dans la suite du présent article nous nous limiterons au second volet en présentant la démarche de modélisation et les principaux résultats obtenus jusqu'à présent.

2.DEMARCHE DE MODELISATION: EXPLORATION DES PROBLEMES DE PLANIFICATION PAR SIMULATION

Pour nourrir la réflexion sur des méthodes de planification des productions complexes, une étude par simulation a été lancée. L'essentiel des travaux antérieurs dans ce domaine a porté sur les problèmes d'ordonnancement d'atelier pour des fabrications ne comportant pas de contraintes d'assemblage. L'objectif visé ici est d'étudier le couplage entre la stratégie de planification adoptée pour bâtir un planning théorique des différentes phases de fabrication, comprenant en particulier des opérations de montage, et la politique d'ordonnancement retenue en atelier, qui porte notamment sur la détermination des priorités à l'entrée de chaque poste de charge.

Pour décrire notre démarche nous aborderons successivement les points suivants :

- structure des produits et du système de production simulés
- modélisation de la stratégie de planification
- modélisation de la politique d'ordonnancement
- schéma général des étapes du modèle

2.1 Structure des produits et du système de production simulés

La caractéristique essentielle de la classe des systèmes de production que nous étudions est l'existence de plusieurs niveaux d'assemblage. Plus précisément, nous simulons le fonctionnement d'une entité composée de trois ateliers (de type Job Shop) en cascade qui correspondent chacun à un niveau dans la nomenclature des produits.

Chaque produit aura donc trois niveaux de nomenclature qui correspondent par exemple aux produits finis, aux sous-ensembles et aux pièces élémentaires. Les produits sont générés aléatoirement selon cette structure générale en fonction des paramètres variables suivants:

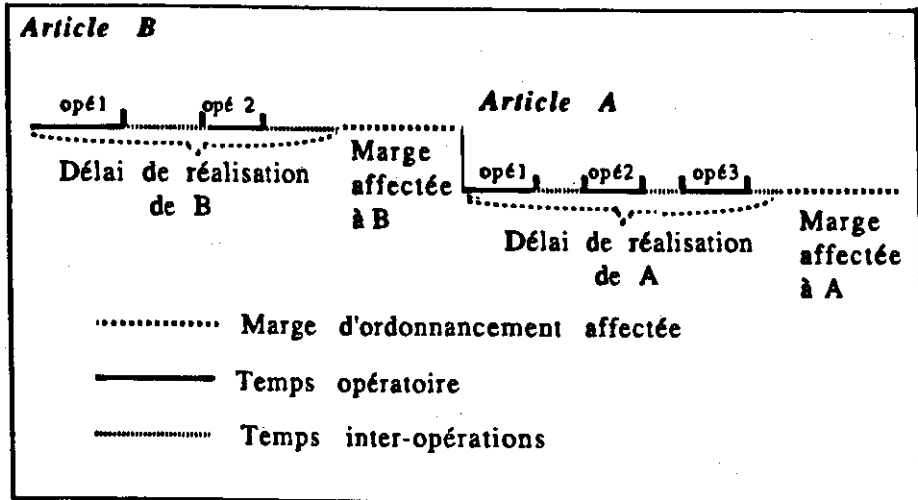
- le nombre de composants par article (ou nombre d'enfants). Dans notre modèle de base, ce nombre d'enfants se répartissait de façon uniforme de 1 à 3. Nous l'avons progressivement augmenté par la suite jusqu'à la plage 3 à 7.
- le nombre d'opérations par article, réparti entre 1 et 4 dans le modèle de base, il a été augmenté par la suite.

Précisons enfin que la cadence d'arrivée des commandes de produits finis (avec des dates théoriques de livraison, compatibles avec les cycles théoriques) et la capacité des ateliers sont ajustées de manière à obtenir une charge équilibrée sur les différentes machines et avoisinant les 80%.

2.2 Modélisation de la stratégie de planification

Les industries ayant à gérer des productions complexes ont en général mis en place des outils informatiques de type MRP. En partant de la logique de base d'un système MRP, nous verrons qu'il est possible en jouant sur la valeur de certains paramètres de choisir une stratégie de planification, mais que cela nécessite une analyse préalable des nomenclatures par des méthodes de type PERT.

SCHEMA 1



Nous partons donc des données techniques telles qu'elles sont formalisées dans un modèle MRP, à savoir : nomenclatures, gammes, postes de charge; et nous allons jouer sur les "temps inter-opérations" alloués et les "marges d'ordonnancement" affectées pour déterminer la stratégie de planification.

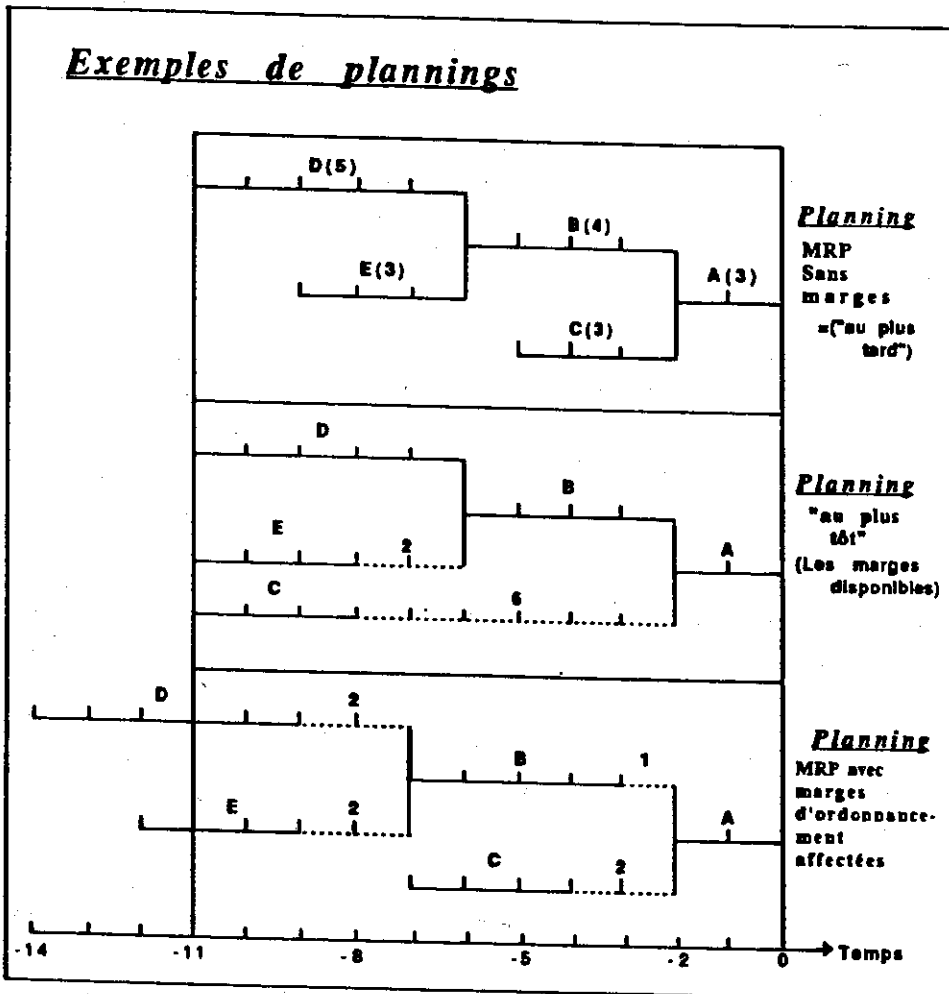
Précisons tout de suite que l'on considère les temps opératoires standards comme donnés, ce qui n'empêche pas que les temps réels soient aléatoires dans la simulation. Le "temps inter-opérations" est lui un temps forfaitaire permettant notamment d'anticiper l'existence de files d'attente à l'entrée des postes de charge. Dans notre modèle simplifié, nous considérons que le délai standard alloué à la réalisation d'un article est simplement la somme des temps opératoires de la gamme de cet article majorée de la somme des temps inter-opérations (un par opération); sachant de plus que la réalisation d'un article peut aussi bien être sa fabrication en interne que son approvisionnement s'il s'agit d'une matière première ou d'un article acheté.

