

N° d'ordre : 1517

# THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

en

PRODUCTIQUE,  
AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

par

Rousseau TAWEGOUM  
Ingénieur ICAM



**CONTROLE TEMPS REEL DU DEROULEMENT DES  
OPERATIONS DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLES**

Soutenu le 25 Avril 1995 devant la commission d'examen :

M. P. BAPTISTE	Rapporteur
M. C. PROUST	Rapporteur
M. J.C. GENTINA	Examineur, Directeur de Thèse
M. E. CASTELAIN	Examineur, Directeur de travail
M. J.P. BOUREY	Examineur, Président du jury
M. J.P. CASSAR	Examineur

Cette thèse a été préparée au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille,

S.U. LILLE 1

A - CNRS D 1440, Ecole Centrale de Lille.



**A ma feuè mère Bibiane MBETEU,  
qui nous a quitté il y a trois ans  
et trois semaines.**

# REMERCIEMENTS

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL) à l'Ecole Centrale de Lille (EC Lille) sous la direction scientifique de Monsieur le Professeur J.C. GENTINA, Directeur de l'EC Lille. Je tiens à le remercier vivement pour son accueil ainsi que pour la confiance et les précieux conseils dont j'ai bénéficié tout au long de ce travail.*

*Je suis très reconnaissant à :*

- Monsieur P. BAPTISTE, Professeur à l'Université de Besançon (Ecole Nationale Supérieure de Micro-Mécanique), et membre du Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB),*
- Monsieur C. PROUST, Professeur à l'Université de Tours (Ecole des Ingénieurs en Informatique pour l'Industrie), et membre du Laboratoire d'Informatique de Tours (LIT),*

*pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce travail et d'être les rapporteurs de cette thèse.*

*Je suis flatté de la présence à ce jury de Monsieur J.P. BOUREY, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, qui a accepté d'être examinateur et président de ce jury.*

*Je tiens également à remercier :*

- Monsieur J.P. CASSAR, Maître de Conférences, Habilité à Diriger les Recherches à l'Université de Lille I,*
- Monsieur E. CASTELAIN, Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Lille,*

*pour l'honneur qu'ils me font en examinant ce travail et en acceptant de participer à mon jury de Thèse.*

*Qu'il me soit permis de remercier tous les membres du LAIL. Je voudrais adresser une pensée particulière à mes camarades de bureau, Messieurs B. HUVENOIT, A. FARAH, L. KERMAD et J.P. MAIK pour leur bonne humeur, leurs conseils, leur esprit d'équipe et qui ont contribué directement ou indirectement à l'aboutissement de ces travaux.*

*Je tiens, à ce sujet, à remercier tout particulièrement Monsieur E. CASTELAIN pour sa disponibilité. Il a su me faire profiter de son expérience à travers nos nombreuses discussions.*

*Je remercie aussi mes frères et soeurs, oncles et tantes, neveux et nièces, cousins et cousines et surtout grand-mère Jeanne, pour le soutien permanent qu'ils ont toujours manifesté à*

*mon égard. Une pensée très particulière à Adrien mon fils et Jacqueline mon épouse, pour leur patience et leur compréhension.*

*Enfin, je remercie très sincèrement Monsieur M. VANGREVENINGE pour la reprographie de ce mémoire.*

## Notations Utilisées

- $O_{i,j}^k$  : opération  $i$  du produit  $j$  sur la machine  $k$ .
- $r_{i,j}^k$  : date de début au plus tôt de  $O_{i,j}$  sur la machine  $k$ .
- $t_{i,j}^k$  : date de début d'exécution sur machine  $k$ .
- $p_{i,j}^k$  : durée d'exécution de  $O_{i,j}$  sur  $k$ .
- $m_{i,j}^k$  : marge de l'opération  $O_{i,j}$  sur la machine  $k$ .
- $d_{i,j}^k$  : date de fin d'exécution  $O_{i,j}$  sur la machine  $k$ .
- $D_{i,j}^k$  : date de fin au plus tard  $O_{i,j}$  sur la machine  $k$ .
- $\text{transf}_{i,j}^{k,l}$  : durée de transfert du produit  $j$  depuis la ressource  $k$  vers la ressource  $l$ , après que l'opération  $O_{i,j}$  soit faite.
- $G^k$  : groupe d'opérations à exécuter par la ressource  $k$ .
- $I$  : horizon de production.
- $I_i$  : intervalle de lancement.
- $F_j^1$  : fonction du type 1 sur le produit  $j$ .
- $F_j^2$  : fonction du type 2 sur le produit  $j$ .
- $r_{i,j}(t)$  : date d'exécution au plus tôt de la prochaine opération de transformation d'état.
- $\theta_{i,j}(t)$  : date d'achèvement au plus tôt de l'opération  $O_{i,j}$ , à l'instant  $t$ .
- $G_q^k$  :  $q$  ième groupe d'opérations à exécuter sur la machine  $k$ .
- $\Gamma_n$  : ensemble des successeurs du sommet  $n$ .
- $\pi(n)$  : longueur du plus court chemin de 1 à  $n$ .
- $C_q$  :  $q$  ième chemin (vecteur contenant la liste des sommets correspondant au plus court chemin).
- $l_{m,n}$  : durée de transfert entre les sommets  $m$  et  $n$ .
- $A_m(t)$  : variable indiquant le temps d'attente en un sommet  $m$  du graphe.
- $t_n = h_{m,n}(t_m)$  : date d'arrivée en tête de file de la ressource  $n$  lorsqu'on part de la ressource  $m$  à  $t_m$ .
- $A^-$  : temps de séjour des produits ayant quitté  $m$  après la mise à jour précédente.
- $A^+$  : temps de séjour (durée d'attente des palettes) des produits arrivés en  $n$  (dans la file de  $n$ ) après la mise à jour précédente.

- $MS(G^k)$  : Marge de Séquence d'opérations à exécuter par la ressource  $k$ .
- $D_{u,v}(w)$  : date de fin de l'opération  $O_{u,v}$  de rang  $w$  dans la séquence.
- $MA(O_{i,j})$  : Marge d'Absorption de l'opération à engager.
- $f(n)$  : fonction d'évaluation pour le réordonnancement des opérations.
- $g(n)$  : coût minimal du chemin du noeud racine au noeud  $n$  dans l'espace d'état.
- $h(n)$  : coût estimé du chemin (de coût minimal  $h^*(n)$ ) du noeud  $n$  au noeud but.
- $Disp_{t_0}^l$  : Disponibilité de la machine  $l$  à l'instant  $t$ .

# SOMMAIRE

Notations Utilisées .....	5
INTRODUCTION .....	9
CHAPITRE I : <i>Problématique de la décision et du pilotage dans les systèmes de production flexibles</i> .....	15
CHAPITRE II : <i>Analyse des perturbations et organisation des centres de décision.</i> .....	59
CHAPITRE III : <i>Contrôle dynamique de l'évolution des opérations : réaction aux aléas</i> .....	103
CONCLUSION .....	165
BIBLIOGRAPHIE .....	169
ANNEXES .....	191
LISTE DES FIGURES .....	203
SOMMAIRE DETAILLE .....	205



# **INTRODUCTION**



Il y a une vingtaine d'années l'augmentation de la productivité a été un enjeu essentiel qui a déclenché une série d'innovations technologiques liées à l'automatisation des processus de production. La nécessité est apparue de concevoir des machines polyvalentes et des architectures de commande rapidement reconfigurables. C'est dans ce contexte qu'apparaît le concept d'ateliers flexibles. Les investissements induits aussi bien en matériel qu'en formation du personnel et en maintenance sont tels que leur polyvalence doit être exploitée au mieux.

La conception de ces ateliers soulève des problèmes techniques très complexes. En effet, sont apparues avec l'étude de ces ateliers, deux notions mal maîtrisées tant au niveau méthodologie de conception qu'au niveau technologie de réalisation. Ainsi de nombreux laboratoires de recherches travaillent sur l'élaboration de méthodes de conception et de commande de ces ateliers.

L'objectif de l'équipe SED (Systèmes à Evénements Discrets) du LAIL (Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle de Lille) est de contribuer au développement d'une méthode globale qui fournit une assistance dans le cadre de la conception des systèmes de production flexibles depuis la spécification jusqu'à l'implantation. Ce projet intitulé CASPAIM (Conception Assistée des Systèmes de Production Automatisés dans l'Industrie Manufacturière) s'inscrit dans la gestion complète du cycle de vie d'un automatisme, à savoir conception, validation, exploitation et maintenance. Les travaux développés dans ce cadre ont nécessité une approche de type génie automatique [Morel et al 88], approche elle même inspirée des concepts du génie logiciel.

Les systèmes de production que nous allons considérer sont ceux produisant de petites et moyennes séries. Ces systèmes sont caractérisés par trois niveaux de flexibilité : la flexibilité au niveau produit, la flexibilité au niveau transport et la flexibilité au niveau ressources de production. Mais ces degrés de liberté n'ont d'intérêt que s'ils sont exploitables en temps réel à l'initiative du système de pilotage, car un système de production ne peut être flexible que si son contrôle lui conserve toute sa flexibilité potentielle [Slack 88a]. Ce contrôle doit aussi bien concerner le comportement des ressources que l'évolution des produits dans le système de production.

L'activité d'un atelier vis à vis des produits peut s'évaluer soit :

- globalement, par les caractéristiques des flux de production à l'entrée et à la sortie du système. Ce critère d'évaluation peut suffire lorsque la production est peu diversifiée et comporte des quantités suffisamment importantes pour qu'on ne se soucie pas trop du devenir individuel des produits.
- individuellement, par la mesure des délais effectuée entre l'introduction des produits à l'entrée et leur sortie de l'atelier. Cet aspect devient important dès qu'on se trouve dans un

flux de production assez diversifié, avec des lots de petites tailles pour chaque référence de produit. Il devient alors important de connaître la répartition et le temps de séjour des produits dans le système et de disposer des fonctions permettant d'introduire des notions de priorité dans les décisions d'orientation des produits vers un poste de travail.

En phase de production, les indéterminismes liés à l'évolution des ressources de production, leur comportement parfois imprévisibles (changement d'état inattendus), et des contraintes externes à la production engendrent des incertitudes d'exécution qui peuvent entraver la réalisation de la production planifiée.

Dans un système de production à fort degré de flexibilité, il arrive assez souvent qu'un ordonnancement prévisionnel, même s'il est de très bonne qualité, devienne non admissible pendant son exécution, du fait des changements et incertitudes précédemment rappelées. Dans ces systèmes, un fort pourcentage de la production déjà planifiée est susceptible d'être réordonné [Na 90], [O'Grady et al 92]. La correction des ordonnancements devient donc un problème important dans le contrôle des systèmes manufacturiers [Lévis 87].

Dans le cas particulier des ateliers flexibles de fabrication mécanique produisant de petites séries, environ 75% des pièces mécaniques fabriquées le sont à moins de 100 exemplaires [Lesage et al 84]. Nous pensons qu'il est donc intéressant, pour faire face aux perturbations et aux fluctuations de la demande, de contrôler le déroulement de chaque opération afin de satisfaire au mieux les objectifs de production, au lieu d'avoir à décider de l'utilisation des ressources à partir des informations sur le comportement global du système de production.

Dans ce contexte dynamique, la flexibilité décisionnelle prend toute son ampleur. Elle doit participer au processus de décision en devenant une dimension supplémentaire [Cohendet et al 89]. Ainsi, nous allons utiliser les différents degrés de flexibilités inhérents aux systèmes de production étudiés, pour absorber le mieux possible les perturbations pouvant survenir en phase opérationnelle.

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre de la prise en compte des aspects gestion de production dans CASPAIM et concernent particulièrement **le contrôle temps réel du déroulement de la production** dans les ateliers flexibles produisant des petites et moyennes séries. L'approche que nous proposons dans ce mémoire s'inspire des concepts généraux utilisés en ordonnancement et est basée sur **l'évaluation de l'admissibilité des séquences d'opérations** avant chaque décision de réaliser une opération.

Ce mémoire est composé de trois chapitres.

Dans le **chapitre I**, nous présentons les systèmes de production en général, et plus particulièrement les ateliers flexibles. Les différentes difficultés de conception de ces derniers sont abordées à travers les contraintes qu'ils exigent dans leur fonctionnement. Les degrés de flexibilité inhérents à ces systèmes et les contraintes qu'ils engendrent au niveau de leurs contrôles sont mis en évidence. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous introduisons la problématique du pilotage à travers la complexité des problèmes d'ordonnancement, l'aspect dynamique des ateliers flexibles, les problèmes liés au suivi de production et la nécessité d'intégrer le pilotage dans la conduite globale du système de production. Quelques approches de pilotage sont ensuite présentées. Le chapitre se termine par une brève introduction à CASPAIM, ce qui nous permet de présenter les problèmes spécifiques de contrôle de production traités dans ce mémoire.

Dans le **chapitre II**, nous présentons l'approche de conception utilisée dans CASPAIM. Nous caractérisons dans la deuxième partie les différents types d'arrêts (propres, induits et structurels) de production rencontrés en phase opérationnelle. Cette analyse nous permet de définir un lien qualitatif entre les perturbations élémentaires et leurs effets sur les opérations, les produits et les ressources de transformation. Nous proposons dans la troisième partie de ce chapitre une organisation des allocateurs de ressources basée sur les notions de suivi de produits et d'accessibilité entre ressources. En effet, l'activité de production peut être vue comme une succession d'interactions entre produits et ressources et d'échanges de produits entre ressources de production. Ainsi, nous définissons des règles de regroupement ou d'agrégation des contrôleurs de ressources afin de former des centres de décision, puis nous définissons les conditions de communication entre différents centres de décision. Cette organisation constitue le cadre dans lequel se feront les décisions.

Le **chapitre III** traite du contrôle des opérations de transfert et des opérations de transformation. En effet, pour optimiser le fonctionnement et exploiter au mieux les particularités des systèmes de transport flexibles, il est nécessaire d'optimiser les temps de transfert des produits en phase opérationnelle. Cette optimisation peut se faire, par une gestion dynamique des requêtes de transferts, lorsque des produits désirent utiliser le même moyen de transport. Le deuxième aspect de cette optimisation concerne le routage dynamique des produits entre lieux physiques, lorsque des perturbations ou une réaction locale entraînent un transfert d'opération sur une autre ressource. Concernant les opérations de transformation d'état, nous commençons par définir des indicateurs de quantification de l'état du système, c'est-à-dire les éléments nous permettant de détecter des incohérences dans l'évolution des produits par rapport aux prévisions de fonctionnement. Ensuite nous présentons différents types d'actions correctives permettant de réagir aux perturbations.



# **Chapitre I**

## ***PROBLEMATIQUE DE LA DECISION ET DU PILOTAGE DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLES***



## Introduction

Nous présentons dans cette première partie une analyse des systèmes de production en général, et plus particulièrement des ateliers flexibles produisant des petites et moyennes séries. Les différentes difficultés de conception de ces systèmes sont abordées à travers les contraintes qu'ils exigent dans leur fonctionnement. Les degrés de flexibilité inhérents à ces systèmes et les contraintes qu'ils engendrent au niveau de leurs contrôles sont mis en évidence. La conception du système de contrôle commande de tels systèmes nécessite une approche de type génie automatique, inspirée des concepts du génie logiciel. Nous présentons à la fin de cette partie le concept CIM (Computer Integrated Manufacturing), qui préconise la prise en compte dès la phase de conception, des différentes entités participant à la conduite des systèmes de production flexibles; ceci dans le but d'optimiser le fonctionnement du système par des communications faciles entre constituants.

L'aspect organisationnel des systèmes de production abordé dans la deuxième partie, nous permet d'introduire la décomposition des systèmes de production selon l'approche systémique, et de présenter en même temps la hiérarchie des décisions opérationnelles. Ces décisions opérationnelles sont elles aussi prises par affinement successif, et sont comparées au niveau le plus bas de la hiérarchie avec l'état du procédé. Certaines approches de gestion de production sont aussi rappelées. On verra qu'elles sont insuffisantes pour assurer, seules, le contrôle temps réel du déroulement des opérations dans les ateliers flexibles.

Dans la dernière partie, nous introduirons la problématique du pilotage à travers la complexité des problèmes d'ordonnancement, l'aspect dynamique des ateliers flexibles, les problèmes liés au suivi de production et la nécessité d'intégrer le pilotage dans la conduite globale du système de production. Les nécessités de considérer l'environnement particulier et les contraintes spécifiques de chaque type de production font qu'il existe différentes façons d'appréhender le pilotage d'ateliers. Quelques approches de pilotage sont ensuite présentées. Le chapitre se termine par une brève introduction à CASPAIM, ce qui nous permet de présenter les problèmes spécifiques de contrôle de production traités dans ce mémoire.

## **1. PRESENTATION DES ATELIERS FLEXIBLES**

Le concept et la notion d'atelier flexible sont très variés. Pour bien comprendre leur complexité, nous allons faire un rappel de l'évolution des systèmes de production. Ensuite, nous présenterons les avantages attendus des ateliers flexibles puis nous énumérerons quelques contraintes liées à leur conception et à leur fonctionnement.

### **1.1. Evolution des systèmes de production**

Nous présentons dans ce paragraphe les changements technologiques et l'évolution des tendances de consommation qui ont contribué à la complexification des systèmes de production.

#### **1.1.1. Evolution et conséquences**

Depuis le début de l'industrialisation, les systèmes de production ont eu une série d'évolutions technologiques plus ou moins bien maîtrisées. Dans la décennie 60, les systèmes de production étaient centrés autour des mono-produits. Les progrès technologiques récents ont permis :

- la construction de machines de plus en plus performantes,
- la création des systèmes de manutention automatique,
- l'évolution des systèmes de pilotage.

Parallèlement à cette évolution technologique, les exigences des consommateurs se sont profondément diversifiées. A une situation de production de l'après guerre caractérisée par un marché où la demande était supérieure à l'offre, on est passé d'une économie de production à une économie de marché. Cette nouvelle situation s'est traduite par des exigences accrues sur la qualité et la variété des produits, mais aussi sur la réduction des délais de fabrication. Or, chaque évolution a entraîné au niveau de la production, des contraintes de plus en plus difficiles à appréhender avec des outils de gestion classiques, appropriés à une gamme de fabrication rigide et un nombre limité de produits.

Multiplier les variantes, fabriquer en un temps plus court, limiter les investissements financiers, fabriquer des produits plus compétitifs sur le plan de la qualité sont autant d'objectifs souvent contradictoires auxquels les entreprises doivent faire face [Benchimol 85]. Cette multiplicité d'objectifs va contribuer à la complexification de la conduite des systèmes de production. Ces modifications de la production vont transformer l'organisation et la gestion du système, et entraîner sur la production des contraintes difficiles à maîtriser. Intéressons-nous par exemple aux problèmes liés aux délais, une des contraintes d'un système de contrôle temps réel ou pilotage des systèmes de production, objet de notre étude.

Prévoir un délai de fabrication est l'une des opérations les plus complexes en gestion de production [Benassy et al 86]. En effet, comme nous le verrons, dès que l'on abandonne les configurations simplistes d'un atelier composé uniquement d'une ou de deux machines, les formalismes mathématiques sont encore insuffisants pour résoudre ce type de problèmes de façon optimale. En toute rigueur, fixer un délai nécessite la connaissance prévisionnelle exhaustive de tout l'état du système productif [Mollet 89], c'est-à-dire :

- des composants à fabriquer,
- des temps exacts de fabrication ainsi que l'estimation de ceux des pannes,
- des temps inter-opératoires,
- des temps de changement de fabrication,
- de la disponibilité de la main d'oeuvre sur chaque machine,
- des états des stocks et des rebuts possibles.

On pourrait allonger la liste et trouver encore d'autres paramètres qui dépendent plus particulièrement du cheminement des pièces dans l'atelier, un des points qui nous intéressera par la suite. Sans vouloir compliquer cette problématique, on comprend que cette question de délai repose sur des hypothèses de fonctionnement et sur des règles parfois externes à la fabrication.

Cette évolution du mono-produit à des milliers de variantes s'est faite en un temps limité, et bien souvent, l'appareil de production n'a pas pu s'adapter aux nouvelles conditions requises par cette multiplicité de variantes. Les difficultés apparaissent sur le plan technique, dans la recherche d'une flexibilité des moyens de production destinés à assurer un nombre important de produits sur les même machines ou dans un îlot de production [Bonetto 87]. Sur le plan de la gestion ou conduite, la multiplicité des produits engendre une explosion combinatoire au niveau de l'ordonnancement, et surtout de la conduite en temps réel. Comment dans ces conditions, définir la quantité et la nature des produits à lancer en fabrication et arbitrer entre des contraintes contradictoires : respect des délais, productivité et stock minimum.

Cause ou conséquence de l'évolution des demandes commerciales, cette complexification de la production qui n'est liée ni à la taille, ni au secteur d'activité, se trouve encore amplifiée par l'évolution de la nature de la demande. L'offre est confrontée à un demandeur beaucoup plus exigeant en terme de qualité, de délais et de prix.

Les ateliers flexibles dans leur ensemble semblent apporter un début de réponse aux problèmes ci-dessus. Cependant, leur conception reste encore très problématique en partie à cause :

- de l'hétérogénéité des systèmes de commande conduisant à une résolution empirique des différents types d'ateliers,
- de la diversité des systèmes de production et des types de productions réalisées.

### **1.1.2. Typologie des systèmes de production**

Il est en général difficile, lorsqu'on veut les classer, de bien caractériser les systèmes de production, car les critères de classification sont nombreux. Parmi ces critères on peut distinguer :

- quantité fabriquée,
- méthode de production (à la commande, sur stock...),
- complexité du produit,
- niveau technologique,
- nature des matières premières, etc.

En considérant la quantité de produits fabriqués comme critère important, on peut dégager trois grandes classes :

- production de grande série,
- production de petite et moyenne séries,
- production unitaire.

#### **1.1.2.1. Production de grande série ou de masse**

Dans ce type de production, on peut affecter des machines spécifiques pour effectuer une ou plusieurs opérations techniques. La quantité de produits à fabriquer permet de charger suffisamment les moyens spécifiques. Les problèmes de gestion sont alors similaires aux

problèmes de maîtrise de flux de production. Le système se contrôle par l'intermédiaire de son flux. On distingue les productions continues et les productions discontinues.

- a- Les productions de type continues : ce sont les productions dans lesquelles le ou les produits fabriqués subissent sur le plan technique des transformations pratiquement continues. Le système physique est constitué de machines importantes en général, relativement automatisées et disposées en série. Le problème important est le séquençement des diverses variantes du produit sur la chaîne, car un changement de produit nécessite souvent un arrêt des machines. On cherche à optimiser le séquençement pour obtenir une succession de produits nécessitant le moins de temps d'immobilisation.
- b- Les productions discontinues : compte tenu de la masse de production, on peut spécialiser les moyens de production pour la fabrication des éléments de base. Le système physique comprend en général deux parties distinctes : la fabrication des éléments de base et le montage disposé en lignes. Généralement, on travaille dans ce cas sur commande.

### **1.1.2.2. Production en petite et moyenne série**

Dans ce cas, les machines ne sont pas affectées à la réalisation d'un seul produit. Le système physique est constitué de machines polyvalentes, sur lesquelles passent une grande diversité de produits.

Le principal désavantage par rapport au mode d'organisation en ligne de fabrication réside dans la gestion. Le système étant en général discret, les risques d'explosion combinatoire sont importants. Le problème délicat est alors de déterminer l'ordre de passage des pièces sur les machines. Dans ce type de production, on peut travailler :

- sur stock : il faut disposer d'un bon programme prévisionnel et de peu de variantes,
- sur commande : il faut être capable de réagir très vite, donc de disposer d'un système très flexible.

### **1.1.2.3. Production unitaire**

En général les mêmes moyens sont affectés pour réaliser le produit. Il s'agit de la réalisation de quelques produits sur des périodes assez longues. Il est donc nécessaire de planifier la succession des tâches selon des techniques de gestion de projet.

#### **1.1.2.4. Conclusion**

La différence entre ces types de système de production réside dans l'organisation physique du système et dans celle de sa gestion. La classification présentée ci-dessus n'est pas exhaustive [Thiel 93], mais elle permet de se faire une idée de la nature et de la complexité d'un système de production. Il n'est pas exclu d'utiliser un double critère pour établir des frontières plus restreintes. Ainsi, si nous introduisons la complexité de la gamme des produits, les ateliers que nous allons considérer dans la suite sont des systèmes de production de type job-shop, produisant de petites et moyennes séries.

## **1.2. Description des ateliers flexibles de production**

### **1.2.1. Définition**

Un atelier flexible est défini [Ranky 90a], comme "Un atelier constitué d'un ensemble d'éléments capables de fabriquer un ensemble de pièces par programmation. Ce sont par exemple des machines outils à fort degré d'automatisation, avec système de manutention automatique".

Les expressions "programmable et automatique" laissent entrevoir la possibilité pour un système de production, de s'adapter à de nouvelles contraintes imposées par l'environnement dans lequel la production est gérée :

- changement de produits en cours de fabrication,
- modification de débit de flux de matière, etc.

En général, l'élément de base d'un atelier flexible est la cellule flexible, constituée elle-même par un ensemble de postes de travail automatisés, contenant par exemple un centre d'usinage associé à un système de manutention automatique [PTA 89]. Dans cette cellule flexible, est réalisé un usinage, un montage, un emboutissage ou un assemblage selon l'application.

"Les ateliers flexibles sont constitués par un ensemble de cellules flexibles, reliées entre elles par un système de transport automatique". Les ateliers flexibles se situent dans le prolongement des cellules flexibles. Par conséquent, la réalisation simultanée des produits de gammes différentes dans un atelier flexible nécessite une infrastructure plus complexe, plus importante en ressources de transfert et de transformation. Cette diversité doit être mise à profit

pour optimiser en temps réel l'engagement des machines [Lesage et al 84]. La complexité d'un atelier flexible est donc liée aux différents types de flexibilité qu'il présente.

### 1.2.2. Niveau de flexibilité

La notion de flexibilité constitue une des différences principales entre les ateliers flexibles et les systèmes de production conventionnels. Il existe plusieurs types de flexibilités [Stecke 85], [Browne et al 84], [Slack 88b]. Nous allons rappeler dans ce qui suit les plus importantes.

#### *Flexibilité des ressources*

C'est la capacité des ressources d'effectuer plusieurs opérations élémentaires, et de permettre la reprogrammation des usinages. Dans un système de production flexible, cette flexibilité est directement liée à la faculté ou à la rapidité des changements nécessaires entre deux produits différents :

- changement d'outils : permettant l'enchaînement rapide des opérations différentes,
- changement des trajectoires des robots ou des programmes des machines à commande numérique.

#### *Flexibilité de routage*

Cette flexibilité peut être envisagée à plusieurs niveaux de la production. D'une manière générale, un système de production a cette flexibilité si un objet peut être transféré d'un lieu à l'autre par plus d'un chemin. On distingue dans cette classe deux types de flexibilité :

- potentielle : si les trajets des produits entre cellules sont calculés de manière prévisionnelle en régime normal, mais redéfinissable en cas de dysfonctionnement d'une cellule,
- active : si les produits de même type sont systématiquement transférés selon plusieurs itinéraires possibles en fonction de l'état courant du système de production (produits en cours, charges des cellules, réseau de transfert, etc.).

#### *Flexibilité de tâches*

C'est la capacité de changer l'ordre des opérations d'une tâche ou d'une gamme au cours de la production. Elle permet, compte tenu de la disponibilité des ressources et de l'état d'avancement d'un produit, de choisir les opérations à réaliser et les ressources correspondantes.

### *Flexibilité de configuration*

C'est la capacité de construire, d'étendre ou de réduire le système de production d'une façon rapide et peu coûteuse, à court ou à long terme. Cette flexibilité dépend surtout de la modularité du système.

### *Flexibilité de volume*

C'est la possibilité que possède le système de faire face à des fluctuations quantitatives correspondant à des variations de demandes.

### *Flexibilité de mixage*

Elle a trait à la possibilité de produire simultanément sur un même ensemble de ressources, des produits différents qui ont en commun un certain nombre d'opérations.

## **Remarque**

Ces différents types de flexibilité offrent de nombreuses possibilités d'adaptation par la multiplicité de comportements qui en résultent. Pour exploiter au maximum ces différents aspects de flexibilité, il est souhaitable de disposer d'outils de contrôle et de commande adaptatifs ou réactifs permettant de choisir les décisions les mieux adaptées à l'état du procédé à contrôler. Cette flexibilité de gestion, conséquence de l'automatisation de la production, doit, comme les autres composants ci-dessus contribuer à améliorer la productivité.

### **1.2.3. Flexibilité et Productivité**

Flexibilité et productivité sont les principaux objectifs de fonctionnement des systèmes de production. Dans les systèmes de production rigides, les ressources fonctionnent généralement à capacité maximale, ce qui laisse peu de marge de réaction en cas de perturbation. Par contre dans les systèmes flexibles l'introduction des marges permet une éventuelle réaction, au détriment des temps de cycle et des en-cours. Face à ces caractéristiques, la généralisation de la notion de productivité n'est pas systématique pour les petites et moyenne séries.

En effet, le temps d'usinage d'une pièce dans un centre d'usinage est identique à celui correspondant au même travail sur une machine outil classique. L'augmentation de productivité dans le cas des ateliers flexibles provient essentiellement de l'automatisation qui apporte un gain de temps au niveau :

- du transit entre machines,

- du transfert automatique aux directeurs de commandes des programmes d'usinage,
- de la correction automatique apportée à ces programmes en fonction des côtes d'outils connues par le calculateur,
- de l'enchaînement rapide des différentes opérations, etc.

Ces améliorations permettent non seulement d'usiner des pièces différentes en automatique, mais donnent la possibilité d'améliorer l'engagement des machines. Cela, grâce au mixage rendu possible d'une part, par la gestion de la manutention automatique des pièces et des outils par le système de pilotage, et d'autre part, par l'introduction des concepts de changements de configuration.

Il est certes difficile d'améliorer la flexibilité d'un système de production sans en diminuer la productivité, ni la fiabilité [Lesage et al 84]. L'opposition qui est généralement faite entre atelier souple mais non productif et atelier productif mais rigide n'est pas pour autant systématisable. La flexibilité n'est pas nécessairement un obstacle à la productivité car elle peut être aussi un élément de son amélioration. Cette amélioration passe aussi par le contrôle du déroulement des opérations en phase opérationnelle.

La figure I.1 compare à titre indicatif les facteurs de productivité des différents types d'ateliers.