Quant à la marge d'ordonnancement, il s'agit d'un décalage volontaire dans le planning théorique entre la date de fin de la réalisation d'un article et la date de début de l'article de niveau supérieur dans la nomenclature. Une marge d'ordonnancement est donc affectée à chaque article; sachant que le jalonnement des phases de réalisation s'effectue selon la méthode MRP en remontant le temps à partir de la date de fin prévue pour le produit fini.

Pour illustrer les différentes notions qui viennent d'être introduites on peut se reporter au schéma n°1 ci-après :

Le second paramètre de commande est constitué de la façon d'attribuer une marge d'ordonnancement à chaque article. Pour formaliser ce levier stratégique de la planification, il convient d'utiliser la méthode PERT qui nous permettra de calculer les marges disponibles avant toute décision de répartition ou de majoration de ces marges disponibles.

Pour fixer les idées, nous présentons ci-dessous (cf. encart n°1) l'analyse d'une nomenclature d'un produit A, comportant les articles B, C, D et E dont les délais de réalisation sont connus et indiqués entre parenthèses sur les schémas temporels.



Le planning n°1 est le planning MRP classique, sans affectation des marges d'ordonnement, nous le désignerons par "planning au plus tard".

Le planning n°2 est le résultat d'une analyse PERT qui fait apparaître d'une part le chemin critique DBE sur lequel il n'existe aucune marge disponible et d'autre part les marges locales disponibles (en pointillés) quand chaque article est positionné au plus tôt, sachant que la durée globale de réalisation est la même que celle du "planning au plus tard", à savoir 11 unités de temps sur notre exemple.

Enfin le planning n°3 est le résultat d'une politique d'affectation de marges d'ordonnement; sur notre exemple on peut faire les deux remarques suivantes :

- on s'est permis des marges d'ordonnement sur le chemin critique et on a donc allongé la durée globale de réalisation (de 3 unités sur l'exemple)
- en dehors du chemin critique les marges affectées (2 unités sur E et sur C) auraient pu être plus importantes sans pour autant avoir d'incidence sur le cycle global.

Si ce planning n°3, figuré sur le schéma, peut être considéré comme réaliste au vu des pratiques actuelles; on se doute qu'il doit être possible de raccourcir le cycle global, tout simplement en évitant de mettre des marges d'ordonnement sur ce chemin critique ainsi que les chemins sous-critiques dont la longueur est proche du cycle maximal.

Quand on est en dehors du ou des chemins critiques, l'idéal paraît être d'attribuer la totalité des marges disponibles afin de maximiser les chances de respect du planning; à la réserve près que cette anticipation aura intérêt à être bornée pour tenir compte des modifications techniques et éviter de trop gonfler les encours de production.

Dans notre simulation, la première étape consiste à déterminer les marges disponibles en analysant les nomenclatures puis à calculer les marges d'ordonnement affectées en fonction de quelques paramètres stratégiques :

- affectation ou non de marges sur le chemin critique, et si oui, répartition de cette marge ou accumulation sur l'article

de tête;

- affectation ou non des marges en dehors du chemin critique et si oui, valeur de la borne fixée à ces marges.

Signalons enfin que malgré la simplicité théorique de cette démarche d'analyse préalable des nomenclatures, celles-ci ne semble guère avoir été utilisée jusqu'à présent par les praticiens dans doute en raison du manque d'outil informatique permettant de mener ce type d'analyse de manière commode directement sur la base de données techniques de la GPAO. Le resserrement actuel des contraintes en matière de délai devrait sans doute inciter les responsables de la gestion de production à développer ces nouvelles démarches pour accompagner et éclairer les politiques de réduction des cycles.

2.3 Modélisation de la politique d'ordonnancement

Après l'établissement du planning théorique qui relève des paragraphes précédents, le déroulement des opérations de production est simulée de manière classique en formalisant les règles de gestion des files d'attente à l'entrée des postes de charge. Mais auparavant, la "procédure de lancement" doit être spécifiée.

2.3.1 Choix de la procédure de lancement

Pour caractériser le lancement en atelier, nous avons simplement retenu l'alternative suivante : autorisation ou non de démarrer en avance par rapport au planning théorique de réalisation des articles; ceci concerne donc la première opération de la gamme, excepté pour les articles du dernier niveau.

En théorie, il est toujours préférable de lancer les fabrications intermédiaires dès que possible pour profiter ainsi des sous-charges passagères de certaines machines. Dans la pratique, les procédures de lancement prévoient rarement cette possibilité dans les cas où l'on trouve de l'assemblage, c'est à dire la nécessité de compléter une liste de composants avant de démarrer une fabrication.

Signalons par ailleurs que pour le moment, la possibilité de passer en sous-traitance n'a pas été simulée.

Les résultats présentés au chapitre 3 correspondent à la procédure classique de lancement, c'est-à-dire à l'interdiction des démarrages

anticipés par rapport au planning théorique.