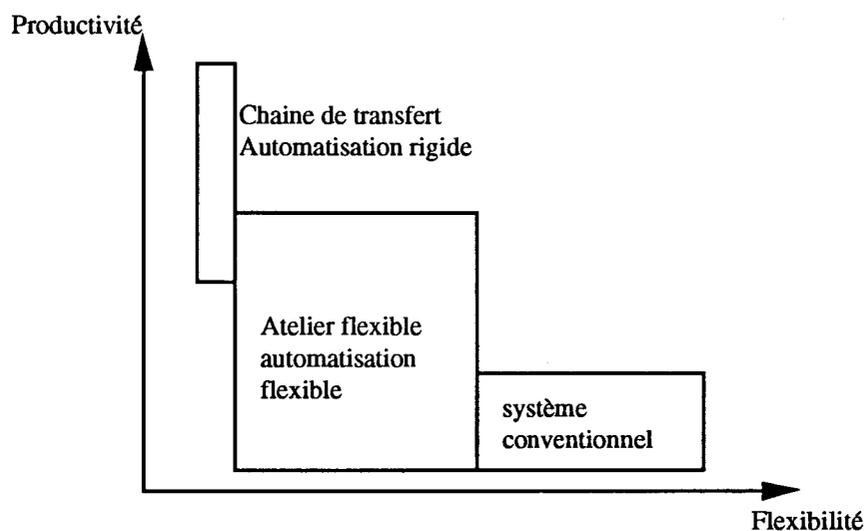


Figure I.1 : *Flexibilité-Productivité* [Barbier et al 92]

Les ateliers flexibles se situent à mi-chemin entre les systèmes conventionnels et les chaînes de transfert. Leur complexité diminue la fiabilité de leur fonctionnement et demande des efforts significatifs pour assurer leur maintenance et améliorer leur disponibilité. L'évolution des techniques et méthodes de contrôle liées à la surveillance et à la sûreté de fonctionnement

devraient apporter une amélioration sensible sur la réactivité du système. Le point crucial reste le respect des contraintes liées aux exigences des ateliers flexibles.

### **1.3. Contraintes temps réel et ateliers flexibles**

La modélisation des systèmes temps réel est un problème difficile dû à leur forte complexité [Perez 90]. Cette complexité est liée à la nature de leur développement matériel et logiciel.

#### **1.3.1. Définition [CNRS 88]**

" Peut être qualifiée de temps réel au sens logique, toute application mettant en oeuvre un système informatique dont le fonctionnement est assujéti à l'évolution dynamique de l'état réel d'un environnement (en l'occurrence le procédé dans le cas manufacturier) qui lui est connecté, et dont il doit contrôler le comportement. C'est donc l'asynchronisme de l'évolution par rapport au contrôle automatisé qui est la source des difficultés du temps réel".

Cette définition fait bien apparaître le fait que le système de contrôle doit être en ligne avec le processus à contrôler, et doit pouvoir agir sur lui dans des délais cohérents avec la dynamique du procédé à contrôler. Ces actions sont plus efficaces si elles sont compatibles avec les caractéristiques des applications temps réel.

#### **1.3.2. Caractéristiques des applications temps réel**

Cette partie présente les principales caractéristiques des applications dites temps réel, dont dépendent les performances des systèmes de conduite ou de pilotage. Parmi ces caractéristiques, on peut citer les contraintes de temps, de parallélisme, d'entrées sorties, et de fiabilité.

##### **1.3.2.1. Contraintes de temps**

En général, ce sont des systèmes destinés à la commande en ligne, et qui interagissent essentiellement avec l'extérieur. Ils réagissent à des occurrences extérieures, imprévisibles, tout en étant soumis à des contraintes de temps imposées par le procédé. Le procédé émet des signaux de manière totalement asynchrone, et le système de commande doit être capable d'y répondre, dans un temps bref et imposé. Cette contrainte de temps constitue l'essence même de leur relation.

Les performances temporelles qu'un système doit réaliser concernent d'un point de vue externe, les temps de réponse et de transfert de données. Ce temps de réponse est fonction des dynamiques internes du procédé (cas des processus continus : le produit est un flux continu de matière (chimie, pétrochimie, sidérurgie...) ou des cadences de production (processus discrets : les entités sont localisable individuellement (fabrication mécanique, fabrication électronique...)).

### 1.3.2.2. Contraintes de parallélisme

Les applications temps réel sont caractérisées par la simultanéité importante des séquences d'actions ou de détections. Le procédé émet de manière asynchrone et éventuellement simultanée des signaux auxquels le système de commande doit réagir quasi instantanément. Il est donc naturel de concevoir une commande capable de gérer le parallélisme des processus, en tenant compte de la simultanéité possible des signaux.

La spécification d'un tel comportement est tout à fait naturelle et lisible lorsqu'on l'exprime sous forme d'actions parallélisées. Mais, ce parallélisme d'expression repose en fait sur l'hypothèse implicite que l'exécution de chaque action sera supportée par un processeur fictif dédié, et que ces processeurs communiquent entre eux.

En première approche, le temps réel implique le parallélisme d'exécution [CNRS 88]. En fait, ce parallélisme d'expression peut conduire à un parallélisme d'implantation, qui peut soit être vrai sur un nombre de processeurs réels (synchrone), soit traduit par un pseudo-parallélisme consistant à replier les activités de plusieurs processus fictifs sur un seul processeur réel. Mais ce repliage doit alors garantir que le traitement de chaque action respecte l'échéance définie par le cahier de charge.

### 1.3.2.3. Contraintes sur les entrées-sorties

Pour suivre et piloter l'état du procédé, le système de contrôle doit généralement contenir une suite d'actions, dont les instants de début d'exécution sont assujettis à des signaux émis ou prélevés sur le procédé, et dont les instants de terminaison d'exécution sont soumis à des contraintes temporelles.

Le système de pilotage a un couplage plus étroit avec l'extérieur et fait intervenir un grand nombre d'E/S pour la conduite effective. Ceci nécessite non seulement un dispositif capable de gérer les E/S, mais de les appréhender en temps réel et avec rigueur, d'où l'utilisation de capteurs précis et fiables.

### 1.3.2.4. Contraintes de fiabilité

L'objectif à poursuivre est celui du "zéro panne". La solution doit s'orienter vers un atelier dont les procédures de fonctionnement en dégradé sont les plus automatisées possibles, ce

qui permet de continuer à produire dans des conditions acceptables en cas d'incident. Un système conçu de façon à ce que les pannes d'un élément ne se répercutent pas sur le reste de l'installation peut être considéré comme fiable.

La génération d'un ordre erroné doit être évité. En effet, les conséquences peuvent être dramatiques, surtout s'il n'est pas permis de revenir en arrière. C'est particulièrement le cas des ateliers flexibles par rapport aux ateliers conventionnels, faiblement automatisés et de petites dimensions.

### **1.3.3. Temps réel et ateliers flexibles**

Le développement d'une application de contrôle de production engendre un ensemble de problèmes, qui sont aggravés dans le domaine du temps réel par le nombre important d'outils à mettre en oeuvre, tant au niveau spécification et conception qu'au niveau exploitation. La théorie classique de la commande des systèmes s'est largement développée dans le domaine des systèmes à variables continues. Elle donne des résultats intéressants dans le cadre de la commande optimale, mais elle est cependant inefficace pour le contrôle des systèmes à événements discrets où la communication et la modularité sont fondamentales [Lévis 87].

La complexité croissante de tels systèmes de production du point de vue typologie et de la polyvalence des ressources, font que la seule observation des données statiques ne suffit plus à maîtriser leur exploitation. Il est donc nécessaire de disposer de modèles d'observation dynamiques, pour évaluer aussi bien les performances que les conséquences de réorganisation résultant d'aléas de fonctionnement, ou de nouvelles directives de production. Ainsi, la prise en compte des fonctionnalités temps réel et l'introduction des différents types de flexibilités rendent complexe la fonction de pilotage. Pour augmenter l'efficacité du contrôle de production en respectant les exigences temps réel, il est nécessaire de considérer ces différents types de flexibilités pendant tout le cycle de vie de conception. Les problèmes liés au contrôle temps réel des ateliers flexibles sont :

- le maintien de la cohérence de la structure de données.
- la reconfiguration dynamique en temps limité,
- la commutation en mode dégradé et le retour en mode normal.

Ainsi, la démarche et les outils à appliquer pour concevoir ou développer une application temps réel doivent être spécifiques. Ils commencent à être structurés dans le cas des systèmes embarqués [Perez 90], mais existent très peu dans le cas des ateliers flexibles. De

nombreux laboratoires de recherche s'intéressent de plus en plus à ce domaine d'étude, comme nous le verrons dans les paragraphes suivants.

Grâce aux techniques nouvelles (supervision d'ateliers, synoptique, etc.), nous pouvons suivre la progression des pièces ou produits dans une cellule flexible, et entre les diverses cellules constituant un atelier. Il faut aussi avoir une bonne représentation de l'information sur le système de production. L'informatisation du traitement de données permet de prendre des décisions, en considérant de nombreuses informations, alors qu'un opérateur en ligne a du mal à manipuler des variables trop nombreuses, et surtout à les traiter de façon quantitative et structurée (organisée). Cette prise en compte simultanée et structurée conduit à la nécessité de penser au concept d'intégration de différentes fonctions liées à la production, et dont la synergie permettrait de réaliser le mieux possible les objectifs de production.

## 1.4. Notion d'usine intégrée

L'approche classique de la productique a consisté à intégrer certaines fonctionnalités d'une activité (conception, gestion, ou fabrication) au sein d'une même entité et à définir des standards d'échange de données entre ces entités. Ce mode d'intégration traduit la démarche initiale de la productique, qui intervient surtout en phase d'exploitation. En effet, pour gérer la complexité d'un grand système, cette approche préconise une décomposition des activités en fonctions et services dans le but de minimiser la complexité, et d'optimiser les performances locales. Elle correspond globalement à une modernisation de l'appareil productif, en automatisant toutes les activités par des moyens informatiques. Dans cette approche, chaque activité s'est vue affectée ses propres techniques, ce qui a renforcé le cloisonnement et la hiérarchisation des activités, ainsi que la centralisation des décisions. Cette démarche initiale a donc consisté en l'addition de solutions technologiques, sous forme d'îlots d'automatisation logiciels ou matériels, dédiés à certaines fonctions :

- soit de fabrication (Machine Outils à Commande Numérique (MOCN), îlots robotisés),
- soit de conception ou de gestion technique (CFAO, GPAO, MAO).

Elle est donc assimilable à une association de fonctions optimisant des critères particuliers. Cette forme d'intégration s'est effectuée a priori et de façon importante, sans souci de cohésion et de synergie de l'ensemble des applications sous une forme d'organisation.

### 1.4.1. Concept CIM

L'approche plus récente d'intégration CIM ou productique intégrée, est basée sur la définition d'un modèle organisationnel idéal et conventionnel des différentes fonctions de gestion (technique, commerciale, financière) et opérationnelle (fabrication) de l'entreprise, pour une intégration totale [CIM 88]. Elle intervient dès la phase de conception d'un système de production, en essayant de définir une organisation type, suivant un référentiel par identification de différentes activités, ainsi que des données pertinentes échangées entre ces dernières, ce qui permet une cohabitation des différentes activités [Ingersoll 88]. Elle s'apparente au génie automatique au sens où elle vise à fournir au concepteur un ensemble de méthodes permettant de mener à bien l'automatisation des systèmes de production.

L'approche CIM préconise une démarche systémique, afin d'appréhender le fonctionnement du système de production suivant une vision plus globale [Lemoigne 90]. L'application du concept CIM aux ateliers flexibles permet une décomposition en cinq niveaux.

- *Le niveau équipement* : assure l'interfaçage entre le niveau poste de travail et les machines elles-mêmes. Il traduit les ordres de commande d'un poste, en séquence de tâches simples (langage compréhensible par le mécanisme de commande machine).
- *Le niveau poste de travail* : est responsable de la coordination et de la direction des équipements regroupant les unités physiques.
- *Le niveau cellule* : est responsable du séquençage et de l'organisation des tâches au niveau des postes de travail. Il est chargé de surveiller les services annexes comme le poste de chargement/déchargement.
- *Le niveau atelier* : s'occupe de la gestion des tâches des ressources. Il est responsable de la coordination et de la surveillance des activités exécutées par les entités de niveau inférieur.
- *Le niveau usine* : C'est le niveau le plus élevé de la conduite. Il englobe la gestion de production, administrative et financière. Il permet aussi la communication inter-usines.

A chaque niveau de la hiérarchie, on retrouve les différentes fonctions de production (surveillance et maintenance, conception du produit, gestion technique, contrôle commande, etc...). En parlant d'usine intégrée, on sous-entend la possibilité pour le service marketing par exemple de venir chercher de nouvelles gammes en FAO ou CAO en vue de la commande, ou encore pour le système de gestion, de pallier une panne machine. L'application du concept d'intégration CIM dans la conception des ateliers flexibles doit permettre l'augmentation de la productivité, la diminution du coût de production, la diminution des en-cours et l'augmentation de la qualité par inspection à 100%. En réalité cette vision reste encore très théorique, car il subsiste encore des problèmes de cloisonnement.

### 1.4.2. Problèmes posés par le contexte CIM

Chaque équipement de production est d'abord une réponse particulière aux diverses activités d'opérations et de contrôle, que doit accomplir un moyen de production de l'atelier qui possède une architecture et un langage spécifique.

Le contexte CIM pose 2 problèmes essentiels de communication :

- interconnexion matérielle : qui passe par la maîtrise de l'hétérogénéité des éléments constituant le système de production,
- interconnexion des applications pour l'échanges de données : à chaque type d'application, correspond un langage métier spécifique.

Ces deux problèmes conduisent progressivement à la normalisation, et à la standardisation des formats de données et des protocoles de communication, dans les domaines impliqués dans les systèmes de production. A l'heure actuelle, les réseaux locaux industriels constituent une première réponse à ce problème. Ils permettent d'assurer la circulation de données inter-équipements, moyennant une passerelle de transformation de format. Mais il est primordial de s'orienter vers un langage favorisant une expression sémantique commune plus adéquate à chaque niveau d'intégration dans la pyramide CIM, et favorisant ainsi leur degré d'autonomie et d'évolution respectifs.

## 1.5. Conclusion

Nous venons de présenter certaines notions sur l'organisation des systèmes de production, et en particulier des ateliers flexibles. Nous avons évoqué les contraintes liées à leur fonctionnement. Il se dégage de cette présentation que pour bien gérer un atelier flexible, il est nécessaire de prendre en compte le concept d'intégration. A l'heure actuelle, la notion d'intégration de la fonction gestion de production reste encore très globale. Pour mieux éclairer la complexité de cette intégration dans la conduite des ateliers flexibles, nous allons introduire dans la partie suivante une approche de décomposition du système de production (liée au concept CIM), où la hiérarchisation entraîne une interdépendance étroite entre les niveaux de gestion.

## 2. DECISION EN GESTION DE PRODUCTION

Un système de contrôle de production a pour rôle d'assurer en permanence, une bonne utilisation de l'ensemble des moyens de production. Pour bien gérer la production, les décisions prises par le système de gestion doivent être basées sur des informations actualisées (demandes, ressources disponibles, état d'en-cours...). Un bon système de contrôle est donc caractérisé par sa capacité d'acquisition d'informations et de prises de décisions. Nous allons présenter le mécanisme de prise de décision dans les systèmes de production. Dans le cas des ateliers flexibles, le processus est similaire à celui des systèmes de production conventionnels, la différence réside dans la prise en compte des contraintes temps réel (parallélisme, E/S, ...), l'environnement complet de la production et la nécessité de la réactivité.

### 2.1. Décomposition systémique d'un système de production

Selon l'approche systémique, tout système peut se décomposer selon trois sous-systèmes [Lemoigne 90] : le système physique, le système d'information, et le système de décision. La figure I.2 illustre cette décomposition pour un système de production. Nous allons présenter ici, les concepts généraux concernant ces sous-systèmes de production.

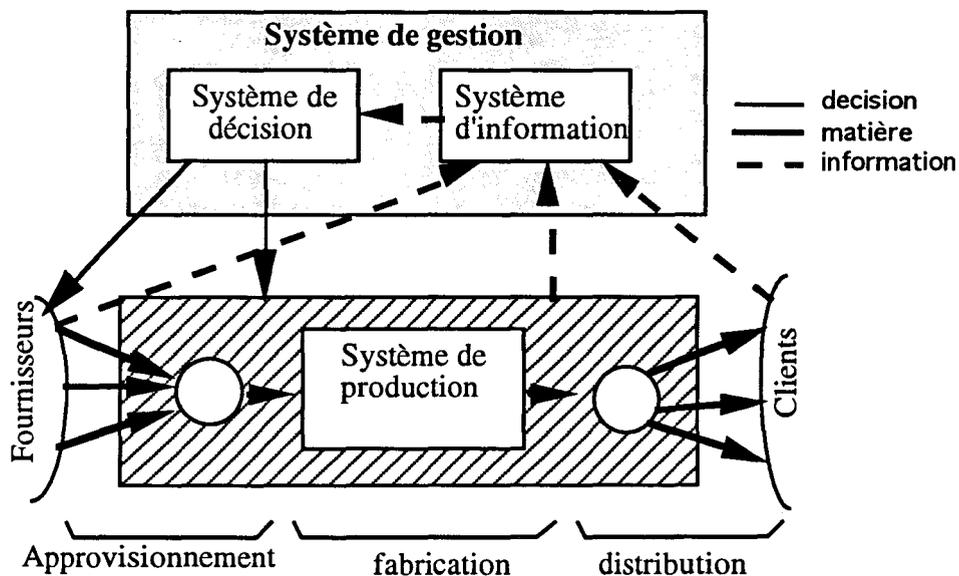


Figure I.2 : Interactions entre sous-systèmes de production

### 2.1.1. Système physique

Le système physique est constitué par l'ensemble des ressources physiques et des équipements, ainsi que des ressources humaines. En entrée de ce système, on a un produit brut ou semi-fini, provenant d'un autre système. La fonction transformation consiste généralement en la fabrication, le transport et le stockage.

### 2.1.2. Système d'information

Le système d'information représente l'ensemble des informations circulant ou stockées dans le système de gestion. Ces informations proviennent, soit de l'environnement du système, soit du système lui-même. Parmi ces dernières, on peut distinguer les informations provenant du système physique et celles provenant du niveau supérieur, qui définit les objectifs à atteindre et les moyens mis à sa disposition.

Très lié au système de décision, le système d'information a pour rôle essentiel, la transmission, le traitement et la mémorisation de toutes les informations. Il permet également d'évaluer les décisions prises par le sous-système de décision. Il le met au courant de tout changement du sous-système physique et du monde extérieur, ce qui permet une adaptation rapide des décisions.

Deux critères essentiels permettent de juger le bon fonctionnement d'un système d'information :

- critère de *disponibilité* qui traduit l'adaptation de la fréquence des informations à la fréquence des décisions.
- critère de *pertinence* qui traduit la faculté de posséder une information suffisante et sans distorsion.

### 2.1.3. Système de décision

Comme le montre la figure I.2, les décisions sont prises en fonction des informations fournies par le système d'information. Pour un système de production réel, il existe souvent des aléas qui perturbent son fonctionnement (voir chap II). Cette incertitude sur l'état du système de production en phase opérationnelle ne facilite pas la connaissance des instants de prise de décision [Stecke 85], [Slomp et al 92].

Afin de réduire la complexité de la décision, on adopte généralement une approche progressive et hiérarchique pour l'ensemble du système de production. Les décisions sont souvent prises en trois étapes successives (voir fig. I.3), caractérisées par l'horizon sur lequel elles s'appliquent.

- La décision stratégique concerne la politique générale de l'entreprise à long terme. A partir de l'analyse de la tendance du marché, des prévisions sur l'évolution des technologies et de l'analyse de la concurrence, les décisions stratégiques cherchent à faire évoluer l'ensemble des produits, à ajuster le mode d'organisation de la fabrication et la capacité aux besoins du marché. Elles déterminent la qualité des performances demandées aux différents services.
- Les décisions tactiques correspondent à un ensemble de décisions à moyen terme sur l'organisation des ressources. On considère à ce niveau, les prévisions de demande regroupées en familles de produits, et les capacités agrégées des sous systèmes de fabrication. Les décisions sont des productions globales sur des périodes élémentaires relativement importantes. Les décisions tactiques se traduisent par un calendrier de production.
- Les décisions opérationnelles contrôlent le déroulement quotidien du processus de fabrication dans le respect des décisions tactiques. Les décisions opérationnelles assurent l'ordonnancement des opérations sur les machines, l'affectation des opérations ou opérateurs aux machines, en tenant compte des objectifs fixés par les niveaux stratégique et tactique. Elles tiennent compte des détails de fonctionnement du système physique, et sont relatives au fonctionnement du système en temps réel. Nous nous intéressons par la suite aux décisions opérationnelles.

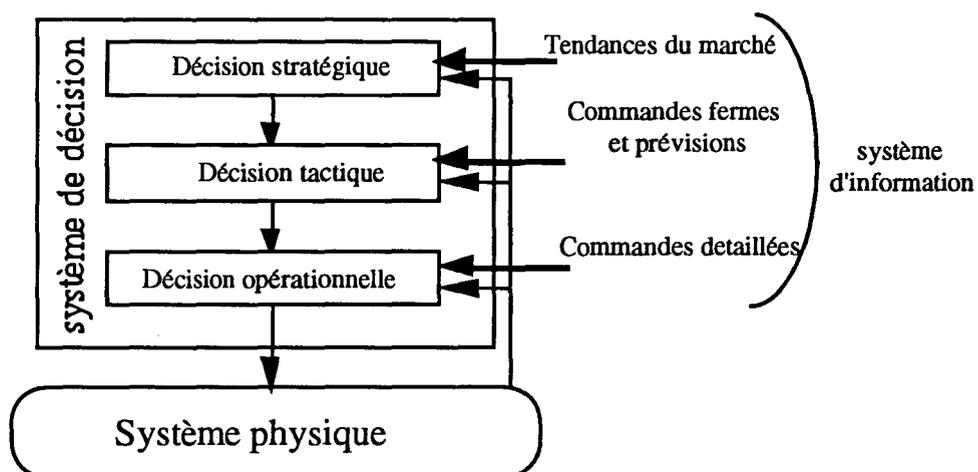


Figure I.3 : Hiérarchie entre niveaux de décisions

## 2.2. Hiérarchisation des décisions opérationnelles

Concernant l'aspect opérationnel les décisions de gestion peuvent être hiérarchisées en activités élémentaires. En contrôle de production, on distingue cinq fonctions essentielles organisées en étapes successives d'élaboration de la décision [Doumeingts et al 83], [Bonetto 87], [Hillion et al 88].

La *planification* (long terme) permet de définir à partir de statistiques et d'études de marché, un plan directeur de production, compromis entre les objectifs financiers et de production.

La *programmation* doit établir à partir du plan directeur un programme prévisionnel de production, à capacité finie ou suivant la charge totale admise par l'atelier. En considérant les besoins bruts (commande, délais demandés) et les prévisions, on calcule les besoins nets en tenant compte des stocks et des en-cours.

*L'ordonnancement* : L'objectif principal de ce niveau est le respect (quantité et délais) du plan prévisionnel. Il doit élaborer un plan détaillé, en cherchant à optimiser l'utilisation des moyens de production en terme de charge, d'en-cours et de contraintes de succession ou technologiques. Il fournit un calendrier d'organisation du travail pour l'atelier (date de début et de fin de chaque tâche), par ressource ou groupe de ressources.

Le *pilotage* est chargé de réaliser la production prévue, en réglant tous les problèmes non résolus par le prévisionnel (charge locale et contrainte locale). Il doit aussi réagir aux aléas, pour que la production se déroule le mieux possible.

La *commande* est le niveau directement lié aux ressources du système de production. Elle doit traduire un ordre effectif en séquence d'instructions ou d'actions compréhensibles et réalisables par une ressource.

## 2.3. Organisation globale de la gestion de production

Les trois principales approches habituellement utilisées en gestion et contrôle de production, sont : M.R.P II (Manufacturing Resources Planning), O.P.T (Optimize Production Technology), et la technique J.I.T (Just In Time).

Le MRP II est une approche de gestion à flux poussés [Doumeingts 83], [Lévy 85]. Cette technique est basée sur un calcul prévisionnel par lissage des capacités sur un horizon important, elle permet de déterminer les quantités et les dates de lancement des ordres de fabrication. Le principe consiste tout d'abord, en un calcul des besoins nets en composants nécessaires pour la fabrication des produits finis, par éclatement des données commerciales à partir des nomenclatures et des gammes simplifiées donnant les cycles de fabrication. Il permet de définir les charges de production induite. Ce principe de gestion est adapté aux fabrications importantes et fluctuantes.

L'approche de gestion de production par OPT consiste en une démarche d'analyse des flux, complétée par un logiciel de traitement. Cette approche s'attache essentiellement à analyser l'adéquation entre l'ensemble des moyens de production et la demande de produits finis. La recherche de cette adéquation conduit à analyser les flux issus de chaque moyen de production, et à identifier les goulets de production. Une des règles importantes de OPT stipule que les gains de temps doivent être a priori étudiés sur les machines goulets. Tout comme MRP, il souffre d'un manque de flexibilité pour être utilisé dans un environnement flexible [Bowen et al 89].

La gestion JIT est basée sur une recherche de chasse au gaspillage. La planification d'un poste de travail se fait à partir de la demande du poste aval (par exemple par l'intermédiaire du kanban), de façon à minimiser délai et retards [Kinechi 83]. On ne fabrique que ce qui est nécessaire, au moment où c'est nécessaire. C'est la technique du flux tiré. Ce type de gestion conduit à une régulation des flux de production, une diminution des stocks et à un contrôle décentralisé. Le JIT amène à modifier les paramètres d'évaluation de la production, liés à la quantité produite par poste. Le système JIT utilisant le kanban apparaît comme une méthode plus souple surtout applicable au domaine des grandes séries ou des petites séries répétitives. Il est mal adapté aux brusques variations de charge et aux demandes peu fréquentes. Il est adapté aux fluctuations faibles du marché.

MRP et kanban sont complémentaires : kanban par un suivi des ressources de production permettrait d'ajuster la planification définie avec MRP II. De plus kanban autorise la gestion au niveau court terme, lorsque toutes les conditions pour produire ont été bien prévues; ces conditions pouvant être définies par la méthode MRP à moyen terme. La planification systématique au plus tard de MRP peut conduire à des incohérences, car elle n'identifie pas les ressources goulets qui peuvent intervenir dans le calcul, or ce sont essentiellement elles qui contraignent le plus le délai final.

Dans le cas des ateliers flexibles, ces approches de contrôle de production se limitent beaucoup plus au traitement de la planification de production qu'à son exploitation temps réel.

C'est pourquoi de nombreux laboratoires de recherche développent de nouvelles approches pour le pilotage des systèmes de production flexibles (cf. § 3.2 chap.I). Rappelons cependant que les actions au niveau de l'ordonnancement et du pilotage sont vouées à l'échec si la planification n'est pas convenablement traitée. En particulier, s'il y a un écart trop important entre la charge que l'on espère voir absorber par l'atelier dans chaque période et les capacités dont il dispose. Les décisions de pilotage sont liées au contexte temps réel, et doivent permettre d'obtenir une utilisation efficace des ressources, afin de réaliser les objectifs de production. Un des principaux problèmes du pilotage se situe dans l'adaptation des prédictions aux situations changeantes du système de production.

### 3 - PROBLEMATIQUE DU PILOTAGE D'ATELIERS

" Piloter un système consiste à **réagir à toute évolution jugée significative du procédé**, en un temps qui garantisse que le produit reste entièrement suivi par le système de pilotage" [Tawegoum et al 92]. Cette définition se traduit sur le plan opérationnel par le contrôle du déroulement de l'ensemble des opérations de fabrication.

Ce contrôle doit se faire :

- **en respectant** au mieux les **objectifs de production** fixés, tout en satisfaisant les contraintes spatiales et temporelles fixées par l'ordonnancement, ou les contraintes de séquençement fournies par la planification,
- en s'assurant que chaque **ordre** transmis est **cohérent, vis-à-vis du caractère perturbé** ou non de l'environnement dans lequel évolue l'atelier.

Nous pouvons distinguer deux types de pilotage :

- **Le pilotage adaptatif** : il concerne les ateliers et les productions à déterminisme contrôlable, et à fortes contraintes de dates. Un ordonnancement prévisionnel est nécessaire afin de pouvoir diminuer la complexité du problème, qui serait très importante si le pilotage se faisait sans ordonnancement préalable, ou encore s'il correspondait seulement à une affectation en ligne. Le pilotage dans ce cas consiste en une adaptation en ligne de l'ordonnancement prévisionnel à l'évolution de la production.
- **Le pilotage réactif** : il concerne les ateliers à fort indéterminisme, et fortement perturbés. Ces deux effets entraînent une grande imprécision sur le comportement temporel du système de production, et diminuent la robustesse d'un ordonnancement prévisionnel. Les contraintes de respect de date n'étant pas fortes, le pilotage, dans ce cas réactif consiste en une affectation en temps réel ressources-produits, à partir des séquences d'entrée issues d'une planification et de la charge courante des ressources de production.

#### 3.1. Problématique générale du pilotage d'ateliers flexibles

Le pilotage ou conduite d'atelier en temps réel est un problème difficile dû :

- à la complexité du problème d'ordonnancement,
- au contexte perturbé du système de production,
- à la difficulté d'assurer un suivi efficace,

- à l'intégration du problème de pilotage dans le système de gestion de production.

### 3.1.1. Complexité et diversité des problèmes d'ordonnancement

En général, lorsqu'on parle d'ordonnancement, on pense aux ordonnancements d'ateliers. En réalité, les domaines d'application sont nombreux :

- ordonnancement de projet, avec éventuellement limitation de certains moyens [Roy 70],
- problèmes d'emploi de temps,
- problèmes de tournées avec des contraintes dues aux clients ou aux personnels [Haouari et al 90].

Avant de regarder le cas des ateliers flexibles, rappelons la définition de l'ordonnancement donnée dans [Carlier et al 88] : "ordonnancer c'est programmer dans le temps l'exécution d'une réalisation décomposable en tâches, en attribuant des ressources à ces tâches, et en fixant en particulier leurs dates de début d'exécution tout en respectant des contraintes données".

L'ordonnancement d'atelier n'est qu'un domaine spécifique d'application. A l'intérieur de ce cas particulier, il existe de nombreuses variantes, fonction du type du système de production et des hypothèses sur leur fonctionnement. La classification peut aussi s'opérer d'après l'ordre d'utilisation des machines pour fabriquer un produit. Une présentation plus complète des problèmes d'ordonnancement et des approches de résolution est donnée dans [GOTHA 93]. On distingue ainsi :

- les ateliers flow-shop : à cheminement unique, où toutes les gammes ont le même ordre de passage sur les ressources [Proust et al 91], [Staroswieki et al 92], [Baptiste et al 90], [Guinet et al 94], [Dejax et al 90],
- les ateliers job-shop : à cheminement multiple où chaque produit ou famille de produits possède une gamme spécifique. L'ordre de passage sur différentes machines dépend du produit [Baker 84], [Carlier et al 88], [Holloway et al 73].
- les ateliers open-shop : à cheminement multiple où chaque produit ou famille de produit ne possède pas de gamme spécifique, c'est-à-dire pas de contraintes de succession entre opérations [Brucker et al 92].

Dans ces différentes classes d'ateliers, les problèmes d'ordonnancement sont généralement NP difficiles. Il est le plus souvent impossible d'espérer obtenir la solution

optimale en temps raisonnable. C'est pourquoi, on développe beaucoup plus les algorithmes approchés et les heuristiques.

Nous allons présenter quelques approches de résolution des problèmes d'ordonnement de type job shop. Parmi ces approches on distingue :

- les approches par décomposition,
- les approches par construction et exploration,
- les approches par enrichissement de la connaissance.

### 3.1.1.1. Approche par décomposition

#### a- Décomposition structurelle [Portmann 87]

Elle consiste à utiliser la structure du problème pour le décomposer en sous-problèmes liés entre eux. On part d'un problème d'ordonnement, où les dates de disponibilité et les affectations sont connues. Dans un premier temps, on suppose que les moyens sont en quantité suffisante et on résout le problème de date de début de tâche. On suppose alors la localisation temporelle connue, et on résout les problèmes d'affectation de moyens. S'il n'y a pas de solution réalisable, on résout à nouveau un problème de dates comportant des contraintes supplémentaires (par modification des dates de lancement de certains produits) et ainsi de suite.

#### b- Décomposition spatiale

Elle consiste à découper le problème en sous problèmes, par la création de groupes d'exemplaires de moyens. Parmi ces groupes, on distingue les groupes de machines ou îlots de fabrication pour les problèmes d'ordonnement d'atelier, et des groupes de tâches ou groupes de produits [Portmann 88]. Si à chaque groupe de machine correspond un groupe de produits et un seul, on a mis en évidence des sous problèmes indépendants de taille plus petite et donc de résolution moins coûteuse. Si on découpe chaque produit en autant de sous produits que de sous machines, on ajoute des contraintes pour rendre les sous produits indépendants. On peut alors ordonner indépendamment chaque groupe de machines. Si la solution obtenue n'est pas réalisable, on modifie les contraintes et on reprend.

#### c- Décomposition temporelle

Elle consiste à découper le problème en sous problèmes, par la création de groupes de tâches que l'on ordonne successivement en progressant le long de l'axe des temps [Portmann 88], [Yamamoto 77], [Happiette et al 90]. Une telle méthode peut être

utilisée pour minimiser la durée totale dans un job-shop, en ordonnant les paquets de travaux que l'on place les uns après les autres à partir des dates de disponibilités.

#### **d- Décomposition de l'ensemble des solutions**

Il s'agit d'une approche générale dans laquelle on considère l'ensemble des solutions d'un problème et où l'on décompose cet ensemble en sous ensembles plus petits, plus faciles à explorer. Cela conduit aux procédures par séparation et évaluation [Roy 70], [Carlier et al 92], [Raz et al 93]. Beaucoup de travaux proposant une méthode de décomposition des problèmes d'ordonnement développent ce type de décomposition; d'autres présentent aussi des méthodes utilisant la programmation dynamique [Carlier et al 87], [Schrage 78].

### **3.1.1.2. Approche par construction et exploration**

Ce sont les méthodes par voisinage dans lesquelles, à chaque étape, on passe d'un ordonnancement réalisable à un autre ordonnancement réalisable voisin. Le voisinage pouvant se traduire par exemple par la permutation de deux tâches. Nous allons rappeler succinctement le principe de deux d'entre elles : le recuit simulé et la recherche tabou.

En début d'itération, on dispose d'un ordonnancement réalisable, ou solution actuelle. On tire au sort parmi les ordonnancements voisins obtenus par permutation des tâches (à partir de la solution actuelle), qu'ils améliorent ou non le critère par rapport à la solution actuelle. Dans le cas où le critère est dégradé, on accepte de prendre l'ordonnancement tiré au sort comme nouvelle solution actuelle avec une probabilité qui dépend de l'importance de la dégradation et d'une quantité appelée "température". La probabilité d'accepter une dégradation du critère est d'autant plus grande que la dégradation est faible et que la température est élevée. La méthode fait baisser progressivement la température jusqu'à 0 où la probabilité d'accepter une dégradation est nulle. Cette méthode est connue sous le nom de recuit simulé [Kise et al 92].

Dans le cas de la recherche tabou, on choisit parmi tous les voisins le meilleur voisin de la solution courante [Lino et al 92], [Marti et al 92]. Notons aussi l'introduction des méthodes basées sur les approches génétiques pour la résolution des problèmes d'ordonnement [Nouma et al 92].

### **3.1.1.3. Approche par enrichissement de connaissances**

Les techniques des systèmes experts sont caractérisées par une structure faisant apparaître trois éléments fondamentaux :

- la base de connaissance qui regroupe les éléments de description et de résolution du problème considéré,
- le système d'inférence qui regroupe les mécanismes formels permettant de décrire de nouvelles connaissances ou d'en retrancher, [monotone, non monotone],
- un système de contrôle de nature stratégique, qui guide le système d'inférence vers une solution dans les meilleures conditions. Les paramètres de contrôle définissent le mode d'exploitation global.

Les différentes techniques de l'intelligence artificielle concernent la structuration et l'organisation des connaissances, mais elles ne suffisent pas à elles seules à résoudre les problèmes d'ordonnement. Il faut les associer aux méthodes algorithmiques classiques [Bel et al 88], [Kusiak et al 92], [Stecke et al 88], [Bowen et al 89], [Solot 90]. La difficulté à maîtriser la durée d'inférence rend leur utilisation en temps réel très difficile. De plus ces méthodes, similaires à la génération des plans d'actions, ne prennent pas en compte la contrainte temporelle dans leur mécanisme d'inférence [Allen 83].

#### **3.1.1.4. Autres outils de modélisation et/ou résolution.**

Parmi ces outils on peut citer les RDP temporisés [Chrétienne 84a],[Proth et al 88], les dioïdes [Cohen 89] pour l'ordonnement des productions cycliques et les files d'attente pour l'évaluation des performances [Frein et al 88], [Proth et al 91]. On peut aussi citer dans ces approches, l'approche commande par flux [Kimenia et al 85], [Akella et al 90], [Van Ryzin et al 91] pour la production grande et moyenne série répétitive. Cette dernière approche utilise une approximation à flux continu pour la réalisation discrète des tâches dans un système de production.

#### **3.1.2. Environnement dynamique et contexte perturbé d'un atelier flexible**

La notion de flexibilité induit celle d'incertitude [Slack 88b]. En effet, la combinatoire des états ou situations perturbés augmente aussi avec le degré de flexibilité. Le comportement des ressources transformationnelles (c'est-à-dire les ressources transformant l'état d'un produit par enlèvement de matière (usinage...) ou par déformation (emboutissage...)) et des ressources positionnelles (c'est-à-dire les ressources chargées de changer la position des produits (robots, convoyeurs...)) n'étant pas déterministe, on ne peut se fier entièrement à leur comportement moyen pour le contrôle des productions à "flux" diversifiés avec gammes variées

et réalisant des petites séries. L'activité de contrôle de production ne peut donc se réduire à l'évaluation des délais des "lots" de pièces à l'entrée et à la sortie de l'atelier.

L'ordonnancement est le moyen le plus utilisé pour s'assurer du respect des objectifs de production. Il est donc une activité indispensable à la réaction aux aléas, où il est important de prendre des décisions respectant au mieux les objectifs de production. Mais en plus de la difficulté rencontrée dans la résolution des problèmes d'ordonnancement due à la complexité des ateliers, le contexte perturbé de l'atelier réduit assez souvent la durée d'exploitation de la solution obtenue.

Par conséquent, il y a assez souvent des écarts dus aux perturbations entre les valeurs prévues et celles observées. Ainsi, un ordonnancement, aussi efficace soit-il n'est jamais absolument respecté. Cet aspect est plus important dans les productions à "flux" diversifiés, avec gammes variées et petites séries. Dans la majorité des cas, les perturbations ne sont pas prévisibles : c'est dans ce contexte que doit se faire le pilotage temps réel.

En plus, l'environnement dynamique de l'atelier, dû d'une part à l'évolution parallèle des ressources et des produits, et d'autre part aux contraintes extérieures, augmente la difficulté de la prise de décision et le choix des actions correctives lorsque les perturbations surviennent. Ce contexte perturbé induit aussi la difficulté d'estimer les conséquences réelles des décisions prises, et des actions correctives à engager lorsque le système de suivi n'arrive pas à caractériser correctement les différents états des ressources et des produits.

### **3.1.3. Problème de suivi**

Comme nous l'avons vu précédemment, l'objectif d'un système de suivi est de recueillir et de transmettre au système de pilotage l'ensemble des informations émanant de l'atelier, afin de maintenir une image fidèle du fonctionnement du système piloté. Parmi ces informations, citons par exemple les compte rendus de fin d'usinage par rapport à une fin prévue, la date de début ou de fin d'arrêt momentané, la date de début de panne ou la date de fin probable, et la date d'achèvement des opérations des produits lancés en dernière limite, c'est-à-dire les produits de fin d'intervalle de lancement.

Le suivi peut être :

- manuel : il repose sur des opérateurs qui ont la charge d'informer le système de pilotage via un ensemble de terminaux repartis dans l'atelier. L'intervention humaine introduit

dans la boucle de rétroaction, un jugement sur le travail effectué qui peut être source d'approximation, d'incertitude ou d'erreurs.

- automatique : il repose sur des capteurs repartis dans l'atelier qui transmettent au système de pilotage les informations sur les produits et ressources aussitôt leur apparition.

Dans le cas des ateliers flexibles de type job-shop, le problème de suivi est particulièrement difficile. Ainsi, pour assurer une bonne cohérence, le flux d'information qui doit permettre de réguler le flux de matière doit être bien maîtrisé. Or la complexité croissante de ces ateliers tant au niveau de la typologie des produits (multiflux), que de la flexibilisation de leurs ressources fait que la seule observation de données statiques (état des machines, des encours...) ne suffit plus à maîtriser leur exploitation. Un comportement difficilement appréhendable caractérise aussi bien les objets technologiques (ressources) que les objets informationnels (décisions), et nécessite de disposer de modèles d'observation dynamique pour évaluer aussi bien les performances, que les conséquences de réorganisation résultant d'aléas de fonctionnement, ou de nouvelles directives de production.

Quelque soit le système utilisé, l'image interne de l'atelier peut présenter des différences avec son état réel. En effet, une valuation incorrecte du système piloté, due à un manque d'information ou à des informations erronées, peut amener le système de pilotage à prendre des décisions incorrectes par rapport aux objectifs de gestion de production. C'est pourquoi, toute prise de décision basée sur des informations incorrectes, n'apporte aucune amélioration positive au contrôle du système piloté. L'efficacité du système de pilotage dépend donc de la fiabilité et de la réactivité du système de suivi.

### **3.1.4. Intégration du pilotage dans le système de conduite**

A travers la présentation précédente, on perçoit que les traitements complexes liés au pilotage intègrent non seulement les contraintes techniques et économiques, mais également les aspects sociaux et humains de la prise de décision, étant donné l'intégration de l'opérateur dans la boucle de décision. Le pilotage d'atelier ne doit pas être considéré comme un système fermé, mais comme faisant partie intégrante d'un système complexe de décision [Dindeleux 92]. La classification des systèmes de décision d'après Gomory permet de définir trois principales classes de décisions [Lecomte 93] :

- les décisions programmables : dont l'ensemble des processus d'identification et de résolution est programmable grâce à des algorithmes;

- les décisions structurées : dont le processus de résolution, une fois le problème bien posé peut être considérablement aidé par des algorithmes prédéterminés;
- les **décisions hybrides ou mal structurées** : dont le processus d'identification aboutit à un problème dont la modélisation n'est pas satisfaisante et fait intervenir par exemple plusieurs objectifs contradictoires, et dont le processus de résolution fait souvent appel à des raisonnements de type heuristique.

Les décisions de pilotage du type hybride sont plus difficiles à évaluer, car elles visent à obtenir une utilisation efficace des ressources disponibles, pour satisfaire les objectifs assignés et doivent en même temps assurer l'adaptation quasi instantanée des actions de l'organisation aux fluctuations fréquentes. Outre ces objectifs souvent contradictoires, la complexité est aussi augmentée par la nécessité de maintenir de multiples relations existantes avec :

- les autres composantes de la conduite du système (surveillance, maintenance et autres parties du système de gestion),
- l'environnement, le changement de consigne de production, la modification de priorité,
- le procédé.

### 3.1.5. Conclusion

Ces différents éléments à l'origine de la complexité du pilotage temps réel, génèrent un environnement défavorable qui accroît la difficulté de satisfaire les objectifs de production. Le rôle de l'ordonnancement temps réel et du pilotage consiste à maintenir voisins les consignes de production et le contexte courant de l'atelier. Pour y parvenir, ils doivent trouver un compromis entre la quantité d'informations traitées, les temps de réponse ou réactivité du système de décision, et la qualité de la solution. Le paragraphe suivant présente quelques approches utilisées pour résoudre des problèmes spécifiques de pilotage d'ateliers.

## 3.2 - Quelques approches utilisées dans les méthodes d'aide au pilotage

### 3.2.1. Approche du LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes) [Roubellat et al 88], [Le Gall 89], [Billaut 93]

Au problème d'ordonnancement temps réel, la méthode du LAAS (à travers le logiciel ORABAID : ORdonnancement d'Atelier Basé sur l'Aide à la Décision) vise à :

- proposer au décideur, à chaque fois qu'il a une décision à prendre un plan d'actions compatibles avec les contraintes à satisfaire,
- faire évoluer simplement cet ensemble d'actions compatibles lorsque l'état du système change.

Dans cette approche, on cherche un ensemble d'ordonnancements admissibles matérialisant un ensemble de degrés de liberté, pour aider le décideur à exécuter le plan de production. C'est grâce à ces degrés de liberté que le décideur peut faire face aux aléas. L'approche du LAAS se décompose en deux étapes :

- étape d'analyse : à l'aide d'un modèle d'atelier prenant en compte les contraintes du problème, on effectue une analyse du problème qui vise à rechercher les caractéristiques d'un ensemble d'ordonnancements admissibles, c'est-à-dire compatibles avec les contraintes du modèle. Il ne s'agit pas d'énumérer tous les ordonnancements possibles, mais de caractériser un sous-ensemble d'ordonnancements admissibles.

- étape d'aide au pilotage : on exploite en temps réel, les informations fournies par l'étape précédente d'analyse, afin de surveiller la faisabilité du plan de production et de proposer au décideur un choix d'actions possibles, compte tenu de l'état réel de l'atelier. Le décideur peut choisir parmi ces actions en fonction de sa préférence et des contraintes additionnelles non modélisées. On évite ainsi de générer la décision à appliquer sans connaître exactement les préférences du décideur, ni utiliser un modèle complet de la réalité.

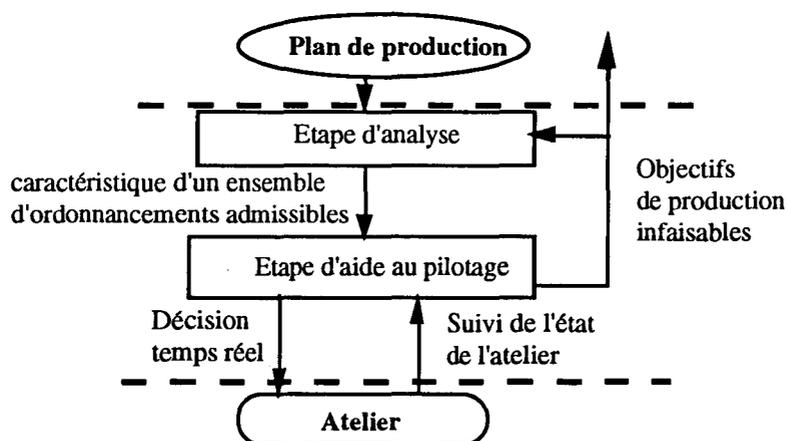


Figure I.4 : Décomposition du processus de décision

### 2.3.2. Approche du LAMSADE (Laboratoire d'Analyse et de Modélisation des Systèmes d'Aide à la DEcision) [Berthul 85]

Le LAMSADE s'intéresse entre autre au pilotage des ateliers flexibles en présence de pannes. Les pannes sont considérées suffisamment longues, pour que l'on envisage une nouvelle stratégie de pilotage en fonction de la nouvelle configuration des moyens disponibles.

En présence des machines à capacité limitée et variable (à cause des pannes), on fait progresser les pièces dans l'atelier avec comme objectif, une production maximale et équilibrée des différents types de pièces.

Le module de pilotage fait apparaître deux niveaux décisionnels :

- Au niveau supérieur, les taux d'affectation des produits aux machines sont calculés à l'aide d'un programme linéaire prenant en compte les capacités réelles de l'atelier (une machine en panne n'est plus comptabilisée) et les ratios de production. Ce niveau est donc appelé à chaque fois qu'une machine tombe en panne ou est en réparation.
- Le niveau inférieur suit les contraintes de taux d'affectation des machines, calculées à partir de la résolution du programme linéaire. Un tirage lié à un calcul de probabilités suivant ces taux permet alors l'affectation des pièces aux machines en temps réel.

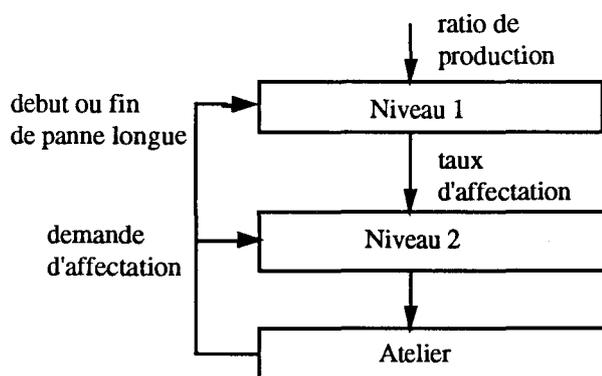


Figure I.5 : *Modèle de pilotage Lamsade*

### 3.2.3. Approche du LAG (Laboratoire d'Automatique de Grenoble)

[Kallel et al 85], [Aguillera 93]

L'équipe du LAG qui développe l'approche CODECO (COnduite DEcentralisée et COordonnée d'atelier) propose un modèle de pilotage qui se décompose suivant deux axes.

- un axe horizontal qui correspond à la décomposition du système physique de production en centres de charge (machines ou ensemble de machines équivalentes).
- un axe vertical qui correspond à la décomposition du système de décision en une structure hiérarchisée. Chaque niveau, caractérisé par son horizon de prise de décision, est constitué d'un ou de plusieurs centres qui recouvrent des cadres de décision du niveau supérieur et définissent le cadre de décision du niveau inférieur.

Dans cette approche les interactions entre centres sont nombreuses. La coordination, relation inter-niveaux assure le dialogue entre un centre de décision et un ou plusieurs centres de niveaux inférieurs. La coopération, relation intra-niveaux permet le dialogue horizontal entre centres de décision de même niveau.

Cette conduite permet de décentraliser une partie de la décision au niveau machine, de coordonner ces décisions afin de leur assurer une certaine cohérence et enfin de réagir face aux aléas de deux façons différentes : par coopération de centres de même niveau ou par remise en cause du cadre de décision fixé par le centre de niveau supérieur.

La structure d'un centre de décision est présentée ci-dessous. On remarque en particulier les communications entre centres de même niveau.

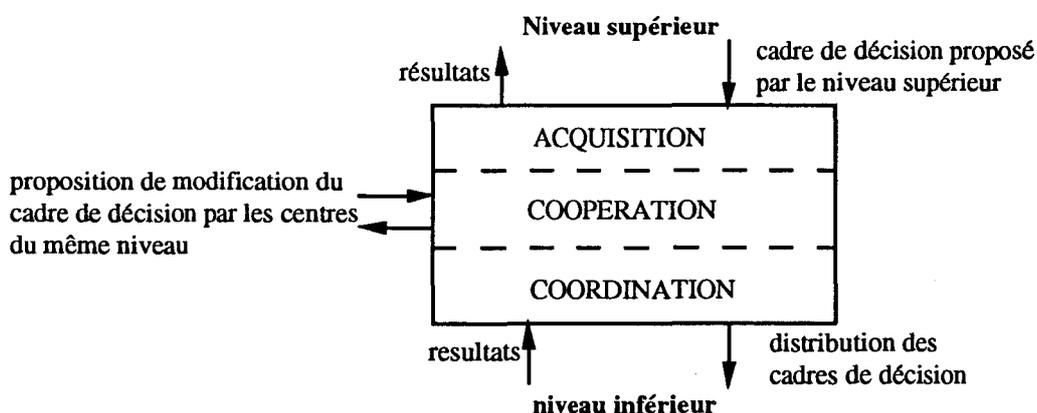


Figure I.6 : Structure interne d'un centre de décision Codeco

### 3.2.4. Approche du Laboratoire GRAI, [Archimede 91], [Berard 92]

Le modèle conceptuel de référence GRAI situe le pilotage d'atelier au plus bas niveau de la hiérarchie des centres de décision. Concernant l'aspect pilotage, l'approche PCS (Planification, Conduite, Suivi) est une architecture de pilotage d'atelier proposée par le laboratoire GRAI de Bordeaux. Elle consiste en une approche hiérarchisée du programme d'atelier et des perturbations. La décomposition des activités est telle que chaque centre de pilotage assure les fonctions Planification (prévisionnelle, ordonnancement local), Conduite (distribution du travail), et Suivi. Le modèle PCS propose de découpler l'aspect périodique du pilotage (planification) de son aspect événementiel (conduite temps réel).

Cette approche met l'accent sur l'identification et le traitement des perturbations à travers les notions de profil de flux de production et de zone d'influence potentielle minimale. Lorsqu'une conduite locale ne peut pas traiter une perturbation, elle demande un réordonnancement de la charge de l'atelier. L'aspect distribution du travail, intégration des contraintes locales de conduite spécifiques est peu abordé de même que la prise en charge de l'ensemble des fonctions de contrôle présentes à ce niveau. Elle est beaucoup plus adaptée à la production moyenne série.

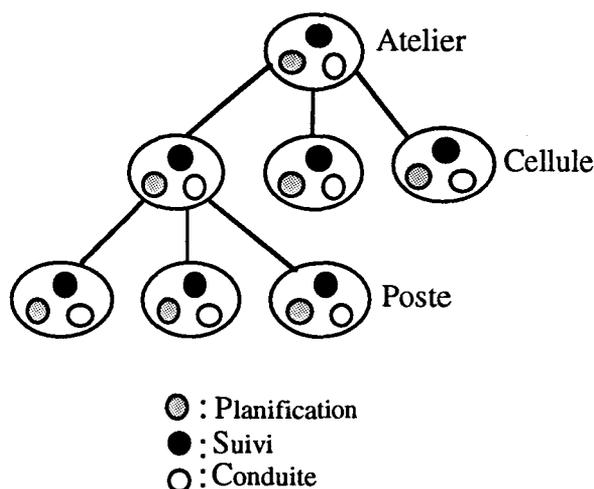


Figure I.7 : Pilotage par l'approche PCS

### 3.2.5. Approche du LAB (Laboratoire d'Automatique de Besançon). [Baptiste et al 93], [Manier 95]

Les objectifs de cette approche sont le respect des consignes en mode nominal, et la diminution de la sensibilité du système à la vitesse et à la charge. Son principe, représenté par la figure I.8, est de partir d'une optimisation off-line, à partir de données prédictives (programmation entière) pour obtenir des ratios optimaux par routage, en minimisant le temps maximum de travail.

Les résultats sont alors transformés en "comportement" au niveau de chaque poste. Les postes sont alors vus comme des entités indépendantes, utilisant chacun un comportement propre. L'organisation des centres de pilotage s'inspire du principe d'agent spécialisé issu des techniques objets et d'intelligence artificielle. Cette organisation conduit à une décentralisation et une distribution des décisions. Les agents se partagent des informations communes et communiquent de façon "tacite". Les règles de refus sont introduites pour réguler la charge des machines.

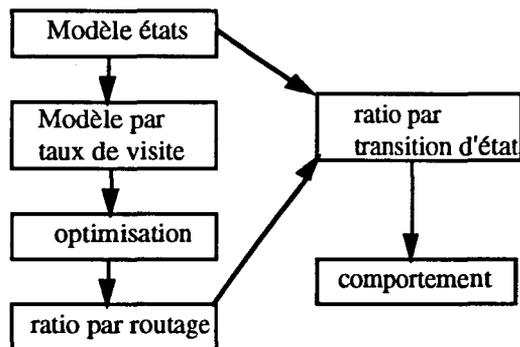


Figure I.8 : Pilotage par comportement

Appliqué à un système de production constitué de machines disposées autour d'un convoyeur en anneau assurant le transport et le stockage intermédiaire des palettes, les résultats obtenus sont proches de l'optimum en régime nominal. Mais, ce type d'équipement est généralement utilisé pour produire une famille de pièces assez homogène et à ratio fixes. La méthode s'adapte aux évolutions de configuration car les décisions sont décentralisées et elle n'induit aucun mode dégradé.

### 3.2.6. Approche du CRAN/LACN. [Bajic et al 91]

L'approche du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) et du Laboratoire d'Automatique et de Commande Numérique (LACN) consiste en la structuration d'une cellule flexible d'usinage, dans l'objectif de disposer d'un système de production autonome et auto-contrôlé en terme de qualité et de maîtrise des dérives de fonctionnement. L'auto-contrôle implique la gestion à chaque niveau de la cellule de toutes les informations technologiques propres aux équipements et aux processus (gammes) afin d'identifier l'état du système. Il consiste à introduire la fonction contrôle qualité de la fabrication dans la structure de la cellule du système de production.

Les données du système d'information sont formalisées dans les modèles conceptuels de données, et le modèle de base consiste à percevoir une action de fabrication comme l'intervention de plusieurs objets (passifs ou actifs) conduite par un programme de Commande Numérique, automate ou d'un autre formalisme.

La structure pour l'architecture de pilotage se décompose en deux niveaux :

- le pilotage de niveau cellule, dont le rôle est de gérer le flux de pièces dans la cellule,
- le pilotage de niveau station, dont le rôle est d'assurer la transformation des produits.

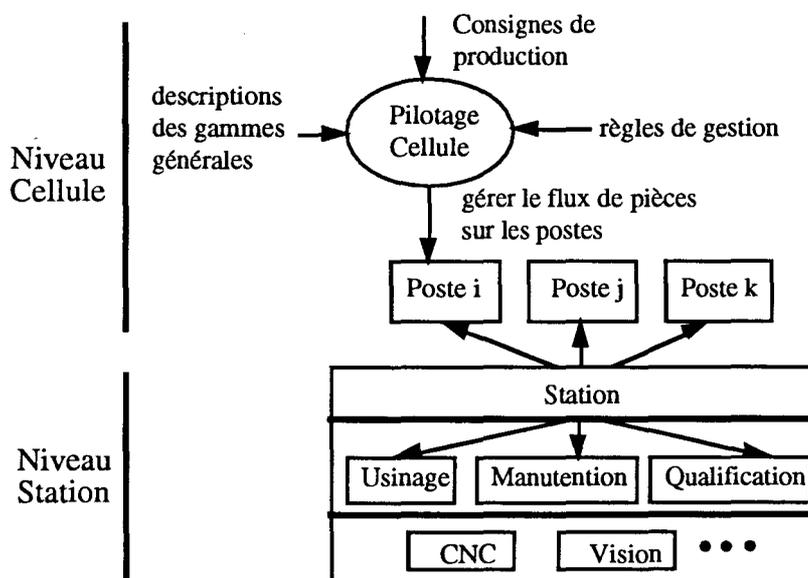


Figure I.9 : Pilotage auto-contrôlé

### 3.2.7. Approche du LIT (Laboratoire d'Informatique de Tours).

[Grünenberger 94]

L'approche de pilotage (PC CoDe Production Cell Control Design) développée au LIT est une solution méthodologique qui permet de concevoir et de réaliser le système de conduite des systèmes de production. Elle englobe tout le cycle de création du logiciel de conduite selon six phases (figure I.10).

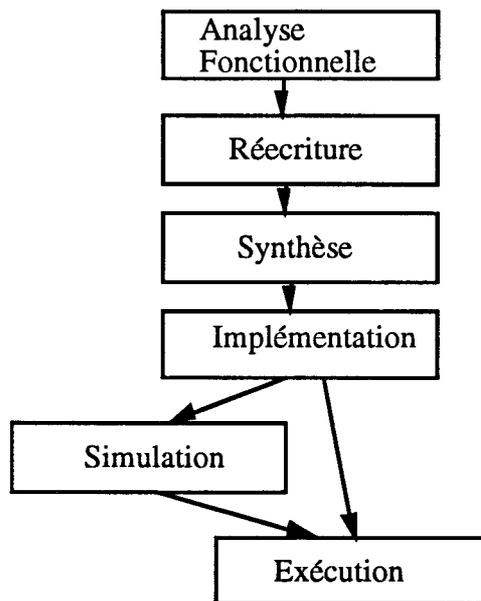


Figure I.10 : Les différentes phases de PC CoDe

Basée sur une approche de type SADT, la solution PC CoDe utilise également le paradigme objet pour assurer la transition du modèle conceptuel de conduite à l'univers opérationnel. La phase de synthèse permet de définir le modèle conceptuel grâce aux notions de Commande de Pilotage (CP) et d'Entités Conceptuelles de Pilotage (ECP). Ces ECP sont identifiées par une structure dont chaque champ est représentatif, soit de l'état de la partie opérative, soit des objets qu'elles manipulent. Le logiciel SPIROO développé dans le cadre de PC CoDe permet, à partir des spécifications, de générer le logiciel de conduite d'une cellule de production dans une architecture hiérarchique répartie.

### 3.2.8. Conclusion

La plupart des approches ci-dessus constituent à notre sens des outils d'aide à la décision, plutôt qu'au pilotage proprement dit des systèmes de production flexibles. Parmi ces approches on peut effectuer différentes constatations :

- la commande effective des ressources n'est pas considérée dans les modèles présentés à l'exception de l'approche du CRAN. Le fait de ne pas prendre en compte ces modèles de ressources fait que les problèmes liés à leur comportement en phase opérationnelle ne sont pas suffisamment explicités. La notion de routage dynamique et de gestion du système de transport apparaît donc très peu ou est intégrée très tôt c'est-à-dire réalisée de façon prévisionnelle pendant l'affectation des ressources de transformation d'état aux produits.
- la faible autonomie décisionnelle des systèmes de pilotage : en effet, la décision finale est toujours prise par l'opérateur superviseur de ligne. Ceci est dû au fait que toutes les ressources de production ne sont pas considérées. Le contrôle des ressources de production ne se fait pas de façon individuelle (hormis dans l'approche du LAAS et dans celle du CRAN). Les décisions prises concernent en général la réalisation d'opérations de transformation d'état sur les produits (changement d'affectation machines-produit) et non celles de transformation de position (routage des produits entre machines, résolution des conflits d'accès au ressources de transport) qui sont aussi importantes.
- l'absence de la notion d'intégration dans un modèle complet (hormis dans l'approche du CRAN/LACN): la gestion de production est vue ici de façon globale, et travaille généralement sur un ensemble de produits. Par conséquent il n'y a pas en général de suivi individuel réel des différents produits (hormis dans l'approche du LAAS). Le modèle de comportement du produit (partie commande produit) est donc découplé du modèle de comportement des ressources (partie commande séquentielle).

Les solutions fournies sont plutôt orientées gestion de production que contrôle commande. Cette dernière nécessite un modèle intégré dans lequel la commande et les fonctions de contrôle au sens large communiquent.

On retrouvera par la suite dans les méthodes de résolution que nous proposons dans le cadre du pilotage dans CASPAIM, des idées d'organisations proches des approches précédemment citées, mais appliquées au comportement temps réel, et considérant d'une part les ressources de transformation d'état, et d'autre part les ressources de transformation de position.