2.3.2 Gestion des files d'attente

L'existence d'une stratégie de planification conduit à distinguer deux types de règles suivant la nature de la liaison avec le planning théorique :

a. règles indépendantes du planning :

- * SPT (Shortest Processing Time First) : classement par temps opératoire croissant
- * PRODUIT : priorité constante suivant les classes de produit

b. règles dépendantes du planning

b.1 règles à l'opération

-FIN OPERATION : classement par date théorique de fin d'opération croissante

-DEBUT D'OPERATION : date théorique de début d'opération

b.2 règles à l'article

FIN ARTICLE : date théorique de fin de l'article

FIN PARENT : date théorique de fin de l'article parent

FIN PRODUIT : date théorique de fin de l'article de tête

b.3 règles liées aux marges

-MGRD : Marge globale Restante au Début (somme des marges d'ordonnancement affectées moins retard pris au démarrage de l'opération considérée)

-MGRF : Marge Globale Restant à la Fin (idem à la précédente en calculant le retard par rapport à la date de fin théorique).

L'encart n°2 fournit le détail de la définition de ces deux règles sur un exemple :

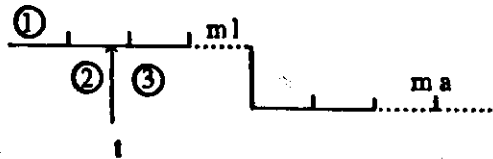
-MRT : Marge Restante Totale; par rapport aux définitions précédentes on ajoute les temps inter-opérations aux marges d'ordonnancement.

A propos de ces trois dernières règles, signalons qu'elles correspondent à une généralisation du concept classique de "slack" au cas des fabrications à assemblage.

Encart n°2

PRIORITE DYNAMIQUE LIEE A LA MARGE

→ **MGRD** : Marge Globale Restante par rapport au Début d'opération



MG : Marge Globale théorique = Marge Locale ml
+ Marge Amont ma

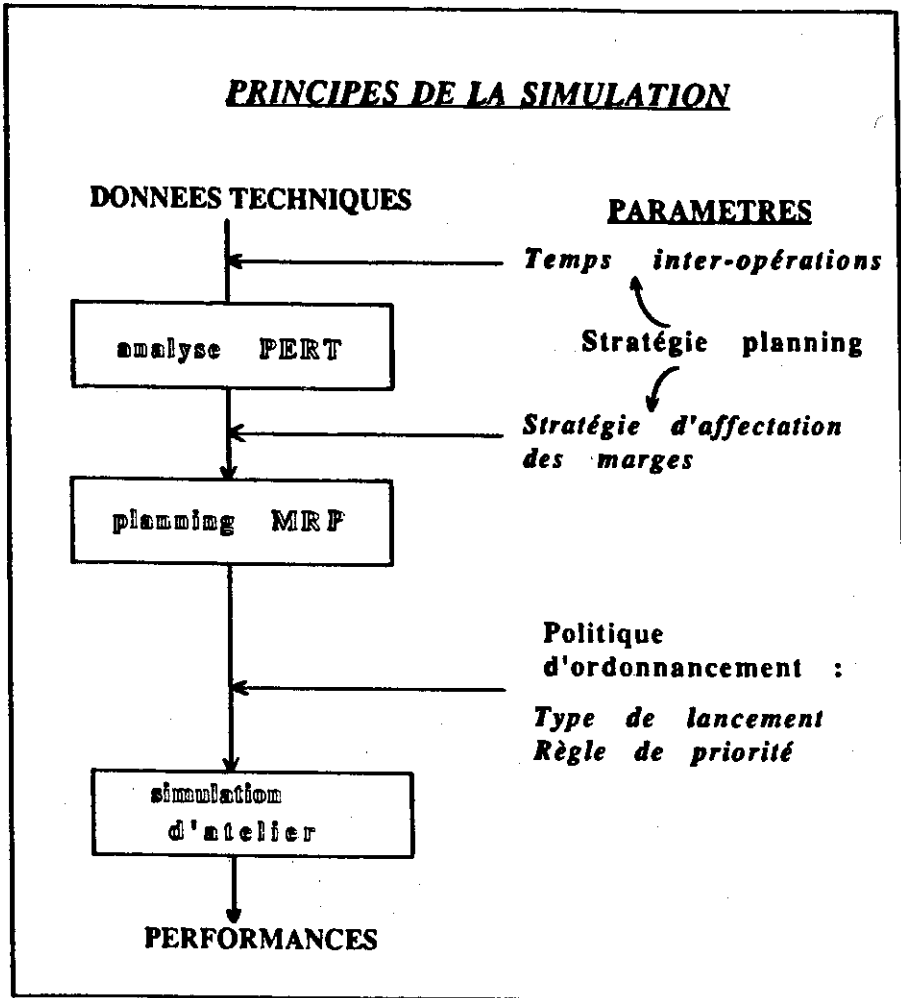
MGRD : Marge Globale Restante à l'opération n°2 à t, opération n°2 non débutée

⇒ **MGRD = MG - (t - Début théorique opé n°2)**

→ **MGRF** : Idem par rapport à Fin théorique

MGRF = MG - (t - Fin théorique opé n°2)

Encart n°3



2.4 Schéma général des étapes du modèle

L'encart n°3 reprend les étapes de notre modèle et les points d'intervention des différents paramètres de commande.

2.5 L'évaluation des performances.

En sortie du module de simulation, plusieurs critères de performances sont calculés. On peut ainsi tester chaque couple stratégie de planification et politique d'ordonnancement. On peut notamment citer les deux catégories suivantes :

2.5.1 critères de cycle

- CYCLE REEL : moyenne des cycles réels observés
- ECART TYPE : écart type correspondant

2.5.2 critères de retard

- % retard : proportion de produits en retard
- % (RETARD 20%): retard supérieur à 20% du cycle théorique.

3. Premiers résultats obtenus

Notre programme de travail n'est pas encore achevé, mais il est déjà possible de dégager quelques résultats substantiels des nombreuses simulations réalisées. De manière cohérente avec nos hypothèses de départ, ces résultats concernent l'interaction entre stratégie de planification et règle d'ordonnancement, et ils seront regroupés selon les points suivants :

1. la nécessité de raisonner sur des courbes de performances
2. la supériorité des règles de priorités associées au planning pour gérer les productions complexes
3. l'intérêt d'une stratégie au plus tôt : le gain dépend de la règle de priorité
4. la dominance de la règle basée sur les marges
5. conclusion : des gains potentiels importants dans la gestion des productions complexes

3.1. La nécessité de raisonner sur des courbes de performances

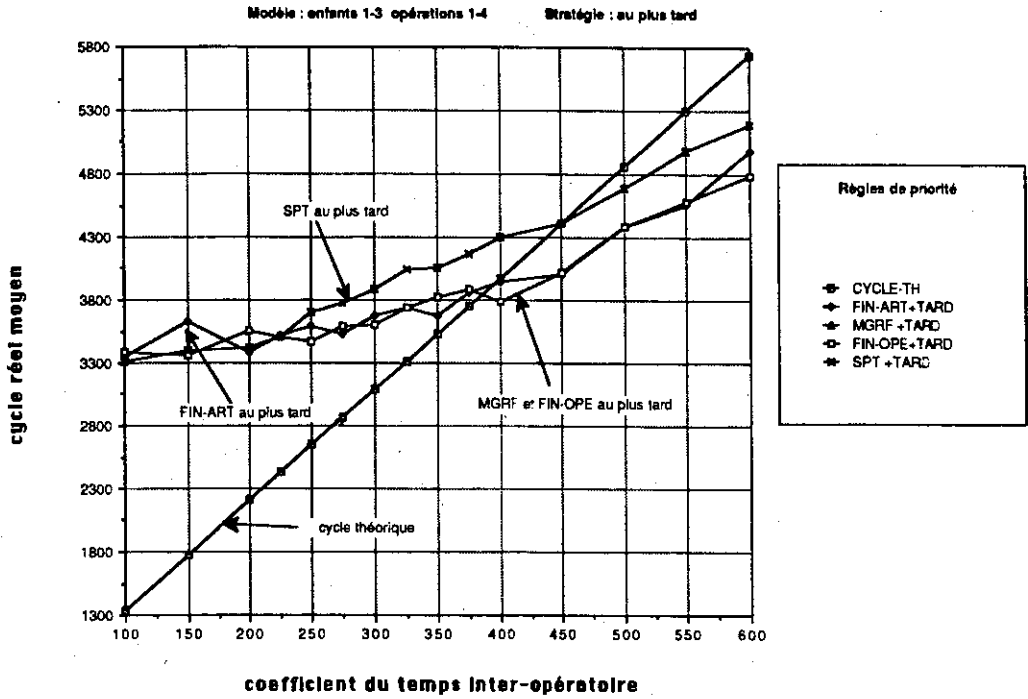
Au départ de nos travaux et suivant en cela beaucoup d'articles de la littérature, nous nous efforçons de comparer entre elles les performances obtenues par différents couples stratégie-règle, une fois la structure des produits et des ateliers fixée. Mais les classements ainsi obtenus étaient parfois surprenants et difficiles à interpréter. Il nous est apparu par la suite qu'il était nécessaire de simuler le comportement d'un couple stratégie-règle pour différentes valeurs du temps inter-opérateur (TIO) et de considérer pour chaque critère de performance l'ensemble de la courbe ainsi produite.

Illustrons ceci en considérons le graphique G1.1 qui nous permet de comparer le cycle réel moyen observé pour la stratégie "au plus tard" en fonction de la règle de priorité choisie. On compare ici trois règles : SPT (Shorter Processing Time first), FIN ARTICLE correspondant à EDD (Earliest Due Date) dans la littérature anglo-saxonne et FIN OPERATION.

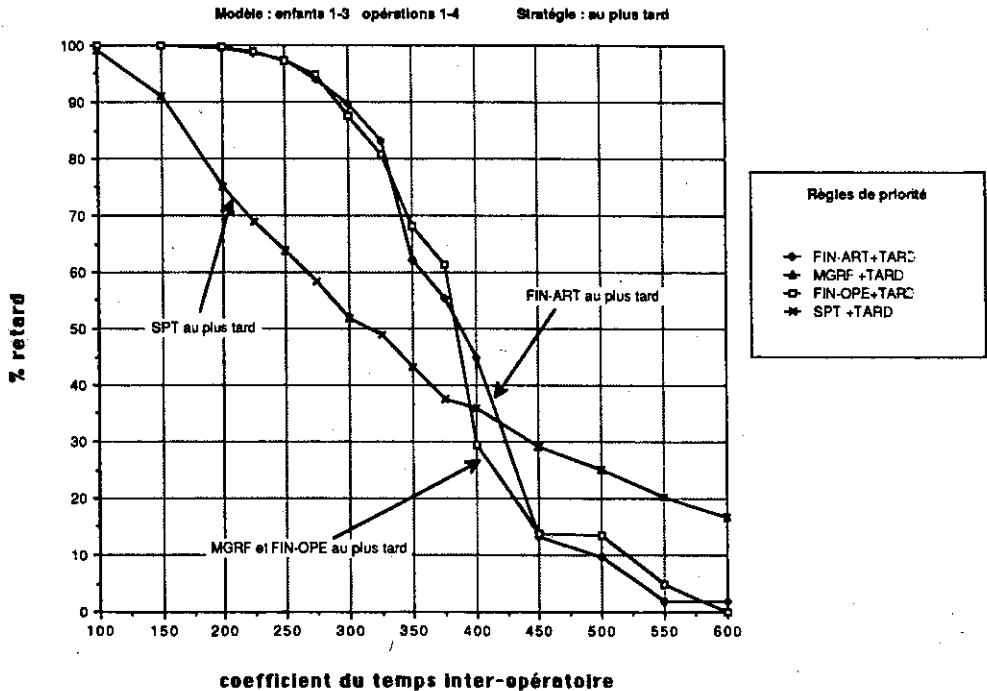
Le cycle théorique moyen est également représenté, on voit ainsi l'effet de la variation du temps inter-opérateur qui revient comme on l'a dit plus haut, à accorder des délais plus ou moins larges dans le planning initial théorique; et on peut d'autre part mesurer visuellement l'écart entre cycle théorique et cycle réel.

La remarque qui s'impose à l'examen du graphique G1.1 est la non

G1.1: cycle réel moyen



G1.2: % retard



stabilité du classement des performances en matière de cycle réel pour les trois règles considérées. On comprend donc bien les risques d'erreur d'interprétation encourus quand on raisonne pour un temps interopératoire donné, c'est-à-dire sur un point de chaque courbe au lieu de prendre en compte la totalité des trois courbes.

Ensuite il faut noter qu'à partir d'un seuil de TIO de 250, la règle SPT apparaît nettement moins bonne en cycle que les règles FIN-ART et FIN-OPE qui ont en commun la particularité de gérer les priorités en fonction du planning théorique; ces deux dernières règles ayant de plus des performances très semblables.

Enfin on peut remarquer la croissance globale du cycle réel en fonction du TIO alloué. Ceci est un résultat prévisible pour une planification de type MRP; le point important étant que les lancements d'articles ne peuvent s'effectuer avant les dates théoriques de lancement et qu'ainsi les éventuelles avances à des stades intermédiaires sont en quelque sorte gaspillées.