### 3.3 . Problématique de l'ordonnancement temps réel et du pilotage dans CASPAIM

#### 3.3.1. Introduction à CASPAIM

Le projet CASPAIM a pour but de définir une méthode et des outils homogènes d'aide à la conception et d'aide à l'implantation des systèmes de commande d'unités de production flexible. Dans cet optique, la méthode de conception s'articule autour de deux axes de réflexion menés en parallèle :

- à partir de la spécification des produits bruts et finis, il s'agit de définir les moyens nécessaires à l'analyse, la conception et l'évaluation du système de commande d'ateliers flexibles,
- à partir de moyens potentiels ou existant il s'agit de proposer une architecture matérielle de l'atelier.

La démarche de conception qui sera détaillée au chapitre suivant est modulaire, progressive et entièrement assistée. Elle est du type génie automatique et vise à proposer un outil :

- de conception de la commande qui intègre la sûreté de fonctionnement du système de commande,
- d'analyse de l'architecture matérielle existante ou future, d'évaluation des solutions complètes,
- d'implantation des solutions validées,
- de surveillance en ligne,
- d'ordonnancement et de pilotage temps réel.

Les systèmes de production considérés sont caractérisés par *trois niveaux de flexibilités* :

- au *niveau produit* : les gammes de production ne sont pas totalement ordonnées (indiquant ainsi des possibilité de choix ou de variantes),
- au *niveau transport* : les routages sont également flexibles au niveau à la fois des opérateurs et de la multiplicité éventuelle des chemins,

- au **niveau ressource de production** : elles peuvent en général exécuter plusieurs classes d'opérations.

Ces systèmes produisent une multiplicité de petites séries d'objets indiquant ici le **caractère non stationnaire des séquences de production**, caractérisées de plus par des **horizons courts**. Leur comportement dynamique est complexe, c'est par exemple le cas d'un réseau de transport qu'il faut modéliser finement dans ses transitions entre états, afin de prédire son comportement dynamique.

### 3.3.2. Position du problème

La conception initiale [Bourey 88], [Kapusta 88], la simulation [Castelain 87] et l'implantation [Craye 89] de la commande ont été l'objectif de l'équipe SED du LAIL. En effet, si les Réseaux de Petri (RdP) permettent de bien modéliser la commande correspondant au fonctionnement normal du système de production, de nombreux problèmes subsistent lorsqu'il faut tenir compte des contraintes réelles, de l'environnement de production et de sa commande par rapport aux indéterminismes et au contrôle d'accès aux ressources. La modélisation par RdP reste limitée au niveau représentation du système décisionnel associé. La simplicité de la symbolique ne permet pas de réaliser tous les mécanismes de décision liés à l'évolution du système de production. Deux approches sont utilisées pour la résolution des problèmes décisionnels : la résolution par règles de production simples ou par méthode algorithmique.

Nous commençons à aborder d'autres domaines de la conduite tels que la gestion des modes de marches, la surveillance et en particulier les aspects liés à la gestion de production. Ce qui explique pourquoi les problèmes de gestion et ceux liés à l'organisation des moyens de production, qui permettraient de contrôler le déroulement des opérations sur un ensemble de produits, ont été très peu abordés. Compte tenu du potentiel de flexibilité et du type d'ateliers étudiés, ce contrôle consiste à choisir des actions correctives adaptées à l'évolution du procédé. La décomposition d'un Système Flexible de Production Manufacturière (SFPM) selon la méthode CASPAIM est donnée par la figure I.10 (l'architecture du système de contrôle commande sera détaillée au chapitre II §1.2.5). Cette décomposition fait apparaître deux parties :

- le procédé regroupant l'ensemble des dispositifs matériels de l'installation (machine, système de manutention, unité de stockage, ...) où circulent, et où sont transformés les produits,

- le système de commande (niveau décisionnel, partie commande produit et partie commande ressources (gestionnaire de ressources)) chargé d'élaborer des ordres destinés au procédé, en fonction des consignes et des compte-rendus que lui transmet le procédé.

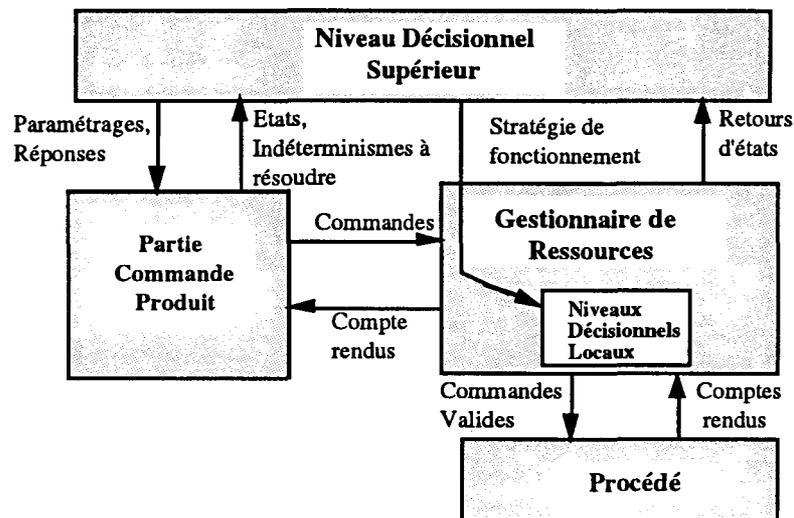


Figure I.10 : Décomposition d'un SFPM

L'introduction de la notion d'ordonnancement (date de fabrication des produits) dans la commande globale n'est pas suffisante pour contrôler efficacement l'évolution dynamique de la production, si on ne peut pas l'adapter à l'évolution réelle du procédé. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le système de production est dans un état perpétuellement transitoire du fait des différentes flexibilités et des contraintes externes. Ainsi, un ordonnancement peut rapidement devenir inadmissible du fait de l'absence de réaction face aux aléas. Pour faire face aux perturbations, le pilotage ou l'ordonnancement temps réel doivent empêcher la propagation des perturbations qui pourraient entraîner une modification importante du séquençage préplanifié des opérations.

Notre objectif consiste à déterminer les procédures de recouvrement de perturbations, de façon à respecter le mieux possible les consignes de production qui peuvent se présenter soit sous forme d'un ordonnancement prévisionnel (avec date de début et de fin d'opérations sur différentes machines), soit sous forme de séquence d'entrée des produits. Les aspects du pilotage que nous proposons d'aborder sont :

- **l'organisation dynamique des allocateurs (gestionnaires) de ressources** en centres de décision, et la définition des conditions des communications entre ces différents centres.

- le ***contrôle des opérations de transfert*** concernant le routage des produits entre ressources de transformation et la résolution dynamique des conflits d'accès aux ressources transitiques (ou de transfert),
- le ***contrôle des opérations de transformation d'état*** correspondant à la décision de commencer une opération parmi un ensemble d'opérations de différents produits en attente devant une machine.

Pour réaliser en temps réel ce contrôle de la production, nous envisageons le fonctionnement suivant : en nous situant dans la chaîne de gestion, si les décisions opérationnelles (sur les instants de début et de fin d'opération) ont déjà été proposées par le niveau ordonnancement, le pilotage va consister à réaliser le séquençage correspondant tout en exploitant au mieux les degrés de liberté (permutation des opérations, polyvalence des ressources, optimisation des transferts) pour adapter l'ordonnancement prévu. La réaffectation dynamique des produits déjà lancés en fabrication est réalisée dans le but de minimiser les retards.

## 4. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre la problématique générale du pilotage des ateliers flexibles et leur situation dans les systèmes de production. Nous avons montré que la flexibilité peut permettre de réagir à d'éventuelles défaillances de ressources de production par une adaptation ou une reconfiguration du système dans le but d'accroître la disponibilité de l'atelier. Mais ces degrés de liberté n'ont d'intérêts que s'ils sont exploitables à l'initiative du système de pilotage. En effet, en phase opérationnelle, le système de production ne peut être flexible que si son contrôle lui conserve toute sa flexibilité potentielle. La flexibilité décisionnelle est donc un complément indispensable de la flexibilité initiale du système si on veut optimiser le fonctionnement du système de production [Slack 88a].

Compte tenu de l'environnement perturbé, des indéterminismes du comportement des ressources, et la nécessité de réagir plus rapidement possible vis à vis des défaillances limitées dans le temps, nous proposons de contrôler le déroulement des opérations de transfert et de transformation d'état des produits.

Notre objectif consiste à déterminer les procédures de recouvrement de perturbations, de façon à respecter le mieux possible les consignes de production qui se présentent sous la forme d'un ordonnancement prévisionnel avec des dates de début et de fin d'opérations. Ainsi, les aspects du pilotage que nous allons développer concernent :

- *l'organisation des allocateurs de ressources* en centres de décision, et la définition des conditions de communications entre ces différents centres de décision,
- *le contrôle des opérations de transfert* par l'utilisation des fonctions de priorité pour la résolution des conflits d'accès aux ressources transitiques, et par un routage dynamique des produits entre ressources de transformation d'état,
- *le contrôle des opérations de transformation d'état* par vérification de l'admissibilité locale d'une séquence d'opérations et par l'utilisation des techniques de correction pour limiter la propagation d'une perturbation sur une ressource à l'ensemble des produits qui lui sont liés.

## **Chapitre II**

### ***ANALYSE DES PERTURBATIONS ET ORGANISATION DU PILOTAGE TEMPS REEL***



## Introduction

La première partie de ce chapitre présente les différentes étapes de la conception du système de contrôle commande selon la méthode CASPAIM. Les différents travaux menés dans le cadre de ce projet sont rappelés. A travers ce rappel, nous exposons les différents modèles intervenant dans la conception de la commande. Le processus de conception n'est pas linéaire, et pendant la conception, la méthode intègre des possibilités de remettre en cause les modèles obtenus si les propriétés que ces derniers doivent vérifier ne sont pas satisfaites. Le dernier paragraphe de cette partie est consacré à la problématique du pilotage, dans le cadre de CASPAIM. En phase opérationnelle, le pilotage prend tout son sens lorsque le contexte est perturbé. Il a pour fonction d'adapter l'ordonnancement prévisionnel aux situations changeantes et imprévisibles des ressources de production. Ces situations peuvent conduire à des écarts importants par rapport aux consignes de production, si aucune réaction n'est envisagée.

Pour bien comprendre la problématique du pilotage, nous présentons dans la deuxième partie, de ce chapitre une analyse qualitative des perturbations. Dans cette analyse, les perturbations sont la conséquence d'arrêts causés par une des composantes du système de production. Cette analyse nous permet de caractériser les différents types d'arrêts (propres, induits, ou structurels) ou types de perturbation pour chaque classe de ressources. Pour les perturbations subies par une opération, un produit ou une ressource, nous avons établi une arborescence présentant les liens ou relations avec les perturbations élémentaires dues à une entité de production.

Dans la troisième partie, nous proposons une organisation des allocateurs de ressources pour une meilleure prise de décisions. Cette organisation est basée sur les notions de suivi de produits et d'accessibilité entre ressources. En effet, l'activité de production peut être vue comme une succession d'interactions entre produits et ressources, et d'échanges de produits entre ressources de production. Ainsi, nous allons définir une méthode de regroupement ou d'agrégation des contrôleurs de ressources afin de former des centres de décision, et définir les conditions de communication entre différents centres de décision.

---

# 1 - PRESENTATION DE LA METHODE DE CONCEPTION DU CONTROLE/COMMANDE

## 1.1. Evolutions du projet CASPAIM

La méthode CASPAIM constitue l'objet des recherches menées au sein de l'équipe S.E.D du LAIL, créée au début des années 80. La première phase a permis de définir et d'élaborer des concepts de structuration en modélisation, concepts destinés à appréhender certaines contraintes et certains niveaux de complexité relatifs aux systèmes de production flexibles (en fonctionnement normal et peu perturbé).

Au début des années 90, de nouveaux outils de modélisation ont été utilisés, et ont permis une modification importante de la méthode. En effet, bien que cette approche reste satisfaisante pour aborder la complexité des systèmes étudiés à l'époque, elle est apparue insuffisante pour l'analyse d'architectures de systèmes de production plus complexes. Ainsi, des concepts supplémentaires de structuration et une nouvelle approche intitulée CASPAIM II ont été définis pour appréhender des facteurs de complexité aussi variés que :

- la complexité liée au type de production qui se traduit par la possibilité de gérer finement et simultanément des produits de gamme complexes, ou des sous-ensembles cohérents devant subir des assemblages en une ou plusieurs phases, définissant ainsi des produits intermédiaires semi-finis,
- la polyvalence des ressources de transformation et de transfert nécessitant à l'évidence, une modélisation fine de leur comportement dynamique pour optimiser la commande,
- la flexibilité des gammes de produits permettant la permutation de certaines opérations d'une gamme, dans certaines conditions.

Ces différents facteurs de complexité ont entraîné :

- la nécessité de modéliser le procédé, afin d'assurer la commande prédictive d'ensemble du système et sa surveillance,
- la nécessité de la généricité et de la modularité de la commande, qui permettraient une conception beaucoup plus rigoureuse et une meilleure utilisation des ressources,

- la réactivité et le caractère synchrone du contrôle de bas niveau qui apparaît également comme une contrainte forte pour le pilotage et la coordination des tâches et, d'une certaine manière, dans les décisions relevant d'une *réévaluation en ligne de l'ordonnement des tâches*.

## 1.2. Principe de l'approche CASPAIM II

Pour prendre en compte les remarques du paragraphe précédent, la démarche a été revue. Elle s'est traduite par :

- la dissociation de la partie commande et du procédé concernant le système opérationnel, c'est-à-dire une spécification et une caractérisation de la partie logique concernant les moyens de production ainsi que leur organisation,
- la définition de nouveaux concepts de modélisation facilitant la modularité, la généricité et intégrant les aspects objets,
- l'utilisation de formalisme de modélisation de haut niveau, tels que les langages orientés objets pour le procédé, et les RdP à structure de données [Sibertin 85] pour la partie logique.

Ainsi, deux approches ont été utilisées pour la conception globale :

- l'approche par des *objectifs produits*,
- l'approche par des *objectifs systèmes*.

Ces deux approches complémentaires sont basées sur la dualité existant entre un système de production et le produit élaboré par celui-ci.

L'approche par *objectif produit* consiste à définir la structure fonctionnelle du système de production, en partant des caractéristiques du produit et des contraintes liées à l'organisation des opérations élémentaires (gamme de fabrication). Elle est prépondérante dans le projet CASPAIM, puisque la démarche en conception de la commande concerne essentiellement le système de coordination.

L'approche par *objectif système* est une approche purement fonctionnelle. Elle consiste en une spécification fonctionnelle et une analyse descendante et hiérarchique par décomposition des fonctions de production en activités de plus en plus élémentaires. L'approche

produit est basée à la fois sur une approche fonctionnelle (description du séquençement correspondant à une organisation particulière des différents traitements) et surtout sur une approche opérationnelle (en analysant et en intégrant la structure, les caractéristiques et les contraintes liées aux différents moyens de production). La prépondérance de l'aspect produit a conduit à définir de nouveaux concepts.

### **1.3. Définition des concepts**

#### **1.3.1. Gamme logique d'un produit** [Cruette 91]

La gamme logique d'un produit décrit le séquençement (contraintes d'ordre) des opérations élémentaires et caractéristiques. Elle définit donc le processus de fabrication qui permet d'obtenir le produit fini à partir de son état brut. Elle correspond par conséquent à une description purement fonctionnelle du processus de fabrication, sans aucune référence, d'une part au procédé technique utilisé pour réaliser l'opération de transformation, et d'autre part, à l'aspect physique ou matériel du système de fabrication.

#### **1.3.2. Gamme opératoire d'un produit** [Cruette 91, Amar et al 92]

La gamme opératoire décrit le séquençement des différentes transformations, fonctionnelles et positionnelles, en faisant ainsi apparaître la succession des lieux physiques sur lesquels le produit transite. Elle représente donc une fusion entre une gamme d'usinage (gamme logique) représentant l'aspect fonctionnel du système de fabrication (transformations fonctionnelles) et une "gamme de transport" représentant l'aspect transitique du système de production (transformations positionnelles).

Une transformation fonctionnelle (ou d'état) correspond à un traitement particulier effectué sur une zone opératoire et sur un produit pour lequel il en résulte une modification d'état, alors qu'une transformation positionnelle correspond à un transfert particulier, d'un produit d'une zone opératoire (machine de fabrication) vers une autre adjacente au niveau de la gamme. Les gammes opératoires ne modélisent ni l'état statique ou dynamique d'une ressource, ni la commande ou le séquençement qui permet de la faire évoluer.

#### **1.3.3. Gamme opératoire étendue d'un produit** [Huvenoit et al 93], [Huvenoit 94]

C'est une extension des gammes opératoires faisant apparaître des informations relatives au problème de coopération des ressources lors d'un changement de lieu d'un produit et des informations relatives au problème de configuration des ressources pour l'exécution (choix

de lancement) d'une opération sur un lieu donné. Elle fait aussi apparaître les informations dues à la réalisation dynamique d'une gamme donnée (flux de produits) et à la présence simultanée de différentes gammes (parallélisme de flux). Cette réalisation va nécessiter des informations relatives à la concurrence et au partage des ressources (protocole d'accès, et stratégies d'allocations).

Ces problèmes de concurrence concernant les conflits d'allocation et d'accès aux ressources communes sont dues au nombre limité (contrainte de disponibilité) ou à la capacité limitée (contrainte de capacité) des ressources, et au nombre d'accès simultanés à un lieu (contrainte d'accès simultanés). Pour cela, il faut définir pendant la conception de la commande des protocoles d'allocation qui vont permettre de mettre en oeuvre des mécanismes de résolution, et des stratégies d'allocation permettant l'affectation ou non d'opérations en temps masqué.

## 1.4. Les étapes de la conception

Par souci d'intégration dans une démarche de type génie automatique, les modèles de la commande développés sont génériques et modulaires. La méthode de conception se décompose en quatre phases principales représentées sur la figure II.1. Parmi ces phases, on distingue successivement la spécification, l'analyse et la conception, l'intégration et l'exploitation. La phase de validation permet une éventuelle remise en cause des modèles initiaux si les propriétés nécessaires ne sont pas validées. Dans chacune des phases, les différents aspects liés à la conduite des systèmes de production sont simultanément étudiés. Ces aspects concernent les moyens physiques, la partie logique, les stratégies de fonctionnement et les modes de fonctionnement. Notre centre d'intérêt dans le cadre de cette méthode concerne la spécification des *stratégies de production* et la construction des *modules décisionnels*.

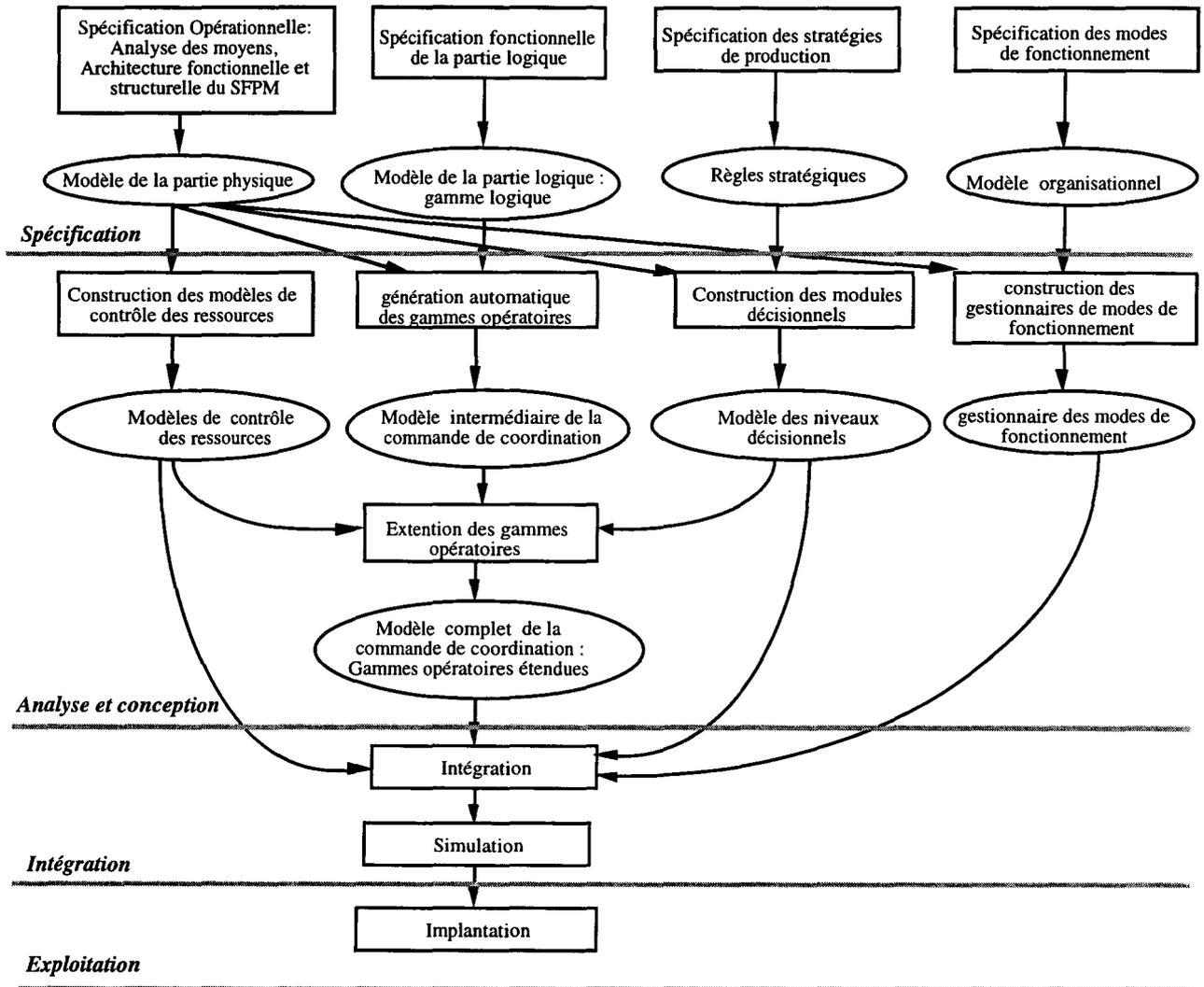


Figure II.1: Démarche de conception de CASPAIM II

### 1.4.1. Phase de spécification

#### 1.4.1.1. Spécification de la partie logique et physique

Cette étape permet d'effectuer une description formelle de l'aspect purement opérationnel du système de production à partir de la spécification de la partie logique et de la partie physique. Concernant la partie logique, une spécification des différentes gammes logiques, intégrant la flexibilité relative à l'ordre d'exécution des opérations caractéristiques est effectuée [Cruette 91].

La partie physique, quant à elle, tient compte de l'ensemble des moyens de production ainsi que leurs contraintes de fonctionnement, et aussi de l'architecture fonctionnelle relative à une organisation particulière de ces moyens (relations d'accessibilité) [Amar 94].

#### **1.4.1.2. Spécification des stratégies de production**

Elle consiste en la définition des caractéristiques du niveau décisionnel. Elle doit permettre d'élaborer des stratégies de choix d'organisation en fonction du type de production. Cette organisation concerne particulièrement la hiérarchisation (ou le nombre de niveaux) de la partie décisionnelle et les communications ou échanges éventuels entre ces niveaux.

La spécification permet aussi de définir l'ensemble des critères d'évaluation des décisions résultant de l'ordonnancement et du pilotage. Cette spécification définit le cadre dans lequel seront construits les différents modules de décisions.

#### **1.4.1.3. Spécification des modes de fonctionnement**

La spécification utilisée pour la description des modes de fonctionnement est de type fonctionnelle. Elle vise à décrire les organisations relatives aux différentes gammes et aux différentes ressources de production. Ces organisations correspondent aux différentes configurations à effectuer pour passer d'un mode de fonctionnement à un autre [Kermad et al 93].

Elle permet de définir l'organisation fonctionnelle nécessaire pour le contrôle des systèmes manufacturiers [Kermad et al 93], en décrivant la coopération et l'interaction entre différentes fonctions du système de production, à l'aide du formalisme SADT.

### **1.4.2. Phase d'analyse et de conception**

#### **1.4.2.1. Génération automatique des gammes opératoires**

Elle a pour point de départ le modèle des gammes logiques issu de la spécification, à partir duquel elle intègre progressivement les informations issues du modèle de la partie procédé.

Ce développement progressif des gammes logiques est basé sur une analyse opérationnelle de la partie procédé [Amar et al 90]. Cette analyse utilise les principes issus de la Conception Orientée Objet (COO). Ensuite le développement final des gammes opératoires s'effectue par instanciation et par assemblage de ces primitives génériques de base [Amar 94].

#### **1.4.2.2. Génération des gammes opératoires étendues**

L'extension des gammes opératoires utilise les mêmes principes que ceux employés pour le développement initial. En effet, des primitives de gestion/commande élémentaires représentant des graphes de comportement en coopération (synchronisation et communication), dans le cadre d'un échange de produit, et des graphes de sélection, pour la configuration des ressources, ont été développés [Huvenoit et al 93]. Ces différentes primitives de base ont été recensées et définies en vue de les assembler pour la génération des gammes opératoires étendues.

Chaque ressource de production est représentée par 2 modèles séparés :

- la commande effective : modélisant les actions séquentielles à appliquer pour provoquer un changement d'état de la ressource,
- son modèle comportemental : caractérisant l'état de la ressource de production et traduisant la dynamique d'évolution du procédé et les règles régissant son fonctionnement.

#### **1.4.2.3. Elaboration du gestionnaire des modes de fonctionnement**

Elle est basée sur une représentation structurelle du système de production sous forme d'arborescence. Elle définit principalement un guide d'analyse du système en effectuant des regroupements de machines (machines virtuelles) dont les liens sont basés sur des interactions ou des dépendances d'états entre les différents organes sous forme de contraintes (coopération, exclusion, observation). Ensuite, un graphe d'état basé sur le GEMMA [Bouteille et al 87] est établi pour chaque machine physique. A partir de ces graphes et de l'arborescence établie par l'intermédiaire du guide d'analyse ou de la méthode de regroupement, une gestion globale des modes de fonctionnement est possible [Bois 91]. La mise en oeuvre de ces gestionnaires de modes de fonctionnement est envisagée dans [Kermad et al 94].

#### **1.4.2.4. Conception des modules décisionnels**

A partir de la spécification des niveaux de décision, cette conception consiste à mettre en place une planification ou un ordonnancement convenant à un type de production particulier ou à adapter un principe d'ordonnancement au système en cours de conception (voir par exemple §3.1.1 du chapitre I). Les premières recherches faites dans le cadre du projet CASPAIM concernaient le paramétrage des graphes de commande par un ordonnancement minimisant les temps d'attente [Hammadi 91]. Cet ordonnancement utilise une décomposition

temporelle pour regrouper les produits en paquets, avant de procéder à l'intérieur de chaque paquet à un ordonnancement minimisant un critère lié au temps d'attente et de transit, problème important dans les ateliers flexibles. D'autres méthodes ou critères peuvent être utilisés, en fonction des objectifs de production. Un autre aspect d'ordonnancement en cours d'étude traite des productions cycliques [Camus et al 94], [Ohl et al 94].

Concernant l'aspect pilotage, objet de nos recherches, nous allons présenter dans ce chapitre une méthode d'organisation du pilotage en centres de décisions. Dans le chapitre suivant nous allons présenter une approche de contrôle de l'évolution de la production.

#### **1.4.2.5. Conception de la surveillance**

La fonction surveillance contient essentiellement la détection, le diagnostic et le recouvrement. Pour prendre en compte ces fonctions dans le contexte de la surveillance opérationnelle "en ligne", [Toguyeni 92] propose de baser le raisonnement du diagnostic sur une modélisation fonctionnelle du processus à surveiller. En posant comme hypothèse l'existence initiale du procédé, la modélisation va s'attacher à définir un modèle causal à partir de la structure de ce procédé et de son comportement global. Ce modèle va permettre de caractériser l'observabilité du système. La détection se fait grâce à la notion de signature temporelle causale [Toguyeni et al 90] et le diagnostic correspond à la propagation au travers du graphe causal de faits certains ou non, avec pour objectif la détermination précise de la fonction de base défaillante.

Le deuxième axe de conception de la surveillance [El Kattabi 93] porte sur la recherche des meilleures conditions d'élaboration d'une commande sûre au plus bas niveau, à partir d'une détection directe des défaillances constatées à la suite de l'émission d'une commande dont la cohérence par rapport à l'état initial du système est a priori valide. Cette approche, basée sur l'utilisation du langage Esterel et des concepts introduits dans les langages synchrones, permet de définir une méthode de conception et d'implantation d'interface de contrôle commande et de filtrage, permettant à ce niveau la détection directe de toute défaillance du procédé.

### **1.4.3. Phase de validation**

#### **1.4.3.1. Validation statique des gammes**

Cette validation des différentes gammes porte principalement sur :

- une démarche d'analyse des propriétés de terminaison propre et de vivacité du modèle de description des gammes, afin d'assurer que toute gamme pourra être effectivement réalisée et que toutes les variantes prévues sont possibles [Cruette 91].

- une méthode de recherche des blocages résultant d'une saturation des systèmes de transport ou d'une étreinte fatale liée à une utilisation croisée des ressources [Ausfelder 94].

#### **1.4.3.2. Validation du comportement dynamique des ressources**

La validation globale du comportement dynamique du système s'effectue par simulation du modèle complet. Cette validation permet de mesurer l'efficacité de la solution générée sur le plan qualitatif et quantitatif.

Deux approches sont possibles pour valider dynamiquement la solution : les démarches par simulation [Ausfelder et al 92], et les démarches analytiques. Des travaux sont en cours [Ohl et al 93], [Ohl et al 94], pour intégrer une démarche analytique basée sur les réseaux à files d'attente et les réseaux de Petri stochastiques. Les contraintes de respect de ratios de production sont introduites dans le modèle réseaux de Petri stochastiques orienté produit, ce qui permet d'évaluer les effets de la relaxation de ces contraintes sur la séquence de lancement des produits. L'évaluation du lancement est réalisée par le calcul de la chaîne de Markov sous-jacente. L'évaluation des performances doit permettre d'effectuer un bon dimensionnement du système et de déduire une politique de gestion de production performante.

#### **1.4.3.3. Phase d'implantation** [Huvenoit 94], [Farah et al 93]

Un modèle d'implantation, sous forme d'une maquette en langage ADA, a été réalisée [Huvenoit 94]. Cette maquette montre que l'on peut envisager un système de conception du gestionnaire de ressources ayant pour objectif la génération du code contrôle/commande.

Dans un autre cadre, des travaux concernant la définition d'une méthode et d'une architecture informatique de gestion/contrôle de référence pour l'implantation, découpée en plusieurs couches, sont en cours de développement [Farah et al 93], [Farah et al 95]. Ces travaux concernent l'aide à la conception du logiciel de contrôle commande (selon une approche synchrone/asynchrone). La démarche est basée sur l'approche HOOD (Hierarchical Object Oriented Design). Cette démarche de conception logicielle utilise le modèle RdP pour la commande et les States Charts pour la supervision. Elle vise à intégrer dans CASPAIM une méthode d'analyse et de conception logicielle orientée objet, capable de mener le concepteur, depuis la phase de spécification de la commande et de la supervision jusqu'à la génération automatique de code.