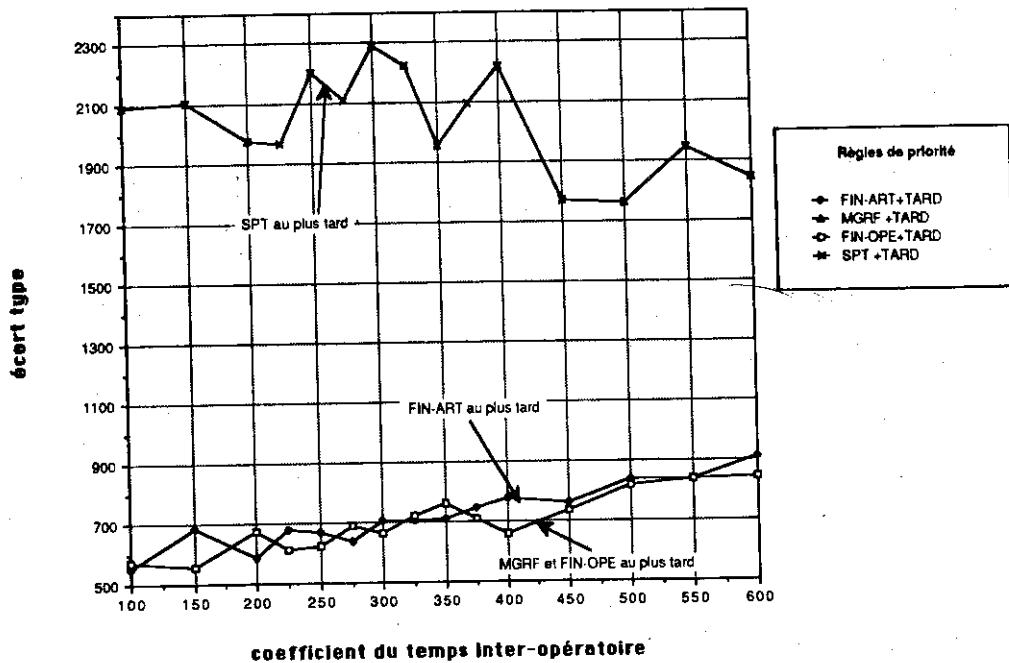
Ceci dit, les courbes du graphique G1.1 nous permettent de préciser que la croissance du cycle réel n'apparaît qu'à partir d'un certain seuil de TIO (ici 250); ce qui signifie qu'en deçà de ce seuil la plupart des articles sont en retard au démarrage du fait des composants manquants et que l'existence de dates de lancements théoriques ne provoque alors aucune attente.

Passons maintenant à la courbe G1.2 qui nous fournit un second critère de performance, le pourcentage de produits en retard. On observe aussi des inversions de classement des règles suivant les valeurs du TIO; mais contrairement au cycle réel pour lequel les résultats étaient toujours voisins d'une règle à l'autre, les trois règles obtiennent des performances très différentes. La nécessité de considérer les courbes dans leur ensemble apparaît donc encore plus fortement.

Tout ceci montre que l'évaluation des performances associées à une règle n'a pas de sens si on ne précise pas la stratégie de planning retenue et que cette stratégie contient bien au moins deux grands paramètres de définition : le principe de positionnement relatif dans le temps (au plus tôt, au plus tard ou intermédiaires) des différentes opérations et la plus ou moins bonne évaluation des temps de

G1.3: écart type

Modèle: enfants 1-3 opérations 1-4 Stratégie : au plus tard



réalisation réels que nous avons formalisée par le biais du temps intermédiaire.

Cette nécessité de tenir compte en permanence de l'interaction entre le planning et les règles de priorité étant acquise, quelle est la signification de ces inversions de classement en matière de retard ? Le phénomène pourrait en effet paraître surprenant : on aurait pu s'attendre à trouver que les règles tenant compte du planning (FIN-ART et FIN-OPE) étaient toujours meilleures qu'une règle telle que SPT qui ignore le planning et fait abstraction des contraintes d'assemblage.

Pour expliquer ce phénomène on peut avancer l'interprétation globale suivante : quand le planning est irréaliste, il vaut mieux l'ignorer. En effet, une valeur trop basse du TIO (inférieur à 250) correspond à un planning trop serré donc difficile voire impossible à suivre (l'écart entre cycle théorique et cycle réel peut se lire sur le graphique G1.1, il est d'au moins 50% du cycle théorique en dessous du seuil de TIO de 250)

On peut aussi reformuler cette interprétation de manière plus analytique : quand le planning est trop serré, tous les produits risquent d'être en retard (retard = 100%) surtout si l'on maintient l'ordre initial proposé par le planning. La règle SPT favorisera de manière arbitraire les produits comportant des temps opératoires courts et permettra à une part d'entre eux de sortir à l'heure. La contrepartie évidente de ce favoritisme est que la dispersion du cycle sera plus importante pour SPT par rapport aux deux autres règles. C'est exactement ce que l'on retrouve en traçant les courbes d'écart-type correspondantes (cf G1.3) : pour SPT l'écart type du cycle moyen est plus de deux fois supérieur à celui obtenu pour les deux autres règles.

Ainsi, le conseil d'ignorer un planning irréaliste n'est valable ici que si l'on s'attache au pourcentage de retard. De plus, nous allons voir maintenant que ce conseil n'est plus valable dès qu'un certain niveau de complexité des produits est atteint.

3.2. La supériorité des règles de priorités associées au planning pour gérer les productions complexes

Les résultats précédents étaient relatifs à un modèle de base de notre simulation, pouvant se caractériser par les traits suivants :

- trois niveaux de nomenclatures
- à chaque niveau un nombre de composants (nombre d'enfants) par article compris aléatoirement entre 1 et 3.
- pour chaque article une gamme comprenant 1 à 4 opérations

Pour tester l'impact de la complexité de la structure des produits, nous avons fait croître progressivement le nombre moyen d'enfants ainsi que le nombre moyen d'opérations. Sans donner ici les résultats intermédiaires, nous examinerons les performances d'un modèle comprenant trois niveaux de nomenclatures, un nombre d'enfants compris entre 23 et 7 et un nombre d'opérations entre 1 et 8.

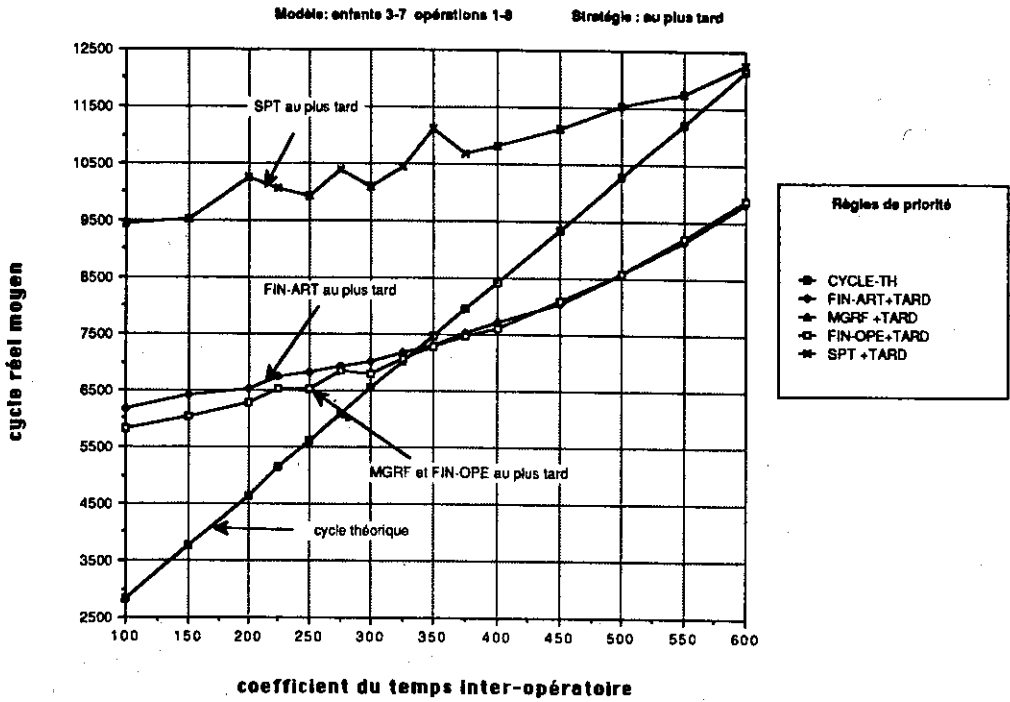
Reprenons l'examen des équivalents aux trois graphiques précédents pour le nouveau modèle.

Les courbes de cycles réels moyens (graphique G2.1) font maintenant apparaître une infériorité nette de la performance de la règle SPT et par rapport à celle des deux règles (FIN-ART et FIN-OPE) liées au planning. Ceci se confirme vis-à-vis du pourcentage de retard (graphique G2.2) ainsi qu'au niveau de la dispersion (graphique G2.3); l'écart type du cycle est maintenant quatre fois plus grand pour SPT.

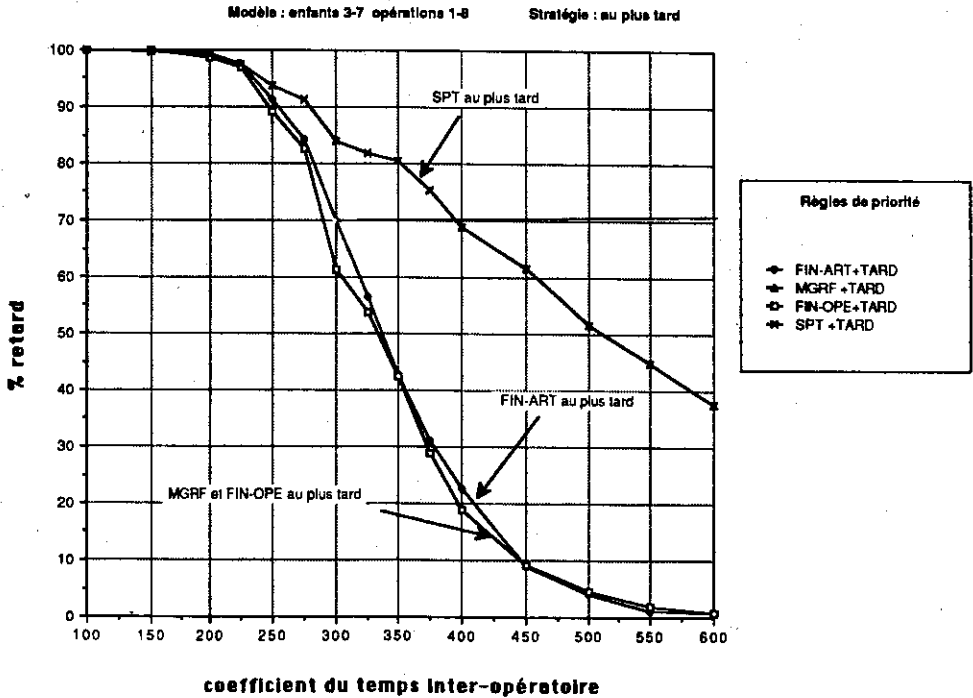
Sur le graphique G2.2 on voit maintenant que SPT est toujours moins performante et ce, quelque soit le temps inter-opérateur alloué. Le phénomène d'inversion constaté pour un modèle de produits moins complexes a donc disparu. Il est donc toujours préférable de tenir compte du planning même si ce dernier est trop serré, dès qu'un certain niveau de complexité des produits est atteint.

L'examen des résultats intermédiaires, non reproduits ici, nous enseigne que c'est l'accroissement du nombre d'enfants (passé de 1-3 à 3-7) qui a provoqué cette stabilité de la supériorité des règles basées sur le planning.