## 1.5. Architecture de contrôle et aspects liés au pilotage

### 1.5.1. Architecture de contrôle

Le regroupement des différents modèles permet d'obtenir l'architecture globale de contrôle/commande représentée par la figure II.2.

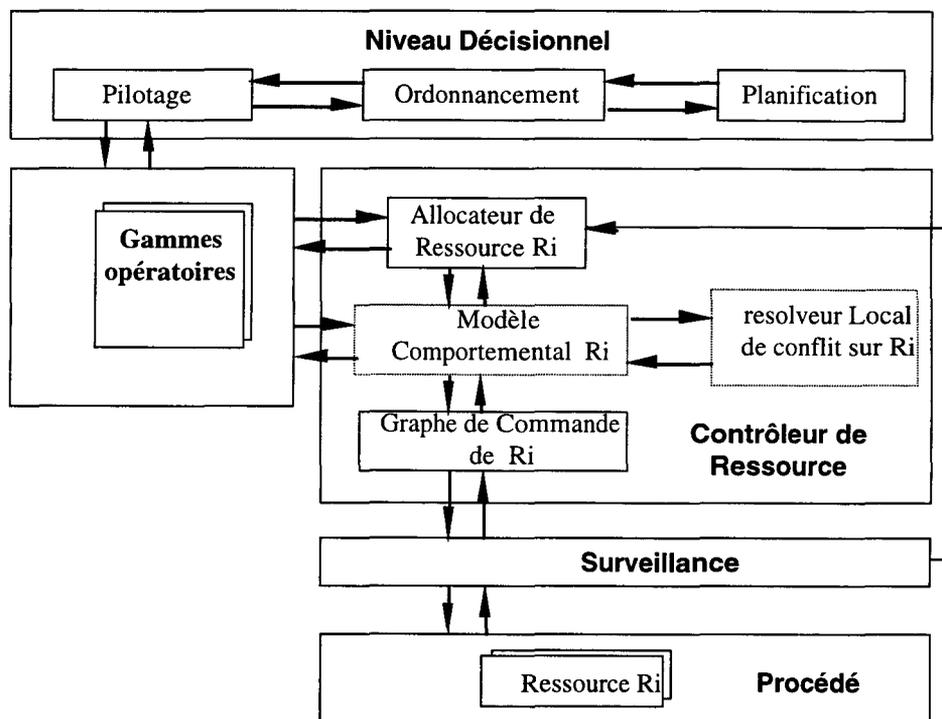


Figure II.2 : Architecture de contrôle commande d'un SFPM

On y distingue trois parties :

#### Le niveau décisionnel

Le rôle essentiel du Niveau décisionnel est d'établir des décisions et des choix destinés à résoudre les indéterminismes de la partie commande et à optimiser l'utilisation des ressources. La séparation du niveau décisionnel de la partie commande permet :

- de conférer à la partie commande un caractère flexible,
- de pouvoir appliquer différentes stratégies de fonctionnement sans avoir à modifier les graphes de commande,
- et d'avoir une vision globale du système pour intégrer la gestion de production et la supervision.

**La partie commande**

Elle est constituée de la partie commande produit (gamme opératoires) et de la partie commande séquentielle des ressources (graphe de commande des ressources (Ri)). Les étapes de leur conception ont été précédemment évoquées.

**Le procédé**

Le procédé est défini comme l'ensemble de la partie opérative, des équipements et des produits intervenant dans le processus de fabrication. Le modèle du procédé a une double fonction:

- il détaille exhaustivement l'ensemble des lieux et des moyens du système de production dont la gestion doit être assurée par le niveau décisionnel.
- il détaille pour chaque lieu de stockage la possibilité de transférer une pièce vers un autre lieu de stockage.

Un exemple d'application de la méthode CASPAIM à la conception de la commande d'un système de production flexible est donné dans [Huvenoit 94]. Nous allons présenter dans le paragraphe suivant, un exemple succinct de connexion entre les modèles de la commande.

**1.5.2. Exemple de connexion entre modèles de commande**

Le système de production considéré ici est la cellule flexible de l'EC Lille (figure II.3). Elle est constituée de quatre machines disposées autour d'un convoyeur. Trois types de pièces peuvent être réalisées dans cette cellule. Il s'agit des pièces de type :

- tfl : tournage, fraisage, lavage-métrieologie,
- tftl : tournage, fraisage, tournage, lavage-métrieologie,
- ftl : fraisage, tournage, lavage-métrieologie.

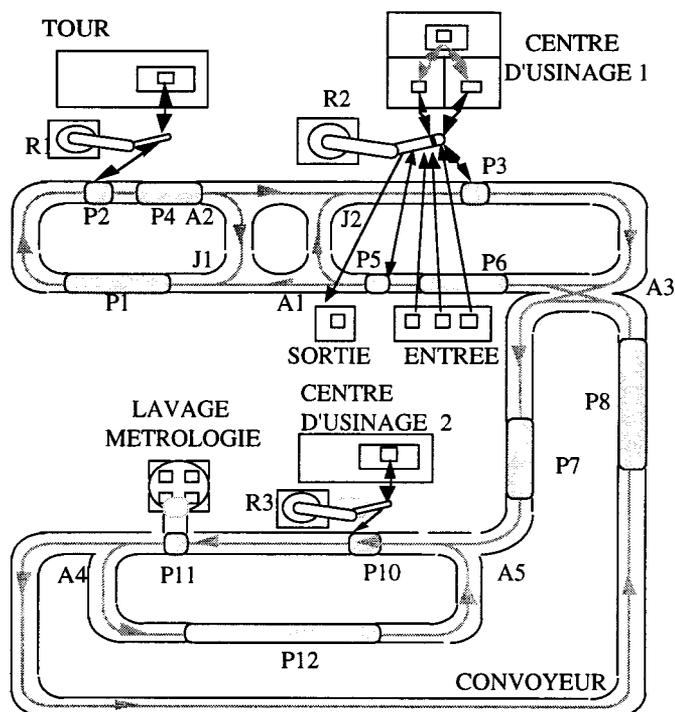
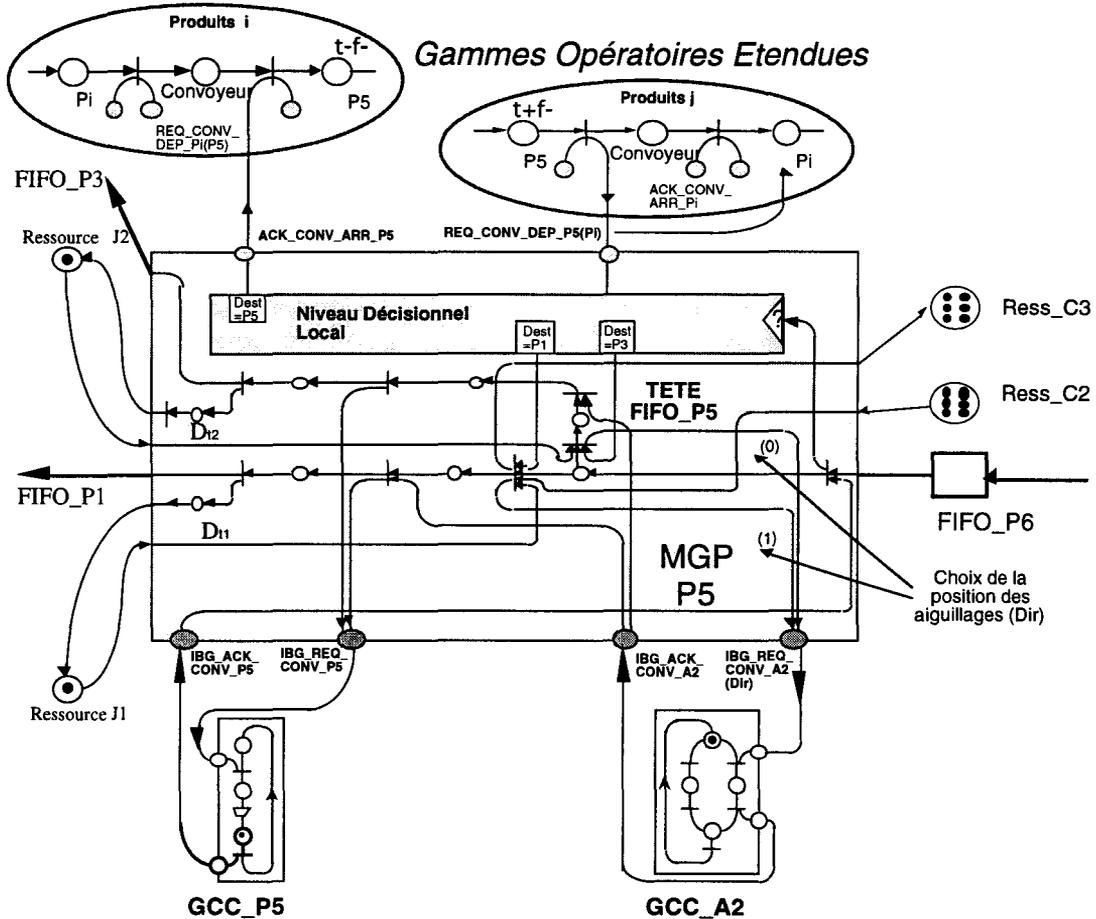


Figure II.3. Cellule flexible de l'EC lille

Nous allons montrer à travers l'exemple suivant, la connexion entre la gamme opératoire d'un produit, le Module de Gestion du poste P5 (MG\_P5) du convoyeur et les Graphes de Commande Complet de l'aiguillage A2 (GCC\_A2) et de la butée du poste P5 (GCC\_P5). Cet exemple illustre le trajet des informations dans le contexte dynamique.



**Figure II. 4 : Exemple de connexion entre différents modèles de la commande:**  
**Fonctionnement du module de gestion du poste P5 du convoyeur [Huvenoit 94]**

Le fonctionnement de cet ensemble se déroule de la façon suivante. Une palette arrivant en tête de fifo\_P5 est détectée par l'intermédiaire du graphe de commande GCC\_P5, celui-ci retourne l'information sous forme de l'accusé IGB\_ACK\_CONV\_P5 (IBG : Interface entre Base logicielle commune et Graphe de commande [Huvenoit 94]). Le niveau de décision local est alors consulté pour décider de l'utilisation de la palette.

Si la destination de cette palette, fixée lors d'une requête de la gamme opératoire étendue, est le poste P5, [une REQ\_CONV\_DEP\_Pi(P5)], un accusé de réception est renvoyé vers la Gamme Opératoire Etendue (GOE) ayant fait cette demande de routage [un ACK\_CON\_ARR\_P5].

Si la destination finale de la palette n'est pas le poste P5, c'est que cette dernière est en chemin vers un autre poste de destination finale. Dans ce cas, le centre de décision local contrôlant le poste P5 recherche le chemin approprié pour ensuite aiguiller la palette dans la bonne direction (poste P1 ou P3). Il n'y a alors aucune communication avec les gammes opératoires étendues.

Après réalisation des opérations de palettisation ou dépalettisation d'une pièce sur la palette, celles-ci étant définies par sa GOE, si la palette n'est pas désallouée, la GOE demandera le départ de la palette vers une autre destination finale  $P_i$  qui peut être P2, P10, P11 ou P6. Cette demande s'effectue par l'intermédiaire d'une requête  $REQ\_CONV\_DEP\_P5(P_i)$ . Le centre de décision local est alors consulté et décide du chemin à prendre pour que la palette aboutisse vers cette destination. En conséquence, il va aiguiller la palette vers un des postes qui suit immédiatement P5 (P1 ou P3).

L'opération d'aiguillage et de libération de la palette s'effectue par la commande séquentielle des graphes de commande complets des aiguillages (GCC\_A2) puis de la butée (GCC\_P5). Ress\_C2 et Ress\_C3 sont des sémaphores utilisés pour éviter de saturer les circuits C2 (P1, P2, P4, P1) et C3 (P3, P6, P5, P3).

### 1.5.3. Aspects liés au pilotage

Nous avons présenté dans le chapitre I §3.1, la problématique générale du pilotage. Nous y avons souligné le fait que la dynamique de l'environnement du système de production est l'un des facteurs rendant difficile la maîtrise du contrôle des ressources et des produits. L'évolution des différents modèles de commande ne peut donc se faire de manière entièrement déterministe et autonome.

En phase opérationnelle, le comportement des ressources de production et l'état d'avancement des produits vont conduire à des indéterminismes directionnels et à des conflits d'accès aux ressources. Cela nécessite d'introduire l'aspect décisionnel pour assurer un fonctionnement satisfaisant du système de production. Ces problèmes sont liés à :

- \* **l'allocation simultanée d'une ressource** de production à plusieurs gammes opératoires ou à une gamme supportant un parallélisme de flux,
- \* **la gestion des indéterminismes locaux** caractéristiques d'une ressource de production complexe.

Ces indéterminismes et conflits vont être arbitrés au niveau pilotage. Les problèmes qui vont se poser sont de deux ordres : méthode de décision et mise en oeuvre de la décision.

Concernant l'organisation des centres de décision, au regard du nombre de ressources, et de leurs interactions, l'organisation des allocateurs de ressources est nécessaire pour bien contrôler l'évolution de la production. La mise à plat ou la centralisation par un seul niveau décisionnel des contrôleurs de ressources ne contribue pas à l'optimisation de la décision. Nous montrerons dans la troisième partie de ce chapitre comment organiser le niveau pilotage en centres de décision afin d'assurer une bonne contrôlabilité des produits.

Concernant la méthode de contrôle, Les problèmes se posent en terme de résolution de conflits, choix d'un chemin, lancement d'opérations ou de produits :

- ***résolution des conflits*** rencontrés par le système de coordination et émanant soit de plusieurs demandes simultanées d'allocations d'un même moyen de transfert, soit de plusieurs demandes d'accès simultanés à un même lieu physique. Cette résolution est effectuée en évaluant des propriétés en fonction d'un certain nombre de paramètres (urgence d'un produit par rapport aux dates dues, durées opératoires, charge d'un moyen de production...). Cet aspect est développé au §2.1 du chapitre III.
- ***choix d'un chemin de transfert*** entre deux machines pour un produit : le routage d'un produit est effectué par affectation des moyens de transfert en fonction de la flexibilité du système de transfert (cas de ressources de production complexes) et en fonction de la flexibilité de l'ordre des opérations. Le routage est traité au §2.2 du chapitre III.
- ***lancement en temps réel des opérations de transformation d'état***, c'est-à-dire le choix de l'opération (parmi un ensemble d'opérations de différents produits en attente devant une machine) qui, lancée permettra de maintenir au mieux les objectifs de production. La méthode de réaction proposée permet d'adapter l'ordonnancement prévisionnel au contexte de l'atelier lorsqu'une perturbation survient. Les différentes actions correctives et leur utilisation sont présentées au §2.3 du chapitre III.

## Conclusion

Les différents domaines abordés en conception montrent bien la complexité des problèmes liés à la commande et au contrôle des systèmes à événements discrets. Pour bien prendre en compte les différents aspects de cette complexité, les modèles sont conçus en parallèle. La faisabilité de la transposition de la méthode CASPAIM aux systèmes hybrides (discret-continu) est proposée dans [Rakotoson 93]. Des études permettant d'introduire les contraintes en phase de spécification sont en cours [Yim et al 95]. Vue la multiplicité des informations manipulées dans les différents modèles, l'élaboration d'un référentiel permettant de définir une structure de données générique basée sur les concepts d'objets dynamiques évolutifs est étudiée dans [Maïk et al 94].

Nous avons situé la problématique du pilotage dans le cadre de la méthode CASPAIM. Nous allons maintenant définir des procédures permettant de réagir face aux perturbations. Pour mieux organiser le contrôle d'opérations, nous allons proposer une méthode permettant de regrouper les allocateurs en centres de décision. Nous utilisons une approche algorithmique pour le niveau décisionnel.

## **2. ANALYSE DES PERTURBATIONS DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION**

### **Introduction**

Nous allons présenter une analyse des perturbations, car elles sont l'une des sources importantes des problèmes rencontrés en phase opérationnelle. En effet, bien que ressources et produits doivent collaborer pour réaliser les objectifs de production, la perturbation causée par une des ressources peut se propager aux autres ressources et entraver le bon fonctionnement du système de production. La propagation de ces perturbations est due à la nature séquentielle du processus de fabrication.

### **2.1. Interaction des éléments d'un système de production**

Si le but essentiel de l'activité de production est de faire évoluer les produits vers un état d'achèvement précis, cette évolution au niveau élémentaire, nécessite la rencontre pendant un certain intervalle de temps, entre un produit en cours de fabrication et un moyen de production. Le déroulement de la production dans un atelier résulte des interactions entre les éléments de ces deux familles (ressources et produits), par le biais des événements que génèrent ces éléments.

Un événement survient dans le courant de l'activité de production par suite d'une évolution, prévue ou accidentelle, d'un ou plusieurs éléments des familles ressources, produits ou opérateurs. La prolifération plus ou moins contrôlée de ces événements, au cours du temps et à différents endroits de l'atelier, engendre son comportement global qui peut être perçu au travers d'indicateurs plus ou moins macroscopiques (quantités produites, productivité des opérateurs, taux et ratios de toute nature) ou plus individuels tels que les délais. Dans [Billaut 93], cette interaction est modélisée par RdP, et correspond au graphe des changements d'état d'une opération ou d'une ressources.

Cette prolifération d'événements émis par les éléments appartenant à la famille des ressources ou à celle des produits peut entraîner des retards importants sur la réalisation de la production planifiée. Ce sont en tout cas, ceux qui nous préoccupent le plus, dans la recherche d'un contrôle efficace de l'évolution de la production. Nous les désignerons en terme d'arrêts.

Tout système aussi perfectionné soit-il, est soumis à des perturbations d'origine internes ou externes [Berthul 85], [Zi 89]. Il est nécessaire de connaître ces perturbations, leur origine, leur conséquence ou leur interaction, et d'en tenir compte dans le système de pilotage

(lorsqu'elles sont quantifiables). Aucune tentative de classification, surtout lorsqu'elle concerne un domaine aussi diversifié que celui des ateliers flexibles, n'est exhaustive.

Nous n'insisterons pas, dans l'énumération des perturbations sur les arrêts liés aux problèmes externes à l'ateliers entraînant l'arrêt complet tels que :

- rupture d'alimentation en énergie,
- rupture de matière,
- paramètres externes de production tels que l'apparition de pièces urgentes, le changement de plan de fabrication, la suppression de ressources statiques, la modification des contraintes externes (par le niveau supérieur de gestion de production).

Ces problèmes externes ont une influence sur les performances du système, car ils correspondent à une insuffisance des ressources par rapport à la conception initiale de l'atelier, ou par rapport à la planification prévisionnelle de leur utilisation. Les causes d'arrêts dans une unité de production sont nombreuses et diverses [Tawegoum et al 92]. Nous allons énoncer quelques exemples, sans chercher à être exhaustif.

## **2.2. Définition des différents types d'arrêts**

### **2.2.1. Arrêts propres, Arrêts induits**

Chaque ressource ou produit peut provoquer un arrêt d'activité plus ou moins localisé, pour le produit, la ressource et les autres éléments du système de production.

Un *arrêt propre* d'un produit ou d'une ressource est un arrêt dont il est à la fois cause et victime [Rodde 89]. Le qualificatif "propre" est rattaché à la notion de propriété. La détection des arrêts propres revient en général à détecter et à mesurer le dépassement de délai alloué à telle ou telle opération.

Un *arrêt induit* est subi par un élément de production à la suite d'un arrêt propre, provenant d'un élément de la même famille ou d'une autre famille [Rodde 89]. Une panne machine correspondra à un arrêt propre pour la machine et à un arrêt induit pour les opération à réaliser sur cette machine.

### **2.2.2. Arrêts structurels**

Il arrive qu'en l'absence de toute cause de non fonctionnement, un certain nombre de ressources ou de produits soient bloqués en attente. Ces blocages se font pour des raisons qu'on

peut qualifier de *structurelles*, car liées à l'organisation de l'ensemble productif, et consomment du temps sans faire avancer le produit [Rodde 89].

Les arrêts structurels subis par les moyens sont essentiellement dus aux perturbations dans l'approvisionnement (ou acheminement), et dans l'évacuation des produits. Ils proviennent en général :

- soit de la difficulté d'obtenir un ordonnancement de production (où les temps d'attente sont nuls) ou de la difficulté rencontrée dans le lancement en fabrication,
- soit de l'insuffisance pendant un intervalle de temps, des moyens chargés de l'avancement physique des produits. (C'est par exemple le cas d'un robot chargé d'alimenter deux machines, et qui est le plus souvent consacré à une seule machine).
- soit de la répercussion d'aléas rencontrés sur les équipements voisins.

On peut également ranger dans cette catégorie, les temps nécessaires pour adapter le moyen de production au produit qui se présente : recherche, chargement et lancement du bon programme d'usinage.

### **2.3. Perturbation sur les ressources**

Les arrêts qui pénalisent le plus le rendement d'une machine ne sont pas forcément les plus longs (qui entraînent un arrêt de la ressource de production ou qui nécessitent un réglage de la ressource ou le changement d'un de ses composants), mais la multitude de micro arrêts de courte durée (de quelques secondes ou minutes, suite à un chargement de programme mal effectué ou suite à un blocage mécanique momentané), dont la somme finit par représenter une perte de temps significative. En général, les arrêts longs apparaissent plutôt pendant le début de la vie d'une machine, ou, lorsque la maintenance préventive n'est pas suffisamment assurée. Dans ce dernier cas, leur durée peut être démesurée par rapport à leur cause, si la complexité des machines demande un temps d'investigation important. Les causes des micro-arrêts, quant à elles peuvent se perpétuer longtemps dans la vie de la machine, car elles sont plus difficiles à cerner, et sont moins étudiées. Mais ces arrêts vont fortement influencer les performances des ressources de production.

Concernant les ressources de production, la différence entre un moyen de transformation d'état et un moyen transitique (transfert, manutention) réside dans ce que ces derniers introduisent de fait une temporisation, sans transformer l'état du produit qui leur est confié. Alors qu'un produit confié à un moyen de transformation d'état acquiert de la valeur

ajoutée, il n'en gagne pas à être transféré. Cependant, en tant que machine, un moyen transitive doit aussi être considéré comme une ressource également sujette à des arrêts.

### **2.3.1. Perturbation sur les ressources de transformation**

#### **2.3.1.1. arrêts propres, arrêts induits**

Les causes d'arrêts propres des ressources de transformation sont nombreuses et peuvent conduire, selon leur degré de gravité, à des situations différentes :

- ralentissement des machines se traduisant par une augmentation des durées d'usinage. Ce ralentissement peut être dû à un mauvais état d'outil ou à une usure prématurée d'outil. On peut aussi citer comme autre cause le dysfonctionnement des parties non cruciales des machines.
- arrêt momentané de la machine correspondant à un bris, à un manque d'outils, ou à un problème de chargement du programme d'usinage. L'arrêt momentané peut aussi être observé en l'absence de panne franche quand une ressource a besoin d'un réglage visant à lui redonner une fonction normale, par exemple vis à vis des exigences sur la qualité des produits.
- arrêt total d'une machine dû à un dysfonctionnement d'un de ses actionneurs principaux, ou à un dysfonctionnement du directeur de commande mettant hors d'usage toutes les possibilités de la ressource.

Ces arrêts propres sont détectables par mesure des dépassements de délais dont les durées sont soit prédéterminées, soit établies par mesure des opérations menées normalement. Ils peuvent entraîner un retard par rapport aux délais prévus, et des réductions de débit de production. Le séquençement initial des produits peut aussi s'en trouver modifié. Les arrêts propres d'un moyen de production induisent des arrêts subis par les produits en cours sur cet équipement, attendant que la panne soit résolue, s'il n'existe pas de ressources équivalentes. Les techniques de correction que nous allons présenter au chapitre suivant, permettent de limiter la portée des arrêts propres des ressources lorsqu'il existe des machines équivalentes ou polyvalentes.

Les causes les plus fréquentes d'arrêts induits surviennent lorsque les machines sont en attente de produits. Ces arrêts sont dus :

- à un allongement de temps de transfert (problème de routage) lié à un temps de séjour plus important dans les files d'attente intermédiaires,

- à un dépassement de délai des opérations précédentes, causé par la ressource de transformation ayant réalisé une des opérations précédentes.

### **2.3.1.2. Arrêts structurels**

La ressource de transformation peut s'arrêter d'elle même en cours de programme parce qu'une condition manque à la poursuite de celui-ci. Cela se produit par exemple lors d'une opération de changement d'outil programmée, si l'outil avec lequel il doit poursuivre l'usinage est absent du changeur d'outils, ou si l'emplacement devant recevoir l'outil à démonter n'est pas libre.

Le blocage par famine, en attente d'approvisionnement en produits est aussi un arrêt structurel. Le moyen de production se trouve en état de fonctionnement mais, pour des raisons qui lui sont extérieures, il ne peut participer à la production. L'arrêt structurel peut aussi consister en une saturation en sortie ou une attente d'évacuation (cas des capacités des capacités de stockage limitées entre machines) : c'est le cas inverse du précédent qui provoque le même effet de blocage de l'activité du moyen de production.

Les arrêts structurels ne sont donc pas imputables à la machine, mais à l'organisation qui l'entoure. La machine est en parfait état de fonctionner, mais arrêtée par une cause indépendante d'elle. Les conséquences de ces arrêts se traduisent :

- soit par des perturbations provoquant la baisse du débit des machines,
- soit par des perturbations entraînant des modifications du séquençement des opérations (changement local de l'ordre d'exécution des opérations, pour éviter des attentes non productives des machines),
- soit par des perturbations entraînant l'arrêt d'une machine (si la machine ne peut réaliser qu'un seul type d'opération).

## **2.3.2. Perturbation sur les moyens transitiques**

### **2.3.2.1. Convoyeur continu**

Nous allons considérer le cas particulier des convoyeurs continus, ensembles parfois complexes intégrant toutes les fonctions de base d'un réseau de transport : tronçons, aiguillages, jonctions, indexeurs, dérivateurs, etc.

**a- Arrêts propres, Arrêts induits**

L'arrêt propre correspond à tous les cas où le moyen transitaire n'est pas en mesure d'assurer sa mission en raison de son état :

- panne du moteur d'entraînement ou du vérin de translation,
- blocage mécanique entraînant soit un dysfonctionnement d'aiguillage nécessitant une réorientation des produits sur le chemin initial, soit un dysfonctionnement de butée provoquant une accumulation de produits.

Les arrêts induits correspondent quant à eux, aux aléas causés au fonctionnement du moyen transitaire :

- soit du fait de la palette transportée qui provoque l'arrêt de la chaîne d'entraînement par blocage mécanique,
- soit du fait du mauvais positionnement d'un produit sur une palette par un robot, qui n'active pas le capteur de détection de présence des pièces autorisant le débridage de la palette, et le transfert du produit vers la ressource suivante,
- ou d'un arrêt momentané d'une machine, entraînant une reprise d'opération.

Ces arrêts peuvent être détectés par le comportement de certains produits tels que l'augmentation de charges de certains tronçons du convoyeur, la réorientation fréquente de certaines palettes, l'allongement de certains temps de transfert.

**b- Arrêts structurels**

Ce type d'arrêt se produit généralement dans les emplacements de stockage de sortie. L'arrêt structurel peut également survenir :

- lorsqu'un moyen de manutention en fonctionnement et en raison des règles de priorités, est obligé de marquer des temporisations à certains endroits, pour laisser passer des produits plus prioritaires,
- ou encore lorsqu'il doit venir en accumulation derrière d'autres moyens semblables. C'est par exemple le cas dans une file d'attente. Lorsqu'une palette chargée parvient sur une zone de déchargement, elle est libérée de la chaîne d'entraînement et doit attendre son tour pour passer au point de déchargement.

Il s'agit d'attentes dont la durée est exclusivement dépendante des contraintes du moment, en dehors de toute anomalie technique du convoyeur.

### **2.3.2.2. Robot de chargement/déchargement**

#### ***a- Arrêts propres, Arrêts induits***

Dans le cas des robots simples, les arrêts propres sont dus soit à la défaillance d'un de ses actionneurs principaux, soit à une répétabilité non satisfaisante, soit à un problème de commutation sur une mauvaise trajectoire. Pour des robots munis de systèmes de reconnaissance, en plus des causes précédentes, l'arrêt propre peut être dû à une imperfection du système d'identification associé au robot (lecture de code non déclenchée; mauvaise identification des capteurs de détection de présence, ce qui engendre des collisions entre pièces et robots, et empêche ce dernier d'atteindre le point de consigne; algorithme de reconnaissance imparfait, etc.).

Les causes d'arrêt induit des robots proviennent essentiellement des produits. La cause la plus fréquente est un écart géométrique important par rapport aux tolérances acceptées par le robot : ces écarts sont dus au mauvais positionnement des produits sur leur support, par un autre robot ou le système de manutention. On peut aussi citer dans ces arrêts induits ceux dus à une reprise d'opération par la machine que le robot est chargé d'alimenter.

L'arrêt peut aussi être dû au produit : s'il s'agit d'un produit mal orienté, ou si l'identification est illisible; dans ce cas il s'agit d'un arrêt induit, pour cause de "produit non identifiable", ou de défaut du capteur de détection de présence.

#### ***b- Arrêts structurels***

Dans certaines applications, le déroulement d'une phase de travail du robot peut être tributaire de conditions extérieures telles que non-interférence avec un autre robot ou partie mécanique en mouvement simultané, mise à disposition d'une autre pièce ou d'un composant, etc.

L'arrêt structurel peut être étendu aux phases au cours desquelles le moyen exécute à vide un déplacement préalable ou consécutif à son état productif, ce déplacement étant destiné à le repositionner pour recevoir un nouveau produit (circulation palette vide).

Les conséquences de ces arrêts peuvent être limitées par une bonne utilisation des ressources et un contrôle permanent de leur allocation.

## **2.4. Perturbations sur les produits**

### **2.4.1. Arrêts propres, arrêts induits**

Contrairement aux ressources, les produits n'ont aucune activité propre, car ils subissent des transformations réalisées par les autres éléments du système de production. Ainsi, les arrêts propres et induits des produits sont liés.

L'origine des arrêts propres des produits proviennent essentiellement des problèmes de qualité liés à la nature des produits et qui résulte d'un dysfonctionnement des ressources de production. Ainsi, l'arrêt propre d'un produit peut provenir du fait que :

- une pièce défectueuse provoque un accident (blocage d'un mouvement, casse d'outil, etc.) sur la machine où il se trouve.
- un produit mal positionné qui déclenche un arrêt d'urgence.

Les arrêts induits proviennent aussi des arrêts propres des ressources de transformation d'état ou de position, ou du ralentissement de ces ressources.

### **2.4.2. Arrêts structurels**

L'arrêt structurel d'un produit peut se faire suite à une attente devant un moyen de production, pour changement de réglage et d'outillage. Ce type d'arrêt est bien consécutif à l'organisation autour du produit, car il résulte en partie des règles d'ordonnancement des flux de produits dans l'atelier.

L'attente liée à une recherche d'informations ou une attente liée au processus de décision peut être considérée comme un arrêt structurel, si elle n'est pas faite en temps masqué.