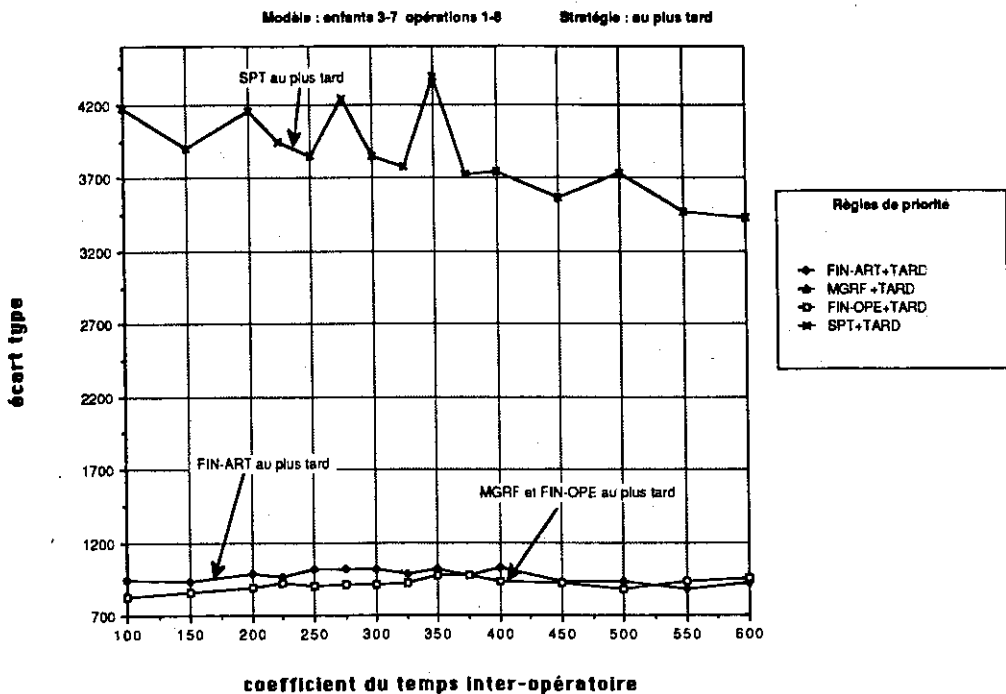
G2.1 : cycle réel moyen



G2.2 : % retard



G2.3 : écart type



3.3. l'intérêt d'une stratégie au plus tôt : le gain dépend de la règle de priorité

Jusqu'à présent, nous nous sommes contentés de comparer différentes règles en faisant varier le TIO mais en conservant une stratégie de planification au plus tard, qui correspond à la logique de base d'un système MRP. Nous testerons maintenant l'intérêt d'adopter une planification au plus tôt (cf.2.2) qui consiste, sans allonger le délai théorique global, à utiliser toutes les marges disponibles sous la forme de marges d'ordonnancement allouées.

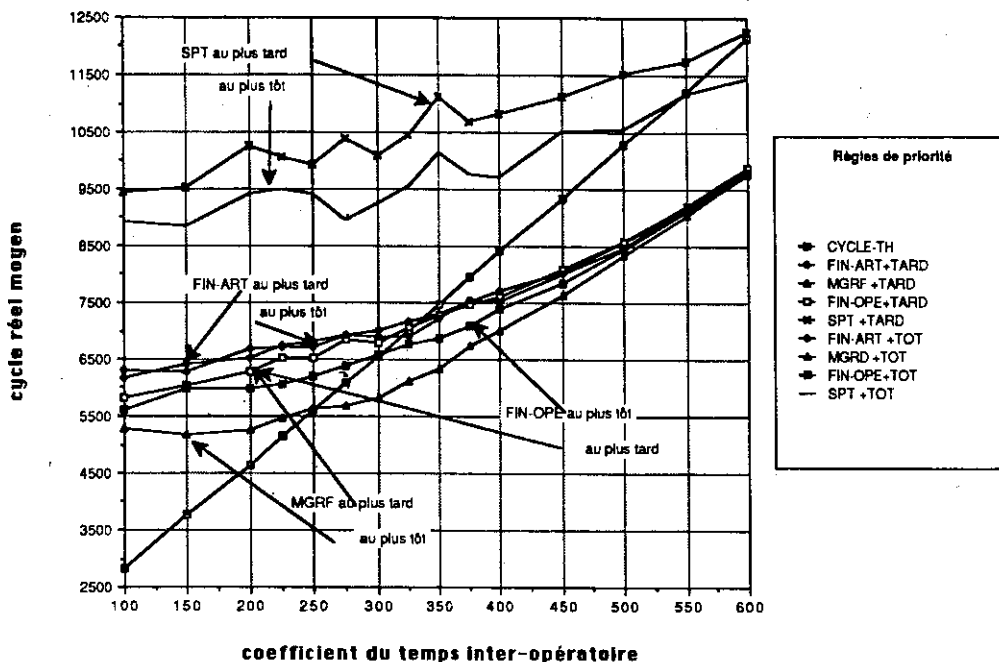
Le fait d'anticiper au maximum le lancement des articles ne figurant pas sur le chemin critique devrait en principe améliorer les performances obtenues par rapport aux planning au plus tard. Nous allons voir que cette amélioration n'est pas toujours évidente et que son ampleur dépend de la règle de priorité adoptée.

En effet, l'examen des graphiques de cycles (G3.1) et de retard (G3.2) appelle les remarques suivantes :

- pour les différentes règles de priorité la performance est meilleure pour la stratégie au plus tôt par rapport à celle au plus tard, à l'exception de la règle FIN-ART pour laquelle les courbes de performances (en cycle et en retard) sont complètement enchevêtrées.
- concernant les trois autres règles le gain de performance est plus important pour SPT et MGRF que pour FIN-OPE.
- le résultat le plus remarquable est obtenu pour la règle MGRF avec la stratégie au plus tôt; en particulier le taux de retard tombe en dessous de 50% dès le seuil de TIO de 250 et en dessous de 10% pour un seuil de TIO de 300; alors que pour ce dernier seuil tous les autres couples stratégie-règle ont encore une proportion de retard supérieure à 50%