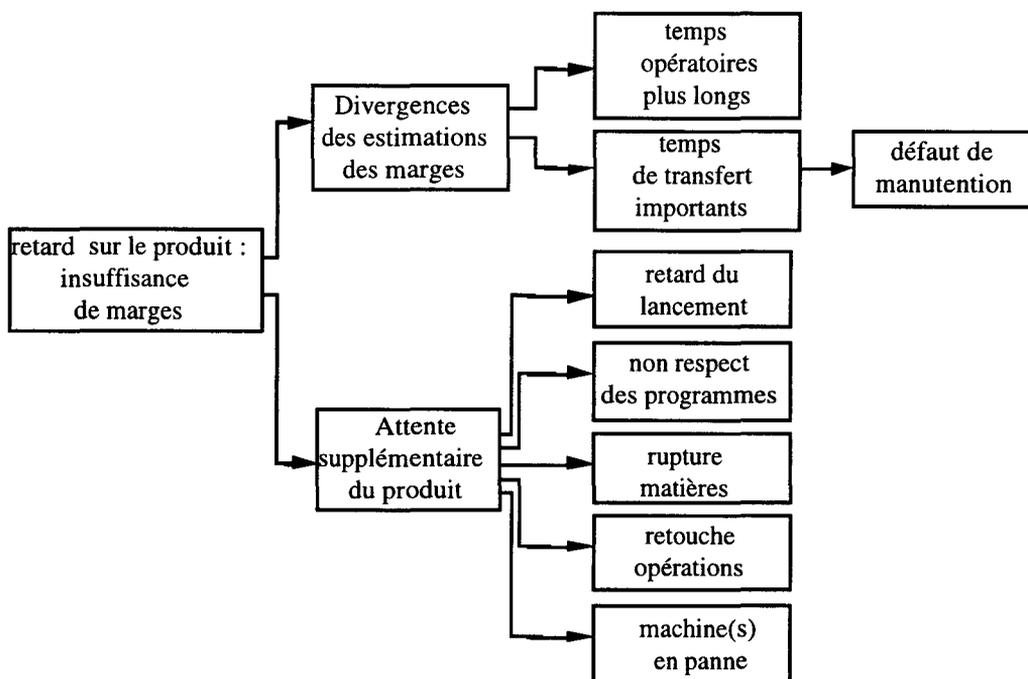
## **2.5. Interaction des perturbations**

Nous venons de qualifier les types d'arrêts pouvant survenir en phase opérationnelle. Ces arrêts sont très liés les uns aux autres, si bien que la frontière entre les différents types n'est pas toujours stricte. Pour illustrer cette interaction, nous allons présenter dans ce paragraphe les arbres de perturbation. Partant des causes élémentaires, nous avons énuméré les relations qualitatives successives entre causes et conséquences d'une perturbation. Ces liens sont représentés sur les schémas suivants. Ces arbres montrent la relation qualitative entre les

anomalies constatées et les causes d'arrêts ou perturbations sur les produits, machines et opérations. Dans ces schémas, le sens de la flèche signifie "est dû à" ou "a pour origine"

Ces arbres peuvent éventuellement être utilisés pour rechercher la cause d'une perturbation. Cela permettrait d'éviter les ressources responsables du ralentissement de la production, et de mieux orienter les produits.

La figure II.5 montre par exemple que le retard (dû à une insuffisance de marge) d'un produit peut être dû à une divergence des estimations des marges (définie au chap. III §3.1) ou à une attente supplémentaire en phase de production. Les divergences d'estimation quant à elles sont liées au temps opératoire plus long ou au temps de transit plus important; ce dernier pouvant être la conséquence d'un défaut de manutention.



**Figure II.5 : Arbres des origines-conséquence des perturbations pour un produit**

La figure II.6 présente le lien entre les perturbations de base et leurs effets sur l'exécution d'une opération. Il permet de voir que le retard sur l'exécution d'une opération peut être dû à une attente imprévue, à un changement de priorité, à un manque d'outils ou à une divergence des durées opératoires. Le changement de priorité peut être dû aux contraintes externes (telles que le changement de délais ou la demande d'usinage de nouveaux produits) ou un dysfonctionnement des ressources.

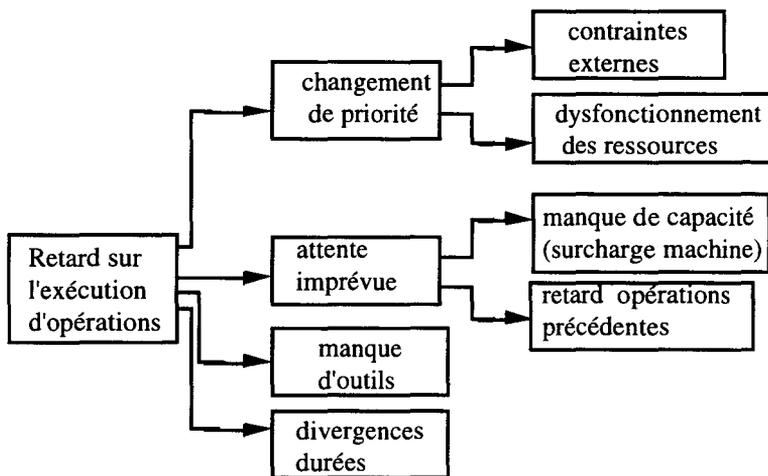


Figure II.6 : Arbres des origines-conséquence des perturbations pour les opérations

La figure II.7 présente les relations qualitatives entre les perturbations de base et leur effet sur la charge d'une machine. La surcharge sur une machine peut se faire suite à un changement de travail (modification de l'ensemble des opérations à réaliser), à un ajout de produits, ou à un arrêt ou une panne de machine.

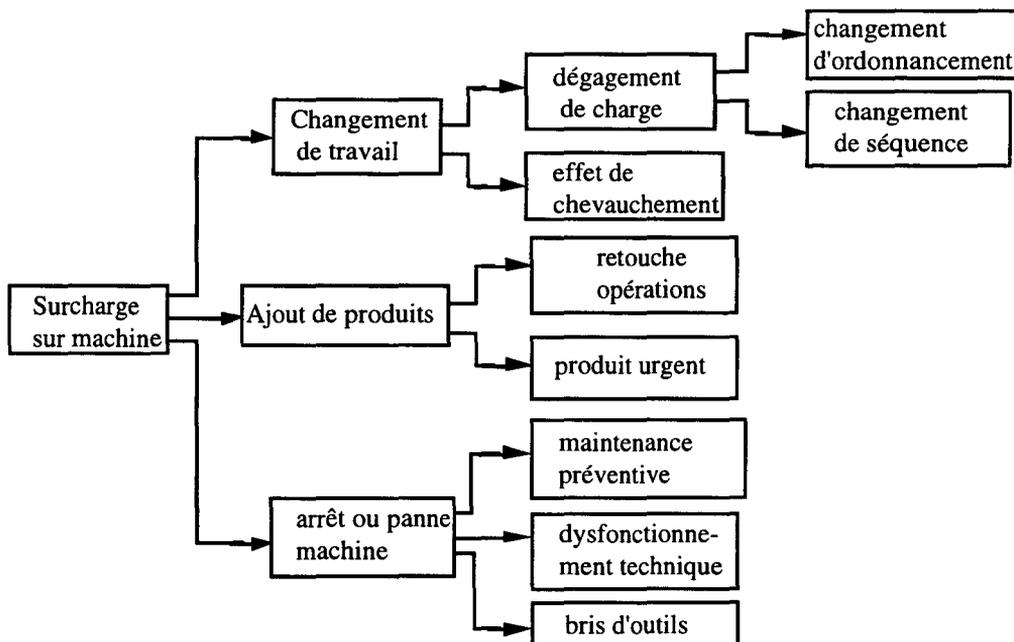


Figure II.7 : Arbres des origines-conséquence des perturbations pour les machines

## 2.6. Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie, différents types de perturbations auxquelles on doit faire face pour assurer le bon déroulement de la production. En effet, les ressources interagissent les unes sur les autres par l'intermédiaire des produits qu'elles doivent transformer. Cette interaction montre la difficulté à statuer en temps réel sur l'origine d'une perturbation.

Les exemples précédents illustrent quelques uns des problèmes qui font que certaines unités de production, bien que dégagée d'aléas d'ordre techniques, éprouvent des difficultés à atteindre un bon niveau de performance. Un mauvais équilibre des capacités des ressources de production, un système transitive peu flexible, un système de réaction inefficace peuvent conduire à des situations d'indisponibilité de produits devant les machines. Ces situations d'indisponibilité sont causées d'arrêts induits ou structurels, pouvant survenir à tout moment et perturber le système de production.

Pour éviter la propagation des arrêts propres ou des perturbations d'une ressource aux autres, nous proposons un contrôle du déroulement des opérations, en utilisant des fonctions de priorité et le routage dynamique des produits pour les opérations de transfert, et des techniques de réaction pour une meilleure utilisation des ressources de transformation d'état. Ce contrôle est plus efficace lorsque les allocateurs de ressources sont bien organisés.

## 3. ORGANISATION DU PILOTAGE (CONTROLE) TEMPS REEL

### 3.1. Problématique

Dans un système manufacturier de grande taille, le nombre d'équipements à gérer est souvent important, et il est nécessaire d'organiser leur fonctionnement. A cause de l'indépendance opérationnelle des équipements, le système de production peut être considéré comme distribué par nature. En phase opérationnelle, les unités de contrôle de ces équipements doivent coopérer au mieux, ce qui nécessite de les organiser de manière à maintenir la cohérence des décisions prises dans la cellule et dans l'atelier par rapport aux consignes de production, et à réagir dans un cadre restreint aux opérations concernées par une perturbation.

Cet objectif est difficile à assurer. En effet, l'augmentation de la flexibilité des systèmes, et les indéterminismes de l'environnement de production compliquent le problème du

contrôle du déroulement des opérations. Les arrêts de production inattendus rendent difficile la structuration systématique des décisions. Ces décisions sont de plus difficiles à organiser parce que les instants où elles doivent être prises ne sont pas prédictibles [Stecke 85], [Slomp et al 90].

Certaines décisions après une perturbation ne nécessitent pas la connaissance complète du système de production, et peuvent être prises par un coordonateur des centres de décisions (ou niveau intermédiaire). Comment regrouper les contrôleurs de ressources de production pour une décision rapide et cohérente?

Les différentes approches de contrôle de production définissent une hiérarchie en quatre ou cinq niveaux dépendant de la décomposition fonctionnelle de la gestion globale de production [Ranky 90b], [Esteban 92]. A chaque niveau de la hiérarchie, correspond une fonction de gestion précise. Ces décompositions donnent très peu d'informations sur la façon d'organiser en temps réel le contrôle des ressources, mais correspondent plutôt à l'organisation globale du contrôle de production. Le CIM quant à lui, n'apporte aucune précision sur le contrôle temps réel, mais présente une structure générale de conception ou d'organisation du système d'informations, permettant une communication aisée entre les entités de production.

Cet aspect de l'organisation du contrôle est très peu abordée dans la conception de l'architecture de commande des systèmes de production flexible, alors que le comportement du système de production en phase opérationnelle dépend aussi de l'organisation des allocateurs de ressources. Cette organisation consiste en une bonne coordination des différentes entités de production, qui tient compte de la structure du système, de la fonction de chaque ressource et de la coopération entre ces ressources.

La fonction du pilotage est de contrôler l'évolution de la production. L'activité de production peut se résumer en terme d'interaction entre ressources et produits, et d'échange de produits entre ressources. Dans ce cas, quelles ressources contrôler mutuellement pour pouvoir assurer le bon contrôle du déroulement de la production? En répondant à cette question nous cherchons à assurer le plus simplement possible l'organisation structurelle (domaine d'interaction) et fonctionnelle (hiérarchie et communication) des décisions. Nous proposons d'organiser les allocateurs de ressources pour une prise de décision rapide et cohérente dans un cadre minimal. Nous allons définir en premier lieu les centres de décision de base, puis montrer comment obtenir et construire les autres centres de décision.

## 3.2. Types d'architecture de contrôle

Cette section décrit les architectures de contrôle hiérarchique et hétérarchique (distribuée) [Veeramani et al 93], et présente les principes de communication dans chacune des deux approches. Nous présentons aussi l'approche mixte que nous avons adoptée pour l'organisation du contrôle opérationnel.

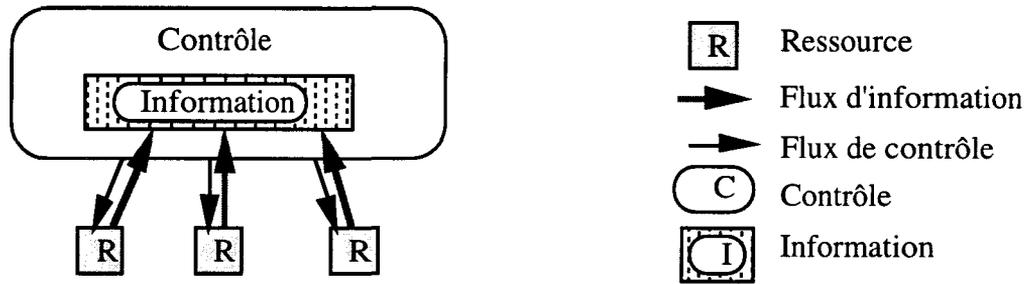
### 3.2.1. Architecture de contrôle hiérarchisé

Le gestionnaire d'atelier dans une architecture de contrôle hiérarchique est basé sur une structure pyramidale, dans laquelle le système manufacturier est décomposé en plusieurs niveaux "d'autorités" [Ranky 90b]. Le contrôle se fait sous la surveillance d'un superviseur (niveau décisionnel supérieur), sous la forme d'une boucle de rétroaction (communication directe entre ressources et niveau supérieur), ce qui limite les communications entre centres de décision à un flux vertical. Ces communications sont alors très réduites par rapport à celles effectuées dans les architectures distribuées.

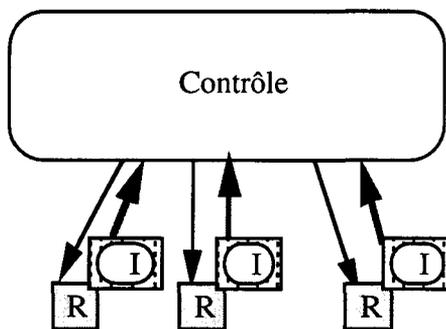
Au niveau le plus bas de la hiérarchie, on trouve les ressources physiques telles que les machines ou autres actionneurs qui ont la responsabilité d'exécuter les actions planifiées par le niveau supérieur, sans les remettre en cause. Ces ressources doivent informer ou rendre compte à leur niveau supérieur du déroulement de la tâche qui leur a été attribuée. Une entité au niveau intermédiaire de la hiérarchie affine la commande issue du niveau supérieur et fournit des ordres au niveau inférieur. Le niveau supérieur de la hiérarchie est responsable de la planification des actions.

Le fonctionnement de cette hiérarchie est lié aux échanges d'informations inter-niveaux. La difficulté majeure rencontrée dans les architectures de contrôle basées sur ce principe de fonctionnement apparaît lorsqu'un noeud inférieur est dans l'impossibilité d'exécuter le service correspondant à une requête du niveau supérieur. Dans ce cas, la requête doit être transmise au niveau supérieur, car il n'existe pas de communication entre centres de même niveau.

L'approche hiérarchique n'est pas adaptée à la restructuration du système et peut devenir très complexe avec la taille et la complexité du système manufacturier. En prenant en compte la répartition d'informations, nous obtenons les deux architectures de contrôle suivantes [Lin et al 91] :



**Figure II.8 : Architecture de contrôle hiérarchisé :**  
 Décision et Informations centralisées



**Figure II.9 : Architecture de contrôle hiérarchisé :**  
 Décision centralisée et Information distribuée

Ce type d'architecture présente une haute sensibilité aux pannes, à cause de l'interdépendance forte entre le superviseur et les autres centres de décision. La multiplication des niveaux accroît la complexité du contrôle (car les centres de même niveau ne communiquent pas), et la tolérance aux fautes diminue.

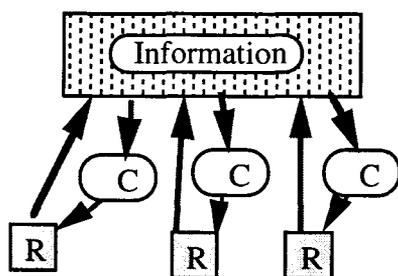
Dans [Chunsheng et al 91] et [Wang et al 90], le contrôle des ressources se fait de façon hiérarchique. Le niveau intermédiaire de coordination est chargé de décomposer les tâches avant de les transmettre aux contrôleurs de ressources.

### 3.2.2. Architecture de contrôle réparti

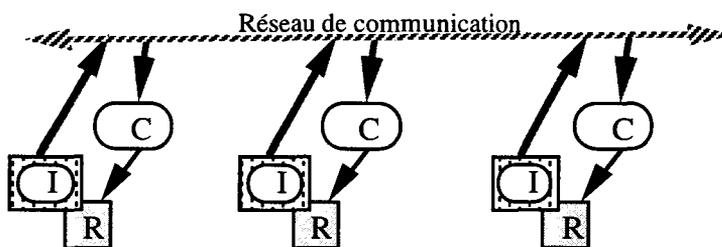
A l'opposé de l'approche hiérarchisée, l'architecture hétérarchisée (décentralisée) consiste en une association entre entités autonomes qui réagissent sur des informations échangées entre elles pour atteindre leur but individuel ou le but du système [Veeramani et al

93]. Le contrôle utilise un mécanisme d'acteurs indépendants et le principe d'organisation est celui des systèmes multi-agents.

Le principe des systèmes multi-agents est de partager, classer et distribuer à plusieurs agents intelligents l'ensemble des connaissances que le système possède (figure II.10). Chacun de ces agents est à même, de par l'expérience qu'il renferme, de résoudre une partie du problème si les données dont il dispose le permettent [Choulet et al 93]. Un système multi-agent peut être comparé à une population d'agents en interaction. Chaque agent est une entité réelle ou virtuelle plongée dans un environnement sur lequel il est capable de réagir. Il dispose d'une capacité de perception et de représentation partielle de cet environnement, possède un comportement autonome conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions qu'il entretient avec d'autres agents. Cette indépendance des agents due à l'organisation conduit à des décisions modulaires par essence.



**Figure II.10 : Architecture de contrôle réparti**  
 Décision distribuée et information centralisée



**Figure II.11 : Architecture de contrôle réparti**  
 Décision distribuée et information distribuée

Ce type d'architecture convient mieux aux systèmes de production nécessitant un ordonnancement temps réel et aux systèmes de production de petite taille. Grâce à la faible sensibilité aux pannes, la robustesse de l'architecture de contrôle est très grande, ce qui permet

aussi une adaptation plus souple aux perturbations. La modularité présente dans cette architecture, permet d'avoir une architecture de contrôle très évolutive et moins sensible à l'augmentation de la taille du système de production. Les décisions sont basées sur des informations locales (Fig II.11) ou globales (Fig II.10).

### **3.2.3. Architecture de contrôle mixte [Tawegoum et al 94b]**

Les approches distribuées ou centralisées atteignent leur limites lorsque la taille du système croît. Pour des systèmes de production de grande dimension, la mise à plat des différents organes de contrôle, ou le contrôle par un centre unique n'est pas satisfaisant à cause de la complexité de gestion qu'elle entraîne.

Pour bien appréhender la complexité du contrôle, il est préférable d'adopter une approche mixte. L'approche que nous proposons consiste en une organisation mixte incluant les aspects distribués et hiérarchiques. La distribution des décisions permet de réduire la complexité du contrôle et de décider plus rapidement par rapport aux opérations concernées par une perturbation. Ceci confère une autonomie partielle aux centres de décision et évite des requêtes systématiques, et souvent inutiles, en cas de perturbation, au centre de décision de niveau supérieur.

La hiérarchisation ou la coordination permet de coordonner les centres de décision en conflit, et d'éviter les décisions contradictoires qui peuvent dégrader les performances du système de production. Ainsi, un élément prenant une décision opérationnelle est le composant de coordination sur lequel serait logiquement "regroupé" le contrôle des ressources contribuant à la réalisation d'une tâche élémentaire. Cet élément est en charge de contrôler la bonne exécution de l'ordonnancement prévisionnel, par l'utilisation des degrés de liberté offerts par cette structuration en centres de décision. Ceci suppose que le centre de décision contienne un ensemble de méthodes de réaction, ait la connaissance de l'ordonnancement prévisionnel et une mise à jour régulière des données reflétant l'état de l'atelier.

La solution adoptée permet de répartir la décision. Appliquée à l'ensemble du système de production, cette organisation du pilotage donne une arborescence de contrôle ayant plusieurs noeuds décisionnels. Dans cette arborescence, les centres décisionnels locaux sont chargés du contrôle direct des ressources et les niveaux coordonnateurs sont chargés d'arbitrer entre deux ou plusieurs centres sous leur contrôle lorsque ceux-ci sont en conflit.

### **3.3. Organisation des centres de décision [Tawegoum et al 94b]**

Cette section concerne la définition des différents types de décision et la représentation de la méthode qui permet de construire ou d'obtenir l'organisation des niveaux du contrôle temps réel.

#### **3.3.1. Définition des types de décision**

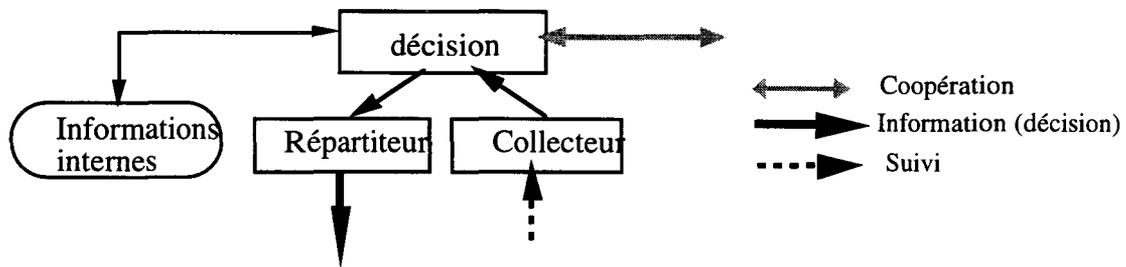
Comme nous l'avons vu au §2.3 de la partie précédente, deux types de ressources de base peuvent être distinguées dans un système de production :

- les ressources de traitement (machines de tournage, fraisage, robots d'assemblage, etc.)
- les ressources transitiques ou de transfert (robots de transfert, convoyeurs).

C'est l'interaction entre ces ressources et les produits à transformer qui constitue l'activité de production. Les décisions de base en phase opérationnelle consistent à permettre ou non l'utilisation de ces ressources. La réalisation complète d'une tâche élémentaire par un centre de décision consiste à la choisir parmi d'autres tâches élémentaires, et à traiter le produit ou à le transférer vers le prochain point de décision. Puisque le comportement des ressources de production n'est pas entièrement déterministe, les produits n'arrivent pas toujours dans les files d'attente des ressources dans l'ordre prévu. Par conséquent, leur ordre doit être modifié pour respecter le mieux possible le séquençement prévisionnel.

Ceci peut se réaliser par le contrôle des entrées des produits dans les files d'attente des ressources de transformation, et nécessite de prendre en compte un autre composant de transfert dans la réalisation de la tâche élémentaire. Ce contrôle, réalisé en amont des machines, évite les remises en cause fréquentes de l'ordre des produits dans la file d'attente. Ce contrôle peut aussi s'étendre au cheminement des produits dans les composants connexes, et à l'échange de produits entre composants connexes.

Puisque chaque centre de décision s'inscrit dans un ensemble de centres, dans lequel il y a des échanges de données avec des centres équivalents et des requêtes vers le centre de coordination en cas de difficulté de décision, nous proposons la structure générique suivante pour la construction des centres de décision.



**Figure II.12 : Structure d'un centre de décision**

Chaque centre de décision dispose des possibilités suivantes de communication :

- les liens d'information permettent de fournir aux différents centres les nouvelles décisions liées à l'évolution de la production,
- les liens de suivi permettent une communication inter-niveau dans le sens ascendant, les données étant collectées par le collecteur,
- les liens de coopération permettent une communication entre centres de décision de même niveau appartenant au même centre de coordination.

Pour mettre en oeuvre ce contrôle nous allons introduire les types suivants de décision, associée aux centres de décision :

- **centre de décision locale** : Il concerne la réalisation d'une tâche élémentaire. Une tâche élémentaire consiste à traiter le produit ou à le transférer vers un autre centre de traitement. Un centre de décision locale est composé des décisions de base obtenues par combinaison des ressources suivantes : R+T (un routage lié à un traitement sur la ressource de transformation d'état) ou R (un routage : détermination du chemin) ou T (un traitement : opération d'assemblage par exemple).
- **centre de décision coordonnée** : C'est le niveau supérieur des centres de décisions locales. Il regroupe plusieurs centres de décisions locales. Cette coordination est déduite de l'agrégation structurelle et fonctionnelle des composantes du système de production comme il sera montré au paragraphe suivant. Un centre de coordination est un niveau de décision ayant plus d'un sous-niveau de décision.

Les centres décisionnels locaux sont chargés de mettre en oeuvre l'ordonnancement prévisionnel (au niveau individuel des ressources de transformation) et les niveaux coordonnateurs chargés d'arbitrer entre deux ou plusieurs centres sous leurs contrôles lorsque ceux-ci sont en conflit.

La différence ici avec l'approche hiérarchique, est qu'un niveau intermédiaire (centre de décisions coordonnées) peut fournir une décision, si les opérations ou produits appartenant à ses centres de décisions locales sont conflictuels. A chaque niveau de décision, le choix est élaboré selon un processus constitué de trois étapes qui seront présentées au chapitre III. §1.4 : détection, qualification et décision.

Le module décision sera présenté en détail au chapitre suivant, et nous montrerons dans le cadre des actions correctives, comment deux ressources peuvent coopérer lorsque l'une d'elles est en difficulté.

### **3.3.2. Organisation du niveau de contrôle temps réel**

L'architecture de contrôle d'un système de production est généralement construite autour ou à partir des ressources de traitement. Généralement le système de transport est traité séparément (ou mieux son contrôle est regroupé au sein d'une même entité). Cette méthode d'organisation n'est pas efficace pour le contrôle des opérations parce que les ressources de transfert et celles de traitement qui concourent à la réalisation des opérations ne sont pas considérées ensemble, dans un même centre de décision. Par exemple, une butée chargée de stopper une palette est toujours considérée comme étant contrôlée par le système de transfert, et n'est pas considérée comme une ressource appartenant à la machine virtuelle constituée par la ressource de transformation et son robot de transfert. Nous pensons qu'une ressource complexe tel qu'un convoyeur continu doit être décomposé logiquement en différents composants tels que butées, aiguillages, etc. De l'étude de différentes architectures de systèmes de production, nous avons pu dégager les règles suivantes, qui permettent d'obtenir une organisation logique des allocateurs de ressources en centres de décision.

#### ***3.3.2.1. Répartition des centres de décisions***

Pendant la construction de la hiérarchie du niveau de contrôle temps réel, une attention particulière doit être portée sur la progression des produits dans l'atelier, parce que la fonction de pilotage selon notre point de vue vise à contrôler l'évolution de la production par le suivi des produits en phase opérationnelle, dans le but de respecter les objectifs de production. Ainsi, à chaque instant, chaque produit sera sous le contrôle d'un centre de décision bien défini. Pour ces raisons, notre classification est basée sur une idée simple consistant à :

- regrouper les ressources élémentaires adjacentes contribuant à la réalisation d'une tâche élémentaire (c'est-à-dire celles utiles à la réalisation d'une tâche élémentaire),

- assembler (agrégation) progressivement les composantes fortement connexes réalisant les opérations élémentaires, en utilisant les relations d'accessibilité entre ressources.

Considérant ce principe, nous obtenons les règles suivantes de l'agrégation conduisant à l'organisation des centres de décision du pilotage.

- 1- Identifier les ressources commandables de base** (machines, robots, butée, aiguillages, etc.)  
[ Cette étape consiste en une mise à plat des différentes ressources commandables ]
- 2- Identifier les postes singuliers** (machine+robot+butée)  
[ Cette étape permet de déterminer les ressources contribuant à la réalisation d'une tâche élémentaire. Elle correspond à la construction des postes de travail au sens PTA permettant l'arrêt et le transfert automatique d'un produit sur une ressource de transformation d'état ]
- 3- Former le centre de décision locale de traitement** (par ajout d'un aiguillage amont)  
[ Cette étape permet de sélectionner les produits de façon à les introduire dans la file d'attente des machines, selon le séquençage prévisionnel. Le centre de traitement local peut être assimilé à une machine virtuelle, ce qui revient à découpler l'aiguillage et la butée d'arrêt de l'ensemble du convoyeur (qui a été décomposé en différents éléments commandables dans l'étape 1). ]
- 4- Agréger les centres de décision locaux ayant des ressources partagées** (transfert, traitement, emplacement de stockage).  
[ On regroupe dans cette étape sous le même centre coordonnateur, les centres de contrôle des ressources pouvant fréquemment entrer en conflit., à cause de la demande d'utilisation simultanée d'une même ressource ]
- 5- Agréger les ressources mutuellement accessibles par deux ou plusieurs systèmes de transfert** (deux robots, un aiguillage convergent)  
[ Ce regroupement vise à établir une relation entre centres de décision pouvant s'échanger des produits, et à organiser l'accessibilité multiple à un même moyen de stockage ou de transformation ]
- 6- Agréger les aiguillages convergents et divergents adjacents n'appartenant pas à un centre de décision locale.**

[ On regroupe les sections du convoyeur qui ont une fonction purement de transfert, car elles ne contribuent pas à l'acheminement direct des produits au pied des machines. Ces sections peuvent amplement être utilisées dans le cadre du routage dynamique ]

**7- Agréger les composants connexes du point 1** [ressources commandables de base] **en incluant 3** [Centre de décision de traitement] **et 6** [Aiguillages adjacents]

[ (poste singulier autour du convoyeur : ensemble des circuits minimaux permettant l'échange des produits) . On veut ici regrouper les centres de décision afin de s'assurer de la maîtrise du cheminement des produits, dans une composante connexe du convoyeur ]

**8- Agréger les composants du point 2** [postes singuliers] **communicant et ceux du point 7.**

[On intègre ici les postes singuliers et autres composants connexes pour former le niveau décisionnel supérieur principal]

L'application de ces règles de façon opérationnelle conduit à l'obtention de l'arborescence des centres de décision.

### 3.3.2.2. Communication entre centres de décisions

Par rapport à cette organisation, une transaction à l'intérieur d'un niveau et entre les niveaux de décision peut être définie de la façon suivante :

- **communication horizontale** : elle correspond aux centres de décision appartenant à un même niveau de coordination. Ceci suppose que les contraintes initiales sur les opérations restantes des produits concernés par cette communication ne peuvent pas être modifiées par un centre de décision locale. Dans cette communication locale, nous pouvons avoir une réaction locale sur un poste singulier, une consommation de marge par anticipation, une coopération par échange ou transfert d'opérations (techniques de réaction développées au chapitre III) si les dates des opérations suivantes ne sont pas modifiées. Dans ce contexte, une communication directe entre centres de décision locaux adjacents est permise.

Les opérations concernées appartiennent uniquement aux deux centres de décision. Il n'est pas nécessaire de faire appel à leur coordonnateur pour résoudre le problème.