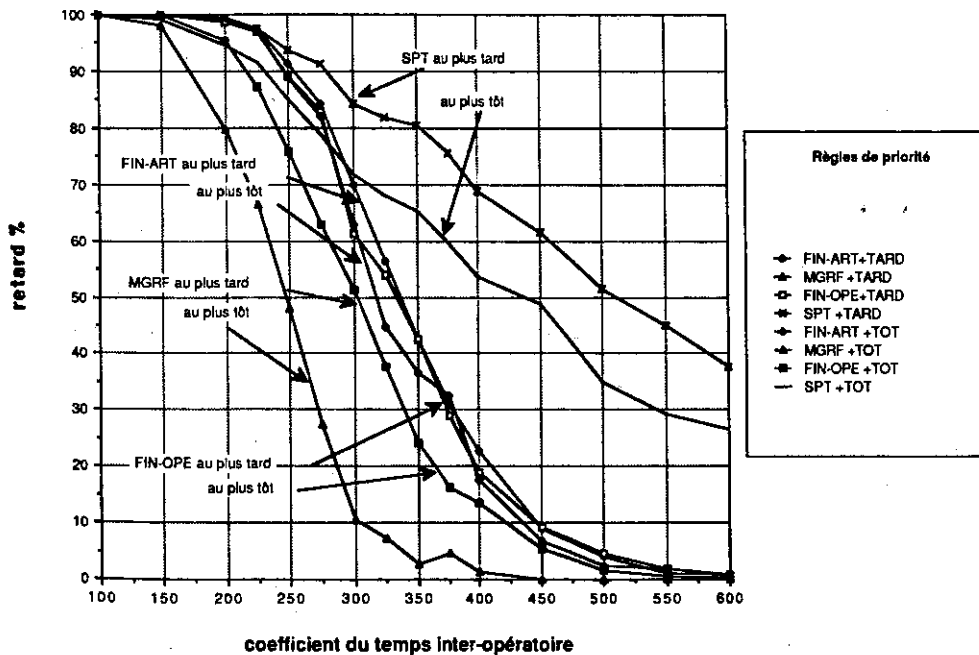
G3.1 : cycle réel moyen

Modèle : enfants 3-7 opérations 1-8 Stratégies : au plus tôt et au plus tard



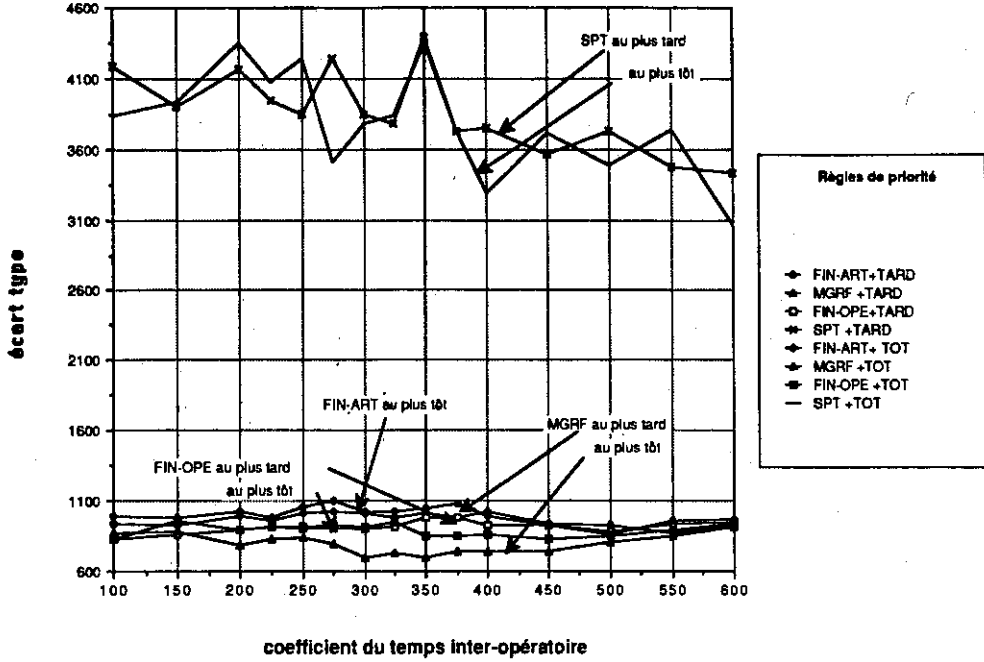
G3.2 : retard %

Modèle : enfants 3-7 opérations 1-8 Stratégies : au plus tôt et au plus tard



G3.3 : écart type

Modèle: enfants 3-7 opérations 1-8 Stratégies : au plus tôt et au plus tard



3.4. La dominance de la règle basée sur les marges

Au total, parmi les règles liées au planning dont on a vu qu'elles étaient préférables dès qu'un certain niveau de complexité des produits était atteint, c'est la règle MGRF qui apparait la meilleure quelle que soit la stratégie adoptée. De plus, c'est cette règle qui tire le meilleur profit des marges supplémentaires allouées hors du chemin critique dans la stratégie au plus tôt.

L'interprétation de ce phénomène paraît simple : la règle MGRF a été justement conçue pour gérer de manière dynamique les marges restantes sur chaque branche de l'arborescence; elle favorise donc la coordination nécessaire entre les différents articles et est également efficace en cas d'avance ou de retard par rapport au planning théorique.

A l'inverse, les règles telles que FIN-OPE et FIN-ART ne tiennent pas compte du fait que certaines dates théoriques de fin d'opération ou de fin d'article ont été décalées suite à l'introduction de marge d'ordonnancement; en particulier ces règles n'arbitrent pas correctement entre les opérations se trouvant sur le chemin critique et les autres.

C'est pourquoi les marges allouées dans la stratégie au plus tôt provoquent en partie des erreurs d'arbitrage vis-à-vis de l'exigence de coordination, qui viennent réduire nettement le gain potentiel de performances.

3.5. Conclusion : des gains potentiels importants dans la gestion des productions complexes

Les pratiques actuelles dans le monde industriel, consistent en général à une planification de type MRP (c'est à dire à un planning "au plus tard") et des règles de priorité en atelier du type FIN-ART. Aussi les résultats de nos simulations mettent en évidence l'intérêt de faire évoluer la stratégie de planification vers une stratégie au plus tôt et utiliser conjointement une règle de priorité basée sur la marge globale restante qui permet de tirer le meilleur parti d'un planning au plus tôt.

Sur notre modèle qui représente un niveau de complexité très bas par rapport aux situations réelles, l'ordre de grandeur des gains potentiels est de 20% sur le cycle; et en matière de taux de retard les progrès apparaissent considérables et ce pour une plage assez large de temps inter-opérations : une diminution de 20% à près de 100% du TIO compris entre 200 et 450.

Ces résultats laissent donc espérer qu'une mise en oeuvre de cette nouvelle méthode de planification serait fructueuse. Notons cependant qu'à côté de la plus grande complexité structurelle des situations industrielles réelles par rapport au modèle simulé, qui aurait tendance à conforter notre thèse, d'autres aspects mériteraient d'être analysés avant de conclure :

- l'incidence de l'existence de stocks d'articles intermédiaires.
- l'impact des aléas tels que pannes machines et retards fournisseurs que nous n'avons pas simulé
- la nécessité éventuelle de replanifier en cas de retard important sur un branche de la nomenclature
- l'effet de l'existence de circuits en sous-traitance
- enfin, l'impact financier en terme d'accroissement d'encours lié à une planification au plus tôt. Sur ce dernier point, il faut cependant remarquer que cet accroissement d'encours serait compensé par un raccourcissement global des cycles obtenus grâce à un couple performant stratégie de planning-règle de priorité

Il convient donc de rester prudent sur les conclusions à tirer de ces simulations d'autant que les analyses PERT que nous préconisons ne sont pas nécessairement évidentes à mettre en oeuvre sur des bases de données techniques importantes en volume et comportant de nombreux articles communs.

Au total, il nous semble cependant que ces travaux ont au moins le mérite de formuler de façon nouvelle la question de l'efficacité des méthodes de planification pour les productions complexes et ouvrent la

voie à des tentatives d'élaboration de nouveaux instruments ou d'adaptation des outils actuels dans le domaine de la gestion de production. En particulier, la réalisation d'analyses à priori de type PERT, même sur un mode simplifié, apporterait concrètement une aide à la décision en matière de paramétrage des données techniques.