- **communication verticale** : Elle se fait à l'initiative d'un sous-niveau incapable de résoudre un problème dû à une perturbation et qui peut causer un dépassement de date due des produits. Ce sous-niveau doit émettre une requête au niveau de coordination auquel il appartient, afin que ce dernier apporte une solution. Si les opérations concernées par la perturbation n'appartiennent pas à ce niveau de coordination une nouvelle requête est émise par le centre de coordination jusqu'à atteindre le centre de décision de coordination en charge de contrôler les opérations restantes.

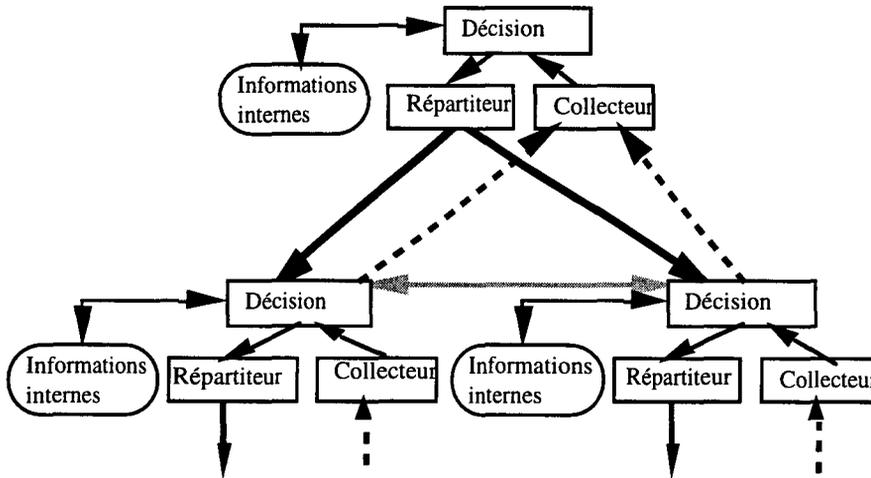


Figure II.13. Hiérarchie et coopération entre centres de décision

Un centre de décision local ne peut pas appartenir à deux centres de décisions coordonnées différents. On ne remonte pas toujours au niveau le plus haut pour compenser une perturbation. Cette coopération se fait toujours entre deux centres de décision de même niveau. Si un troisième doit intervenir, il est souhaitable d'envoyer une requête de règlement de litige entre les trois centres à leur centre coordonnateur.

Cette organisation n'est pas fonctionnelle, car la seule fonction existante est celle du contrôle des opérations. Cette fonction de contrôle est la même à chaque niveau, mais l'étendue ou la portée (position du centre de décision chargé de régler un conflit) d'un centre de décision dépend de l'ampleur de la conséquence de la perturbation à corriger.

### 3.3.2.3. Exemple

L'application des règles d'agrégation précédentes sur l'exemple décrit au §1.5.2 (figure II.3) du chapitre I, nous permet d'obtenir l'organisation des allocateurs de ressources en centres de décision représentée par la figure II.14. Nous avons représenté les différents éléments

commandables du système physique. Il ne s'agit pas en réalité d'un regroupement des organes de commande réels, mais d'une agrégation logique [Erschler et al 88], organisation définissant la coopération que ces éléments doivent avoir entre eux, pour assurer un contrôle harmonieux du déroulement des opérations en phase opérationnelle.

Au niveau le plus bas de la hiérarchie, nous avons les ressources élémentaires commandables regroupées en postes singuliers. L'organisation des centres de décision nous permet d'obtenir quatre centres de décision locale et deux centres de coordination. Cette agrégation fait apparaître successivement, les postes singuliers, les centres de décision locale, les centres de décision coordonnées, et le niveau supérieur responsable du contrôle de tout le système.

La notion de coordination apparaît lorsque les centres de décision locale ont été déterminés, et que, par leur fonction, ils doivent coopérer ou éventuellement entrer en conflit soit parce que les opérations qu'ils peuvent réaliser sont identiques, soit parce qu'un produit a des opérations permutables (gamme flexible) potentiellement exécutables, ou lorsque deux opérations successives d'un produit doivent être réalisées par l'un des centres, puis par l'autre.

Le centre de décision locale constitué de (P2, T, R1, A2, J1, P1, P4) prend en charge le contrôle des produits évoluant dans cette composante fortement connexe du convoyeur. Il peut coopérer avec le centre de décision contrôlant (P3, CU1, R2, P5, A1, J2, P6, A3), dans le cadre des techniques de correction que nous allons présenter au chapitre III. La coopération peut se faire parce que le produit perturbateur doit passer sur T puis sur CU1.

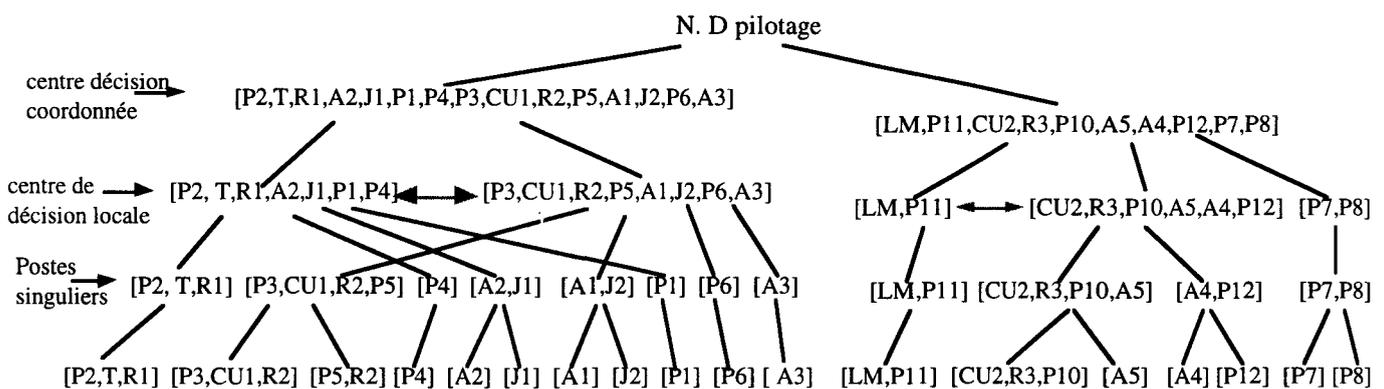


Figure II.14 : Hiérarchie des centres de décision du système de production

Les règles de regroupement que nous avons définies, permettent d'obtenir une agrégation rigoureuse et systématique des centres de décision, organisation dans laquelle chaque organe de commande effectif est logiquement associé à un centre de décision unique. Nous

allons présenter en annexes deux autres systèmes de production différents par leur architecture de transfert, puis donnerons l'organisation des centres de décision obtenus par application des règles précédentes. On remarquera que, lorsque le système de transfert n'est pas bien conçu, il n'est pas aisé d'assurer une bonne organisation des allocateurs de ressources.

#### **3.3.2.4- Prise en compte des capteurs dans la construction des centres de décision**

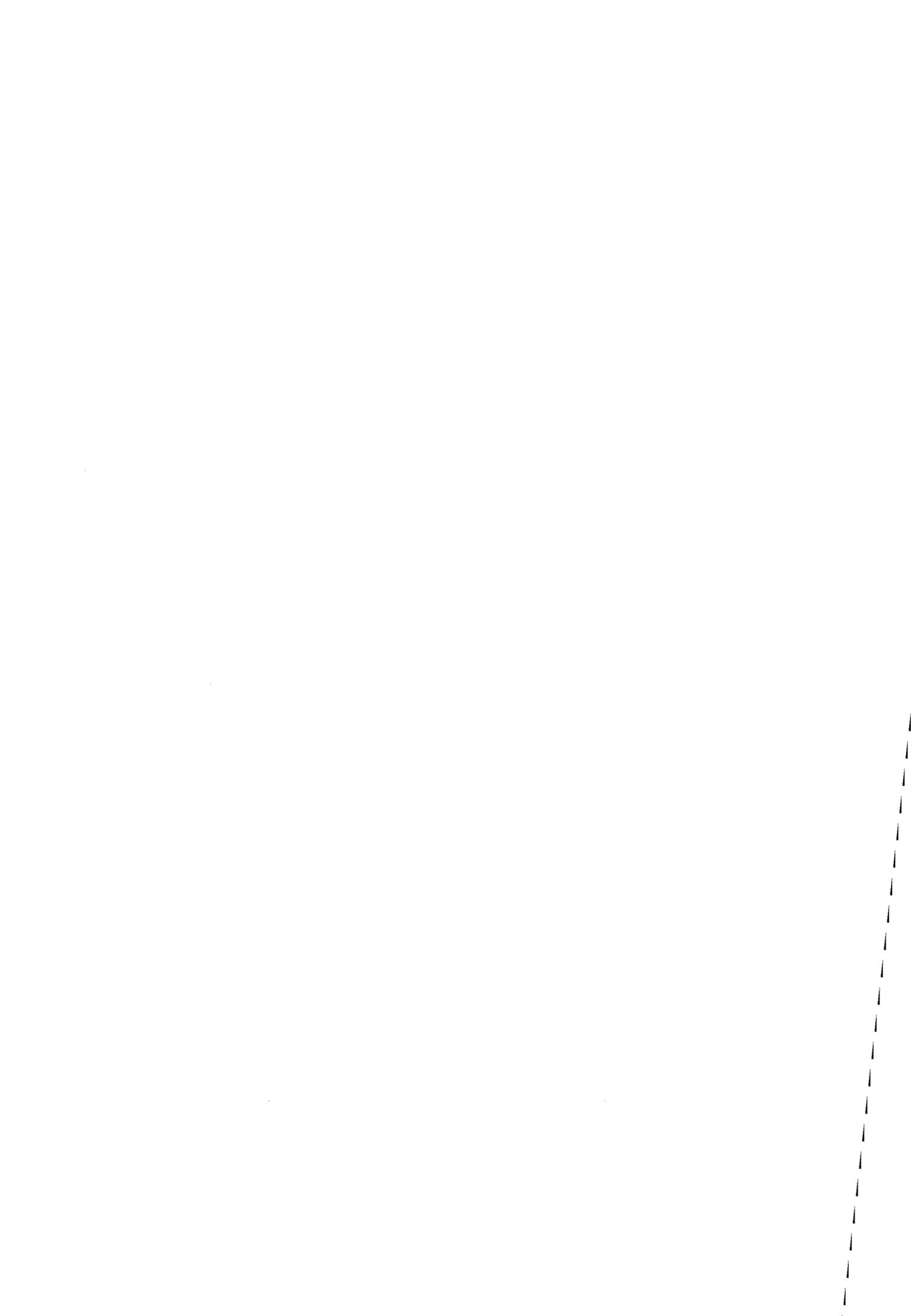
La figure II.2 de ce chapitre représentant l'architecture complète du contrôle commande permet dans sa structuration, de prendre en compte les aspects liés à la surveillance. Dans notre organisation du pilotage en centre de décision, nous n'avons pas considéré les capteurs. En effet le contrôle des opérations (l'allocation des ressources) a besoin d'avoir des informations sur l'état et la disponibilité des ressources pour mieux décider de leur utilisation en temps réel. L'état de ces ressources pouvant être connu par l'intermédiaire des capteurs, ces informations ne peuvent provenir que de la surveillance qui a pour charge d'assurer la disponibilité des ressources. Ainsi, les capteurs ou organes passifs permettant d'avoir la connaissance des ressources de production peuvent être organisés autrement. Ce regroupement des organes passifs doit se faire dans le cadre de la surveillance des ressources ce qui permettrait aussi un meilleur diagnostic de pannes et l'élaboration d'un recouvrement efficace.

## CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types d'arrêts des ressources de production et les perturbations qu'ils entraînent sur le déroulement de la production, puis nous avons proposé une méthode d'organisation des contrôleurs de ressources en centres de décision, afin d'assurer un contrôle efficace des opérations.

L'analyse des perturbations montre la difficulté à statuer en temps réel sur l'origine d'une perturbation. En effet, les ressources interagissent les unes les autres par l'intermédiaire des produits qu'elles doivent transformer. Nous avons établi des relations qualitatives entre les perturbations élémentaires et leurs conséquences. Les conséquences des arrêts induits ou structurels sur les produits peuvent être limitées par l'utilisation de fonctions de priorité et un contrôle en temps réel du lancement des opérations de transformation d'état.

L'organisation des contrôleurs de ressources en centres de décision permet de prendre des décisions qui font intervenir le moins de produits possibles. Cette organisation est réalisée par l'architecture de contrôle mixte que nous avons adoptée et qui est basée sur la distribution des décisions et sur la hiérarchisation des centres de décision. La hiérarchisation permet de coordonner plusieurs centres de décision et la distribution confère une autonomie décisionnelle aux centres de décision. Nous nous sommes intéressés dans cette organisation aux éléments commandables. En effet pour réaliser un contrôle efficace, il est aussi nécessaire d'organiser le fonctionnement des organes passifs, en l'occurrence les capteurs qui doivent fournir des informations au système de pilotage. Cette organisation des organes passifs doit être prise en compte dans les aspects liés à la surveillance des ressources [Toguyeni 92].



## **Chapitre III**

### ***CONTROLE DYNAMIQUE DE L'EVOLUTION DES OPERATIONS : Réaction aux aléas***



## Introduction

Ce chapitre concerne le contrôle du déroulement des opérations. Il est divisé en trois parties principales.

La première partie permet de resituer le pilotage dans la hiérarchie des niveaux décisionnels. Nous présentons ensuite la modélisation fonctionnelle du pilotage en spécifiant les entrées, les sorties et les contraintes du modèle. Le processus de décision est détaillé par la suite. Cette première partie se termine par la présentation du critère de contrôle, relatif au respect des dates dues. Les différentes solutions envisagées sont évaluées par rapport à ce critère.

La deuxième partie concerne particulièrement le contrôle des opérations de transfert. En effet, pour optimiser le fonctionnement et exploiter au mieux les particularités des systèmes de transport flexibles, il est nécessaire d'optimiser les temps de transfert des produits en phase opérationnelle. Cette optimisation passe par une gestion dynamique des requêtes de transferts, lorsque des produits désirent utiliser le même moyen de transport. Le deuxième aspect de cette optimisation concerne le routage dynamique des produits entre lieux physiques, lorsque des perturbations ou une réaction locale entraînent un transfert d'opération sur une autre ressource.

La troisième partie traite du contrôle des opérations de transformation d'état. Nous commençons par définir des éléments de quantification de l'état du système, c'est-à-dire les éléments nous permettant de détecter des incohérences dans l'évolution de la fabrication des produits par rapport aux prévisions de fonctionnement. Ensuite nous proposons différents types d'actions correctives permettant de réagir aux perturbations. Ces actions correctives doivent permettre de limiter les perturbations à un nombre réduit de produits. Ces actions correctives sont regroupées dans l'heuristique de contrôle que nous proposons en fin de chapitre.

# 1. HIERARCHISATION DU NIVEAU DECISIONNEL ET MODELISATION FONCTIONNELLE DU PILOTAGE

## 1.1. Hiérarchisation des fonctions de contrôle de production

Pour présenter l'organisation du niveau décisionnel, nous adoptons une hiérarchie en trois niveaux permettant une bonne coopération entre le contrôle et la commande.

A partir du modèle généralement utilisé en gestion de production, nous définissons les niveaux de décision dans le cadre de l'intégration du contrôle de production dans CASPAIM. Cette intégration verticale se différencie de la décomposition usuelle par la réduction des échelles de temps. Cette réduction est due à la dynamique interne des ateliers flexibles et à la complexité de leurs gammes de fabrication. Elle permet ainsi de mieux hiérarchiser les décisions, d'assurer une bonne réactivité au système de contrôle et par conséquent une conduite sûre du système de production.

La figure III.1 représente les différents éléments de contrôle relatifs à chaque niveau de décision. La structure identique adoptée pour chaque niveau de décision permet d'avoir une homogénéité dans les variables de décision et de conserver une cohérence dans les décisions [Harhalakis et al 92].

Pour maintenir la cohérence des différentes décisions, chaque niveau de décision est défini par :

- son horizon (durée pendant laquelle la décision peut être considérée comme valable),
- sa période élémentaire permettant des remises à jour partielles,
- ses éléments de contrôle qui permettent de vérifier la satisfaction des contraintes,
- le critère par rapport auquel les choix sont évalués,
- et les contraintes à respecter par le niveau de décision.



temps réel, car elles sont considérées comme faisant partie des éléments déclenchant le processus de réaction.

Les éléments de contrôle sont caractérisés par les informations sur les dates des produits et opérations, données issues de l'ordonnancement. Le facteur temporel étant très important, les marges sur les produits et opérations sont les principaux éléments de contrôle. Le système de production n'étant pas déterministe et étant soumis à des événements imprévus, le critère majeur associé au contrôle dynamique d'opérations est la minimisation des retards vrais, c'est-à-dire les retards constatés par rapport aux prévisions faites sur l'évolution de la production. Ce critère est choisi dans le but de respecter les délais externes.

La communication entre les fonctions ordonnancement et pilotage peut se faire par le biais de la modification des priorités associées aux produits. Nous pouvons distinguer deux types de priorités : les priorités statiques et les priorités dynamiques. Les priorités statiques sont fixées de façon prévisionnelle pendant la phase d'ordonnancement hors ligne. Dans ce cas, en phase opérationnelle, lorsque deux produits sont en concurrence, il suffit de comparer leur indice de priorité pour choisir l'opération dont la requête sera d'abord satisfaite. Cette priorité statique peut être modifiée à chaque intervalle de lancement (cf. §1.3.2.1 de ce chapitre) par le niveau ordonnancement. Ceci permet de privilégier une gamme de produits par rapport aux autres, soit à cause des difficultés rencontrées dans le précédent intervalle de lancement, soit pour toute autre raison. Les priorités dynamiques sont quant à elles calculées en temps réel par le pilotage. Elles tiennent compte de l'état d'avancement de chaque produit ou des contraintes sur leur date dues. L'action de l'ordonnancement sur le calcul des priorités dans ce cas, se fait par une modification de la date due correspondante. Des fonctions de calcul de priorités des produits sont présentées au §2.1 de ce chapitre.

En ce qui concerne la communication entre le niveau pilotage et le niveau commande, la difficulté réside dans le temps de réponse et d'acquisition des informations relatives à l'évolution réelle du procédé. Les problèmes de pilotage traités ici sont du même type que ceux rencontrés en ordonnancement classique, avec une difficulté supplémentaire de nature temporelle. Il faut réagir assez vite pour que le système ne s'écarte pas trop des objectifs initiaux de production. Plus cet écart est important, plus complexe sera la recherche de la solution permettant de ramener le système dans un état acceptable, proche des prévisions (malgré les perturbations occasionnelles). Le principe de réaction doit pouvoir intégrer les perturbations pendant l'élaboration de nouvelles solutions.

## 1.2. Modélisation fonctionnelle du niveau pilotage

Le pilotage tel qu'il est présenté dans le schéma précédent, constitue en fait l'interface entre la commande classique et la gestion prévisionnelle. Ce qui implique des communications permanentes entre les aspects relatifs à la gestion et les autres fonctions participant à la conduite de production.

Le niveau pilotage joue ici un rôle de **régulateur de production** par correction des dérives constatées en référence aux prévisions. Le but de tout système de production étant de réaliser des quotas de production, le pilotage a pour mission de **tenir les objectifs de production**. Les principales données d'entrée correspondent à la connaissance de l'ordonnancement prévisionnel, du suivi de production et les données de sortie concernent les décisions. Parmi ces décisions nous avons :

- le **lancement d'opération** (c'est-à-dire le début d'usinage: ce qui correspond à un marquage des places accusé de réception en entrée du graphe de commande des ressources présenté au chapitre II, §1.5.2),
- le **lancement de produit**,
- le **routage de produit** ou
- la **demande de modification du séquençage** de l'intervalle de lancement suivant.

La figure III.2 présente la boîte fonctionnelle du niveau pilotage avec ses points d'entrée, de sortie, ses contraintes et les degrés de liberté, qui seront détaillés par la suite.

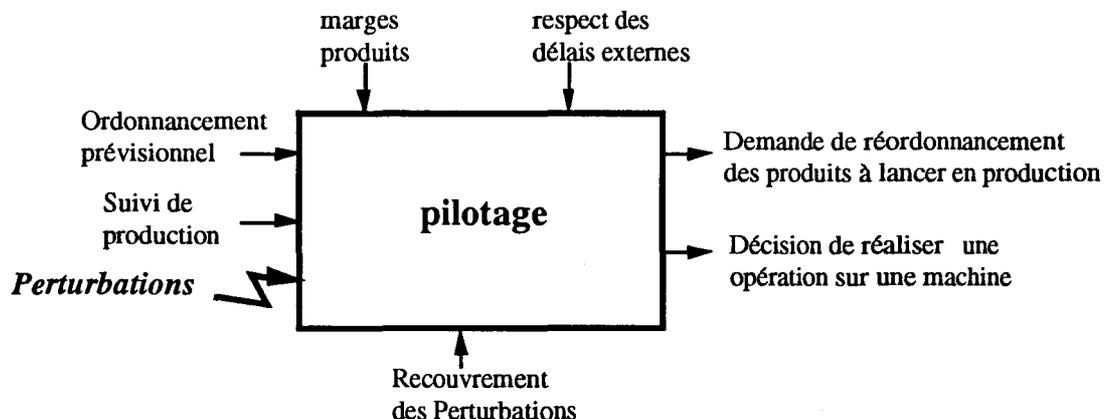


Figure III.2 : Boîte fonctionnelle de pilotage

### 1.2.1. L'ordonnancement prévisionnel:

L'ordonnancement prévisionnel constitue l'entrée de référence du système de pilotage. Ces informations d'entrées constituées par les dates de début et de fin d'opérations, sont définies par rapport aux délais externes et aux charges des machines. Ces données d'ordonnancement sont généralement établies hors ligne et peuvent être représentées de diverses façons. En phase de production ou de simulation, elles sont introduites dans les graphes de commande par l'intermédiaire d'une structure de données liée aux jetons circulant dans ces graphes, ou par la répartition des ordonnancements initiaux.

L'ordonnancement prévisionnel peut être constitué par un ensemble d'ordonnements admissibles, à partir duquel les choix définitifs sont faits en temps réel [Billaut 93]. En effet, un ordonnancement où les opérations sont placées au plus tôt, de façon à préserver le plus de marges opératoires possibles [Hammadi 91] permet de réagir plus facilement aux perturbations. Ainsi, la notion de réaction est fortement liée à l'existence de marge, et/ou à la possibilité de choix parmi les séquences admissibles. Les marges introduites peuvent entraîner une légère sous-charge des machines qui est compensée par un gain de réactivité potentielle.

Dans un système de production où les machines sont à charge maximale, le moindre retard entraîne des décalages systématiques des dates de début des autres opérations, et éventuellement des dépassements de capacité. Par conséquent pour un atelier fortement chargé, le pilotage n'a que peu ou pas de marge de manoeuvre. Les tâches deviennent rapidement toutes "critiques", ce qui peut compromettre complètement le séquençement initial. Il est donc plus judicieux de laisser au pilotage un cadre de décision permettant de gérer dynamiquement les imprévus.

### 1.2.2. Le suivi de production

La connaissance directe du système de production est obtenue à travers la structure de données du suivi de production. La qualité de la décision dépend donc de l'information à partir de laquelle elle a été élaborée. Par conséquent, une mauvaise connaissance du système entraînerait des décisions de pilotage inappropriées.

Les informations du suivi concernent les différents signaux liés aux changements d'états des constituants du procédé, et ceux liés à l'état positionnel des différents produits dans l'unité de production [modèles comportementaux ou graphe de commande]. Dans un contexte temps réel, la fonction de suivi est d'autant plus importante que les choix doivent être décidés avant que le système n'évolue vers des états incontrôlables.

### 1.2.3. Décision de réaliser une opération

Outre le choix d'ordre existant entre plusieurs produits, la flexibilité des ateliers introduit des choix pour chaque produit, concernant la ressource sur laquelle une opération peut être réalisée. Ces choix existent aussi bien au niveau des machines qu'au niveau des moyens de transport pour ce qui concerne le routage des produits. Ils ne doivent pas être considérés comme totalement définitifs, car on ne peut pas prévoir complètement le comportement des ressources sur un intervalle de temps important.

L'allocation prévisionnelle définit l'affectation temporelle et spatiale des produits du plan de fabrication sur les ressources de l'atelier. Du fait de ce caractère décisionnel, l'allocation conditionne le bon fonctionnement du système. Les degrés de liberté du procédé doivent être exploités en phase opérationnelle pour optimiser ce fonctionnement. Cette optimisation est effectuée par rapport à des critères temporels exprimant des critères économiques. Parmi ces critères citons la minimisation des retards (satisfaction des clients), minimisation de la durée de fabrication pour l'ensemble des ordres défini par le plan de fabrication (limitation de l'en-cours).

Les décisions considérées ici sont celles correspondant à l'affectation réelle des produits aux machines. Nous considérons qu'un produit dans une file d'attente peut voir son affectation initiale modifiée, si le nouveau contexte de production est défavorable à l'affectation prévisionnelle. Ce changement d'affectation doit se faire autant que possible dans le cadre fixé par l'ordonnancement, et par l'exploitation opérationnelle des différents degrés de flexibilité offerts par l'environnement de production. Lorsque les réactions sont locales, il est peu probable que l'opération choisie soit celle permettant une meilleure évolution du système, car le module de décision a une vision limitée du système [Lin et al 91].

La solution simple consistant à décaler dans le temps tous les produits n'est pas la plus satisfaisante; Elle correspond à l'absence de réaction. Cette solution s'impose quelque fois lorsque la flexibilité est réduite. Le décalage systématique revient à propager de façon linéaire une perturbation à tous les produits passant sur la même ressource, alors que dans certains cas, les réactions que nous proposons permettent de limiter la portée de cette perturbation à un nombre faible de produits.

### 1.2.4. Demande de réordonnancement

Lorsque malgré des réactions locales ou un réordonnancement partiel des produits courants, les dates dues sont affectées, il est nécessaire d'informer le niveau supérieur d'ordonnancement de ce dépassement dû à l'ampleur des perturbations. Le niveau

ordonnancement doit modifier le séquençage initial des produits appartenant à l'intervalle de lancement (cf. §1.3.2.1 de ce chapitre) suivant, afin de respecter les contraintes cumulatives des ressources de transformation d'état. Dans ce cas, la séquence initiale de l'intervalle de lancement suivant va donc être ajustée de façon à prendre en compte certaines perturbations mesurables (allongement de temps de transfert, retard partiels de certains produits, indisponibilité temporelle de certaines ressources, chargement d'un programme de robot, etc.).

### 1.2.5- Relation entre Allocateurs de ressources et surveillance

La figure II.2 du chapitre II représentant l'architecture complète du contrôle commande permet dans sa structuration, de prendre en compte les aspects liés à la surveillance. En effet le contrôle des opérations (l'allocation des ressources) a besoin d'avoir des informations sur l'état et la disponibilité des ressources pour mieux décider de leur utilisation en temps réel. Ces informations ne peuvent provenir que de la surveillance qui a pour charge d'assurer la disponibilité des ressources pour une meilleure productivité. Il existe donc un lien très étroit entre ces deux fonctions (surveillance et contrôle) de production qui pour des besoins de réactivité doivent coopérer. La figure suivante donne un exemple de la relation qui peut exister entre ces deux fonctions.

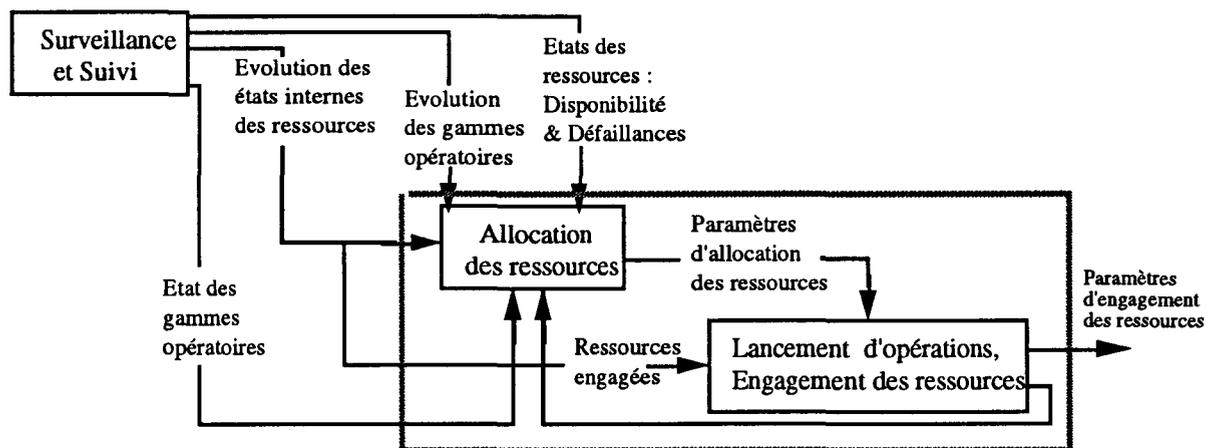


Figure III.3 : Relation Allocateur de ressources-Surveillance

### 1.3. Notations et définitions

#### 1.3.1. Notations

Nous présentons ici les notations et définitions utilisées par la suite. Considérons le schéma suivant où l'indice  $i$  représente une opération,  $j$  un produit et  $k$  une machine.

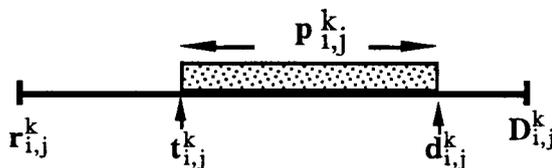


Figure III.4 : définition des paramètres d'une opération

La signification des termes est la suivante :

$O_{i,j}^k$  : opération  $i$  du produit  $j$  sur la machine  $k$

$r_{i,j}^k$  : date de début au plus tôt de  $O_{i,j}$  sur la machine  $k$

$t_{i,j}^k$  : date de début d'exécution sur machine  $k$

$p_{i,j}^k$  : durée d'exécution de  $O_{i,j}$  sur  $k$

$d_{i,j}^k$  : date de fin d'exécution,

$D_{i,j}^k$  : date de fin au plus tard,

$\text{transf}_{i,j}^{k,l}$  : durée de transfert du produit  $j$  depuis la ressource  $k$  vers la ressources  $l$ , après que l'opération  $O_{i,j}$  soit faite,

$G^k$  : groupe d'opérations à exécuter par la ressource  $k$

$I$  : horizon,  $I_i$  : intervalle de lancement,  $\rho$  : taux de charge.

## 1.3.2. Définitions

### 1.3.2.1. Intervalle de lancement

Le système de production n'étant pas observable sur un large horizon en raison de sa complexité et du temps de calcul lié à sa dimension, nous introduisons un découpage temporel pour limiter la complexité du processus de décision. Ainsi, nous proposons de diviser la durée de production en intervalles de lancement disjoints pendant lesquels le comportement du système de production est supposé prédictible.

Nous définissons un intervalle de lancement comme un sous-horizon de production. L'intervalle de lancement correspond donc au degré de liberté temporel en fonctionnement "normal" que peut avoir le niveau pilotage.

Les produits associés à un intervalle de lancement peuvent donc être assimilés à des "lots" de lancement. Au lieu de travailler sur un horizon très grand, nous réduisons la complexité du problème grâce à la diminution de l'horizon d'observabilité par la création des intervalles de lancement. Cette notion d'intervalle de lancement permet aussi de déterminer d'une part, les instants de libération au plus tard des machines pour le lancement suivant, et d'autre part permet à l'ordonnancement de mettre à jour les informations sur le groupe d'opérations appartenant à l'intervalle suivant en cas de perturbation significative.

La définition formelle des intervalles de lancement se fait par découpage de l'horizon de production en sous intervalles disjoints. Pour ce faire nous allons utiliser le principe de décomposition temporelle développé dans [Portmann 88] et [Hammadi 91]. Nous utilisons les instants de début au plus tôt des produits pour les regrouper dans un intervalle de lancement, en construisant en parallèle une suite finie  $U$  d'instant, strictement croissante, de  $n+2$  termes et une suite finie  $I$  de  $n+1$  intervalles de lancement. Les éléments de la suite  $U$  jouent le rôle de séparateur d'intervalles dans lesquels on va pouvoir regrouper les produits. Les éléments de la suite  $U$  correspondent à chaque fois au minimum entre les valeurs obtenues en faisant la somme de la date au plus tôt et la durée opératoire de chaque produit. Chaque élément de la suite  $I$  correspond à un sous-ensemble de produits qui va appartenir à l'intervalle délimité par deux éléments de  $U$ . L'algorithme suivant permet de construire ces deux suites.

\*  $U_0 = \text{Min}_{j \in W}(r_j)$  ET  $U_1 = \text{Min}_{j \in W}(r_j + \sum_{(i,j) \in g_j} p_{i,j}^k)$   
 (W est l'ensemble des produits et  $g_j$  la gamme j)  
 \*  $k=0$  ET  $I_0 = \emptyset$   
 \* TANT QUE  $(\exists j \in W - \cup_{k' \leq k} I_{k'})$  FAIRE  
 $k:=k+1$   
 $I_k = \{j / U_{k-1} \leq r_j < U_k \}$   
 $U_{k+1} = \text{Min}_{j \in \{W - \cup_{k' \leq k} I_{k'}\}} (r_j + \sum_{(i,j) \in g_j} p_{i,j}^k)$  (Avec  $\text{Min}(\emptyset) = +\infty$ )  
 FIN TANT QUE

Le découpage induit par cette décomposition en intervalles de lancement permet de s'assurer de la portée des décisions de pilotage. n étant la valeur de k, à la fin nous avons bien tous les produits dans  $\cup_{k=1}^n I_k$ .

Ce qui nous permet d'écrire en considérant I l'horizon de la production

$I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$   
 $I_i \cap I_j = \emptyset \quad i \neq j$   
 $\rho_{I_i}^k \leq \rho_{\max}^k$   
 où  $\rho_{I_i}^k$  est la charge de la machine k pendant l'intervalle de lancement  $I_i$

Sur la figure III.4, nous avons créé deux intervalles de lancement. L'intervalle de lancement  $I_1$  regroupe les produits dont la date de début au plus tôt est incluse dans l'intervalle  $[U_0, U_1]$ . De la même manière, nous construisons les autres intervalles.

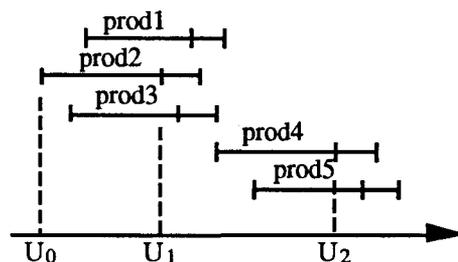


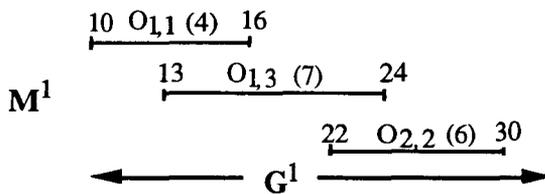
Figure III.5 Intervalle de lancement

**1.3.2.2. Séquence d'opérations :**

C'est la projection de l'ordonnancement défini, dans l'intervalle de lancement sur chaque ressource de transformation d'état. La notion d'intervalle de lancement est liée à un ensemble de produits et à toutes les ressources, la notion de séquence d'opérations est relative à un ensemble d'opérations, sur une même ressource (ex figure III.5). Les représentations utilisées dans la suite seront de la forme

$$r_{i,j} \quad \underbrace{O_{i,j}(P_{i,j})}_{D_{i,j}},$$

où la durée opératoire est représentée entre parenthèses.



**Figure III.6 : Exemple de séquence d'opérations**

Une séquence d'opérations est donc constituée par un ensemble de produits qui doivent passer sur une machine pendant un intervalle de lancement donné. Ces opérations ne sont pas forcément identiques, car les machines peuvent être polyvalentes, mais elles sont liées entre elles par des contraintes temporelles de non chevauchement.

Chaque opération d'un produit, fait donc partie à un moment donné d'une séquence d'opérations. De plus l'ordre d'exécution des opérations appartenant à une séquence n'est pas toujours total, car pour deux opérations quasi concurrentes, la priorité ou l'ordre d'exécution peut changer selon l'état d'avancement de chaque produit dans sa gamme et selon sa date due.

A la suite d'une perturbation introduite par un produit d'une séquence, la réaction se fera en priorité en faisant intervenir les opérations de la séquence. Cette notion de séquence d'opérations peut être assimilée à une file d'attente fictive, basée sur la notion d'intervalle temporel, permettant d'évaluer plus rapidement la charge de chaque ressource. Elle est plus contraignante que la notion de séquence de groupes développée dans [Le Gall 89] où les groupes sont constitués par des ensembles d'opérations toutes permutable.

### 1.3.2.3. Notion d'état du système

L'état du système est caractérisé par le degré d'avancement de chaque produit, et les événements qui font changer l'état des ressources. Chaque changement d'état du produit contribue donc au changement d'état du système sur l'intervalle correspondant. Ces changements d'états sont donc liés aux événements tels que fin d'opération, fin de transfert et les événements initiateurs de la recherche d'actions correctives. Parmi ces événements initiateurs, les plus caractéristiques sont ceux qui vont entraîner une indisponibilité partielle ou totale des ressources.

Pour assurer un déroulement cohérent de la production vis à vis des prévisions, il faut être en mesure de pouvoir quantifier les différents comportements d'une partie du système de production suite à chacun de ces changements d'états. En effet, en cours de production, on rencontre des déviations plus ou moins variées dont le cumul peut entraîner des conséquences relativement anormales pour la suite. Eviter de telles situations consiste à réagir dans le but de limiter cette propagation à d'autres produits. Toute décision liée au contrôle d'opérations ou au changement d'états des produits doit se faire dans cette optique.

## 1.4. Processus décisionnel

Le processus décisionnel s'applique aussi bien au routage qu'aux opérations de transformation d'état. Dans le cas d'un routage, et lorsque la flexibilité du système de transport le permet, le chemin retenu est choisi dans l'ensemble des chemins respectant les contraintes temporelles.

A partir de la classification qualitative liée aux différents états (normal, partiellement dégradé et anormal) du système, ou de leur conséquence sur le système précédemment présenté (chapitre II §.2), nous définissons ici la séquence élémentaire de décisions, concernant les choix d'actions autorisant l'évolution des ressources [Tawegoum et al 94a]. Cette modélisation du processus de décision est généralement utilisée en surveillance, où les éléments à surveiller sont les machines. Ici, nous appliquons cette notion à la surveillance des produits.

En effet, ces deux notions sont liées : puisque la transformation des produits est réalisée par les machines, surveiller le déroulement de la production revient à surveiller indirectement les machines, ce qui n'est pas dans ce travail notre préoccupation majeure. La surveillance au sens classique contrôle plutôt le comportement des actionneurs élémentaires

pour en déduire l'état de la ressource de production. Ces deux types de surveillance peuvent être regroupés au sein d'une même entité dans le cadre de la supervision [Toguyeni 92].

Le processus que nous présentons dans cette partie est donc le référentiel de base utilisé à chaque étape de la décision. Il est constitué de trois phases : détection, qualification et décision. La classification des décisions que nous proposons n'est pas fonction de l'origine, mais de la conséquence de la perturbation sur le système de production. Ainsi avant de choisir une action après un changement d'état du système, le processus décisionnel est celui représenté par le schéma suivant.

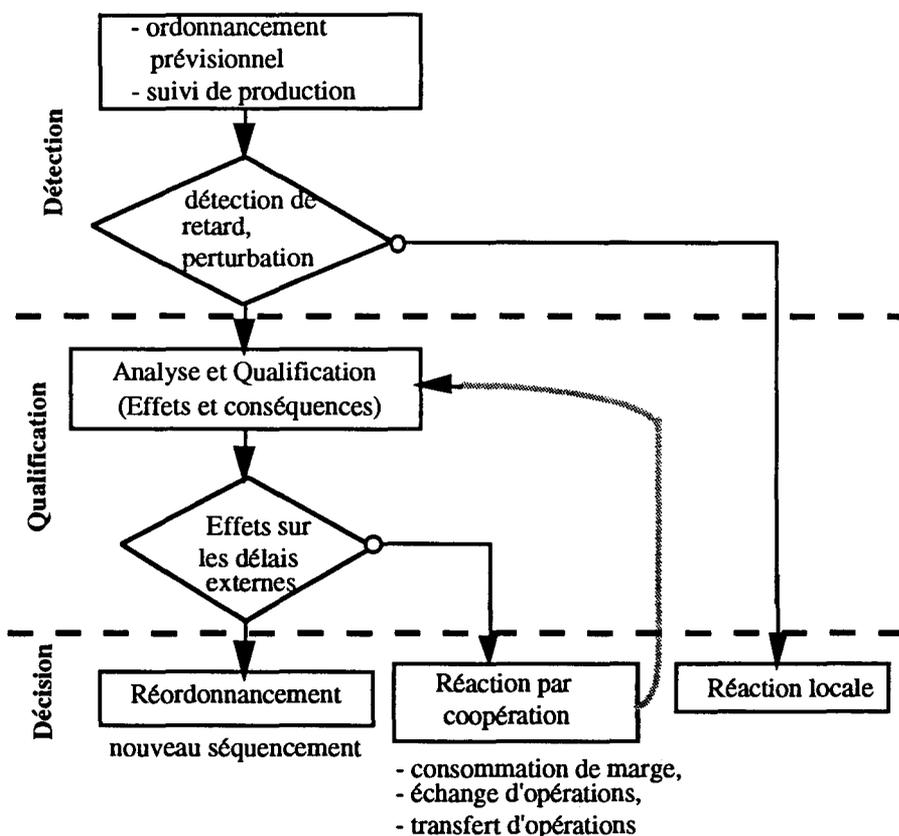


Figure III.7 : processus de décision

### 1.4.1. Détection

La détection consiste en une comparaison des prévisions et des informations sur l'état courant de la production, à travers la structure de données correspondante. Partant de la notion de marge opératoire et de la marge d'absorption de l'opération à lancer : notion que nous

introduisons dans ce chapitre, nous définissons des notions quantitatives qui nous permettront de quantifier l'état du système de production.

### 1.4.2. Qualification

Elle consiste à évaluer l'étendue temporelle et séquentielle d'une décision par l'étude des conséquences : par exemple, le retard induit sur les autres produits de l'intervalle de lancement.

Pendant la qualification, plusieurs types de réactions sont examinées selon des techniques qui seront expliquées par la suite. La qualification examine en priorité l'aspect d'absorption par coopération en faisant intervenir dans la limite du possible un nombre faible de ressources, le réordonnancement n'intervenant en dernier ressort que lorsque les délais externes sont modifiés.

La notion de séquence d'opérations définie précédemment est intéressante car elle permet de traiter un ensemble d'opérations, au lieu de se focaliser sur un seul produit, comme s'il existait indépendamment des autres. Cette interdépendance due à la flexibilité des ressources et au parallélisme de flux rend cette notion de séquence d'opérations apte au contrôle de l'évolution de la production. Lorsqu'un produit a un retard local, ce retard peut être compensé si le produit passe par la suite dans une séquence où les marges des autres opérations ne sont pas encore consommées.

La qualification et la décision sont intimement liées et il y a un échange permanent entre ces deux parties. En effet, pendant la qualification, les différentes possibilités sont testées, et celle qui affecte le moins les délais externes est sélectionnée.

### 1.4.3. Décision

La partie décision correspond au choix de l'action corrective à engager après qualification de la conséquence de la perturbation, sur l'évolution du système de production. L'action corrective choisie est celle qui permet de minimiser la dérive du système de production. L'examen des conséquences après détection et qualification conduit à trois types de décisions :

- **réaction locale** : La réaction peut être locale à une seule machine (c'est par exemple le cas d'une permutation de l'ordre d'exécution de deux opérations dans le groupe d'opérations de la machine) ou à un produit. Dans le deuxième cas, tout en respectant

l'ordonnement prévisionnel des séquences d'opérations, on consomme la marge prévue pour les opérations restantes du produit.

- **réaction par coopération** : la réaction locale ne suffit plus, on introduit la réaction par coopération. La modification de marge ne se limite pas aux opérations suivantes de la même gamme, mais s'étend aux autres opérations : c'est le cas de la réaction par consommation de marge par anticipation. La réaction par coopération peut aussi consister en un échange d'opérations entre machines équivalentes. Pour réaliser cet échange, le pilotage doit s'assurer d'une part, que les charges de machines concernées ne sont pas dépassées, et d'autre part que le séquençement initial des opérations n'est pas fortement modifié.
  
- **réordonnement** : Il consiste en une réaffectation des produits appartenant à l'intervalle de lancement courant.

Ces différentes réactions seront développées dans les paragraphes suivants.

## 1.5. Objectif et critère de contrôle

Nous avons spécifié dans le chapitre I deux types de contrôle (adaptatif ou réactif) liés à l'environnement de production. Concernant la réaction adaptative traitée dans ce chapitre, l'objectif de contrôle est le respect "au mieux" de la date due des produits. Pour atteindre cet objectif, le principal critère de contrôle peut être formulé ou exprimé sous la forme de minimisation des retards vrais, c'est-à-dire ceux survenant en phase opérationnelle. C'est en vue d'atteindre cet objectif que nous proposons de découpler le contrôle des opérations de transfert, de celui des opérations de transformation d'état.

## 2. CONTROLE DES OPERATIONS TRANSITTIQUES

S'il est possible de prévoir ou de proposer les dates de début et de fin d'opérations sur les ressources de transformation, il s'avère difficile de le faire avec autant de précision dans le cas des ressources de transformation positionnelles réalisant le routage des produits.

Le contrôle des opérations de transfert est lié à l'augmentation du niveau de flexibilité des ateliers pour éviter en partie, en phase opérationnelle, les blocages par famine des ressources de transformation. Cependant, lorsque le système de transport est trop flexible, on peut passer plus de temps à contrôler le cheminement des produits, qu'à contrôler le déroulement des opérations de transformation d'états et leurs affectations aux machines.

L'augmentation des dérivations ne résout que partiellement les problèmes de stockage dynamique. Un nombre important de dérivations peut accroître le temps de séjour des produits dans la cellule, car il faut réorienter les palettes et les produits après leur stockage temporaire dans les dérivations.

Dans l'optique d'un fonctionnement quasi autonome du système de production, la solution au problème de gestion dynamique de requête et de routage est trop complexe pour être confiée à un opérateur. Ce dernier reste certes, maître du choix des solutions d'affectation dans certains cas, car le système de contrôle ne peut prétendre avoir une vision complète de l'environnement de production. Ainsi, il est nécessaire de déterminer des fonctions représentant des objectifs qui peuvent être assignés à un système de contrôle de production. La différence avec les règles de production généralement utilisées en simulation est l'adaptation dynamique, des fonctions de priorité à l'évolution de la production selon la stratégie choisie.

Les problèmes traités dans cette partie sont de deux ordres : la gestion dynamique des requêtes d'accès aux ressources de transfert, et le routage des palettes et des produits entre ressources de transformation d'état.

### 2.1. Gestion des requêtes et résolution des indéterminismes directionnels [Tawegoum et al 92]

Cette gestion de requêtes concerne les opérations de transfert, et principalement les requêtes émises par deux produits qui nécessitent l'utilisation de la même ressource. C'est par exemple le cas d'une ressource partagée telle qu'un robot, une section de convoyeur, ou autre moyen de transfert. Cette gestion des requêtes peut se faire suivant deux types de stratégies :

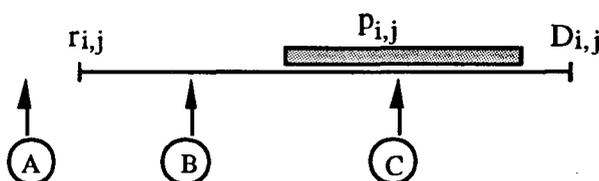
\* les décisions statiques qui consistent en la comparaison entre eux des paramètres statiques de chaque gamme. Ce paramètre est modifiable suite à une intervention opérateur ou une contrainte imposée par le niveau décisionnel.

\* les décisions dynamiques : le choix de l'ordre d'exécution des requêtes est déterminé en fonction des prévisions (date de début et de fin d'opérations) de chaque produit et de son état d'avancement. Cette gestion se fait en utilisant des fonctions de priorités dynamiques (combinaison des règles classiques simples).

Compte-tenu de la dynamique d'évolution des ressources de production et de la flexibilité de production, il est souhaitable de disposer des outils permettant de gérer les ressources selon différentes stratégies de production. Pris indépendamment, la gestion des requêtes est similaire, au moment du choix, au "problème d'ordonnement à une machine". Puisque ces choix se font de manière séquentielle, et pour tenir compte de la dynamique du système de transport, nous introduisons des fonctions de priorité. Ces fonctions de priorité expriment des objectifs complexes, et peuvent s'adapter à l'environnement évolutif et changeant du système de production. La valeur de la fonction de priorité est donc fonction de l'état d'avancement de chacun des produits entrant en conflit dans l'utilisation de la ressource à partager ou des contraintes temporelles qui lui sont liées.

Habituellement on utilise des règles de priorité simples, pour décider de l'ordre de satisfaction des requêtes. Les fonctions de priorité que nous proposons d'utiliser peuvent s'adapter à l'évolution dynamique de la production.

Concernant les instants d'émission de requête par rapport aux dates de début et de fin d'opération, on peut distinguer trois cas représentés sur la figure suivante :



**Figure III.8: instants d'apparition d'une requête**

- A: le produit est en avance par rapport au prévisionnel;
- B: la requête est émise dans l'intervalle de temps normal;
- C: le produit est en retard.

Lorsqu'une requête d'utilisation d'une ressource est émise (à travers le jeton représentant le produit), elle contient les informations sur la prochaine opération à réaliser sur le produit. Ces informations permettront de choisir l'ordre d'exécution des requêtes. Ces fonctions de priorité présentent à notre avis un aspect de résolution dynamique qui permet d'exprimer des objectifs différents. Deux fonctions de priorités sont proposées :

- fonction de priorité par rapport aux délais,
- fonction de priorité minimisant le temps de présence du produit dans la cellule.

### 2.1.1. fonction de priorité par rapport aux délais

#### 2.1.1.1. définition

La fonction de priorité face au délais est définie par l'expression :

$$F_j^1(t) = r_{i,j}(t) + \max[\theta_{i,j}(t), D_{i,j}] \quad (1)$$

C'est la somme de la date de début au plus tôt et du maximum entre la date de fin au plus tôt de l'opération  $O_{i,j}$  et la date due de  $O_{i,j}$ .

$F_j^1$  signifie fonction du type 1 sur le produit j.

(on se place sur une ressource donnée, d'où la disparition de l'indice k)

\*  $r_{i,j}(t)$ : date d'exécution au plus tôt de la prochaine opération de transformation d'état.  $r_{i,j}(t) = \max [r_{i,j}, t]$ .

\*  $\theta_{i,j}(t)$  : date d'achèvement au plus tôt de l'opération  $O_{i,j}$ , à l'instant t

$$\theta_{i,j}(t) = r_{i,j}(t) + P_{i,j}$$

Si nous considérons deux produits j et j', le produit j sera prioritaire sur le produit j' si :

$$F_j^1(t) \leq F_{j'}^1(t) \quad (2)$$

En effet, si nous considérons les instants possibles d'émission de requête pour chaque produit, la fonction de priorité se décompose de la façon suivante :

$$F_j^1(t) = r_{i,j}(t) + D_{i,j} \quad \text{si} \quad t < r_{i,j} \quad (\text{cas A}) \quad (3)$$

$$= t + D_{i,j} \quad \text{si} \quad r_{i,j} \leq t \leq D_{i,j} - p_{i,j}^* \quad (\text{cas B}) \quad (4)$$

$$= 2t + p_{i,j} \quad \text{si} \quad D_{i,j} - p_{i,j}^* < t \quad (\text{cas C}) \quad (5)$$

L'astérisque traduit le fait que le temps de transfert du produit entre le point de décision et la ressource de transformation est introduite dans la durée opératoire. (Les cas A, B et C se réfèrent à la fig. III.8).

Cette fonction de priorité se comporte comme une combinaison de trois règles classiques :

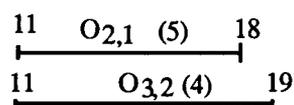
- FIFO (First In First Out) : les opérations sont en avance;
- EDD (Earlier Due Date) : aucune des deux opérations n'est en retard;  
(car  $F_{i,j}^1(t) \leq F_{k,j}^1(t) \Leftrightarrow D_{i,j} \leq D_{k,j}$ ).
- SPT (Short Processing Time) : les deux opérations sont en retard.  
(car  $F_{i,j}^1(t) \leq F_{k,j}^1(t) \Leftrightarrow p_{i,j} \leq p_{k,j}$ ).

L'optimalité locale de cette fonction pour l'ordonnancement à une machine est démontrée dans [Dessouky et al 72].

### 2.1.1.2. exemple

Considérons deux produits 1 et 2, demandant à utiliser la même ressource de transfert ( robot ou section de convoyeur). Supposons que nous sommes à l'instant  $t = 10$ . Les informations disponibles sur l'état des opérations sont :

$$\begin{array}{lll} r_{2,1} = 11 & p_{2,1} = 5 & D_{2,1} = 18 \\ r_{3,2} = 11 & p_{3,2} = 4 & D_{3,2} = 19 \end{array}$$



- $t = 10$  : Si les deux produits sont en avance c'est la règle FIFO qui est appliquée.

$$- t = 12,5 \quad F_1^1(12) = 12 + 18 = 30$$

$$F_2^1(12) = 12 + 19 = 31$$

⇒ D'après l'expression (2), le produit 1 est prioritaire; c'est la règle EDD qui est appliquée.

$t = 14,5$  : l'un des deux produits est en retard.

$$F_1^1(14,5) = 29 + 5 = 34$$

$$F_2^1(14,5) = 14,5 + 19 = 33,5$$

⇒ D'après l'expression (2), le produit 2 est prioritaire; c'est la règle SPT qui est appliquée.

$t = 16$  : les deux produits sont en retard.

$$F_1^1(16) = 32 + 5 = 37$$

$$F_2^1(16) = 32 + 4 = 36$$

⇒ D'après l'expression (2), le produit 2 est prioritaire; c'est la règle SPT qui est appliquée.

### 2.1.2. Fonction de priorité minimisant le temps de présence du produit dans la cellule.

Nous voulons encore résoudre le problème de conflit d'accès aux ressources partagées, grâce à une mesure de priorité, permettant de traduire une autre stratégie de fonctionnement. Supposons que la stratégie de fonctionnement soit par exemple, la minimisation le temps total de présence d'un produit, lorsque les produits ne sont pas en retard.

#### 2.1.2.1. Définition

La fonction de priorité traduisant cette stratégie de fonctionnement à un instant  $t$  se définit par :

$$F_j^2(t) = r_{i,j}(t) + \theta_{i,j}(t) = 2 * \max(t, r_{i,j}) + p_{i,j}^* \quad (6)$$

Elle est égale à la somme de la date d'exécution au plus tôt et de la date de fin au plus tôt. Supposons que nous ayons deux produits  $j$  et  $j'$ , et considérons le problème partiel de gestion de requête sur la même ressource disponible à l'instant  $t$ . La condition d'optimalité locale [CHU 90] pour satisfaire la requête du produit  $j$  avant celle de  $j'$  est :

Le produit  $j$  sera prioritaire sur le produit  $j'$  si :

$$F_j^2(t) \leq F_{j'}^2(t) \quad (7)$$

Si l'on compare la priorité de deux opérations sur deux produits  $j$  et  $j'$ ,  $r_{i,j}$  étant supposé inférieur à  $r_{i',j'}$ , on peut distinguer deux cas :

- dans le cas où  $p_{i,j} > p_{i',j'}$ , le produit  $j$  reste prioritaire jusqu'à  $t = r_{i',j'} + (p_{i',j'} - p_{i,j})/2$ . Pendant cet intervalle de temps, la fonction de priorité  $F^2$  est équivalente à la règle de priorité FIFO. Le produit  $j'$  demeure prioritaire ensuite, et la fonction de priorité est équivalente à la règle SPT. En effet,

$$\begin{aligned} F_j^2(t) \leq F_{j'}^2(t) &\Leftrightarrow 2r_{i,j} + p_{i,j} \leq 2r_{i',j'} + p_{i',j'} \\ &\Leftrightarrow r_{i,j} \leq r_{i',j'} + (p_{i',j'} - p_{i,j})/2 \\ &\text{donc tant que } t \leq r_{i,j} \text{ on a } j \text{ précède } j'. \end{aligned}$$

- dans le cas où  $p_{i,j} \leq p_{i',j'}$ , le produit  $j$  reste toujours prioritaire. En tenant compte du fait que FIFO est dans ce cas équivalent à SPT, on peut considérer qu'il existe une période où la fonction  $F^2$  est équivalente à FIFO, et une autre où elle est équivalente à SPT. En effet,

$$r_{i,j} \leq r_{i',j'} \text{ et } p_{i,j} \leq p_{i',j'} \Rightarrow F_j^2(t) \leq F_{j'}^2(t) \quad \forall t$$

### 2.1.2.2. exemple

Considérons deux produits 1 et 3 demandant à utiliser une même ressource de transfert. Les informations disponibles sur leur opérations sont les suivantes :

$$\begin{array}{lll} r_{4,1} = 10 & p_{4,1} = 3 & D_{4,1} = 16 \\ r_{2,3} = 12 & p_{2,3} = 2 & D_{2,3} = 17 \end{array}$$

Calculons la valeur de priorité de chaque produit. Supposons que les requêtes sont émises à  $t=10$ . Nous avons :

$$F_1^2(10) = 10 + 13 = 23$$

$$F_3^2(10) = 12 + 14 = 26$$

⇒ D'après (7), le produit 1 est prioritaire, car il a la plus petite valeur de priorité

Si les requêtes sont émises à  $t=13$ , nous avons :

$$F_1^2(13) = 13 + 16 = 29$$

$$F_3^2(13) = 13 + 15 = 28$$

⇒ D'après (7), le produit 3 est prioritaire car il a la plus petite valeur de priorité; c'est la règle SPT qui est appliquée.

### 2.1.3. Conclusion

Ces fonctions de priorité constituent un bon outil de gestion dynamique des requêtes d'accès aux ressources de transfert, puisque le comportement des fonctions tient compte de l'évolution courante des produits : c'est-à-dire de la situation par rapport au prévisionnel. Ces fonctions expriment des stratégies différentes. Le choix de l'une d'elles dépendra des stratégies de fonctionnement proposées par le niveau de pilotage supérieur. Dans certains cas, les règles de priorité simples peuvent être utilisées, mais elles ne permettent pas d'exprimer des stratégies de fonctionnement s'adaptant à l'évolution du procédé. Le second aspect du contrôle des opérations de transfert est développé au paragraphe suivant.

## 2.2. Routage des produits entre lieux de transformation [Tawegoum et al 92]

### 2.2.1. But et problématique

Dans un atelier flexible, l'accessibilité entre lieux physiques n'est pas toujours directe. Pour atteindre un lieu de transformation d'état, un produit doit transiter par des sections intermédiaires. De plus, du fait de la flexibilité du système de transport, ce transfert peut se faire suivant plusieurs chemins. Il est quelques fois impératif de rechercher le plus court chemin entre deux ressources de transformation lorsqu'une perturbation survient. Les problèmes de cheminement dans les graphes (en particulier la recherche du plus court chemin) comptent parmi les plus classiques de la théorie des graphes, et les plus importants par leur application, [Gondran et al 79], [Sakarowitch 84], [Chrétienne 84b], [Carlier et al 90], [Boffey 93].

Dans le cadre des ateliers flexibles, le problème de routage des produits est sujet à diverses interprétations, et est abordé ou résolu de différentes façons. Par exemple dans [Narayanan 92] et [Lin et al 91] le routage est associé à la flexibilité opératoire. [Egbelu 90] le traite comme une recherche de chemins avec affectation simultanée des produits aux ressources, et utilise la programmation dynamique pour déterminer le temps d'achèvement des petits lots de produits. De même dans [Gong et al 93] et [Klein 91] où l'affectation des produits aux ressources est conjointe au cheminement des produits, l'imprécision du temps est modélisée par des variables floues. Citons aussi le cas de la gestion et du contrôle des déplacements des chariots filoguidés dans un atelier où les temps de transfert sont représentés par des intervalles de temps [Potvin et al 93].

En général, pour que le problème de recherche de chemin dans un graphe orienté admette une solution de longueur finie, il faut que le graphe ne comporte aucun circuit de longueur négative. Lorsque cette condition est réalisée, il existe toujours un chemin de longueur minimale qui soit élémentaire (c'est-à-dire tel que l'on ne rencontre jamais deux fois le même sommet). De plus lorsque tous les circuits du graphe ont une longueur strictement positive, tout plus court chemin est nécessairement élémentaire.

Il est ainsi possible de déterminer au préalable l'ensemble des chemins possibles. Cependant ces derniers ne sont pas toujours optimaux en phase opérationnelle, car l'occupation des sections du système de transfert varie suivant la position des produits.

Le routage étudié doit permettre de calculer en temps réel le meilleur chemin entre deux lieux physiques en vue d'optimiser le temps de transfert entre opérations de transformation

d'état. Ce calcul de chemin doit tenir compte de la dynamique du système de transport (occupation dynamique des sections du système de transport) et des tests d'évolution sur les produits à chaque aiguillage ou à chaque butée, qui pour des besoins de vérification (ou de redirection) ralentit le produit dans son cheminement.

Il s'agit donc de déterminer le chemin de transfert le plus rapide entre deux lieux de transformation d'état. Il doit s'effectuer dans un intervalle de temps prédéterminé, et doit avoir un nombre de sections minimum (cardinalité minimum). Cette recherche de chemin peut avoir lieu suite à un retard ou une perturbation entraînant la violation de la date de disponibilité d'un produit pour la prochaine opération. Elle peut aussi avoir lieu suite à un changement d'affectation nécessitant le choix d'un chemin, autre que le chemin statique généralement utilisé par un type de produit.

Nous allons présenter dans le paragraphe suivant une heuristique de recherche du plus court chemin en temps de transfert où la durée du transfert dépend du temps. Il est montré dans [Minoux 77], que si les fonctions représentant la longueur des arcs n'ont pas une forme analytique simple et identique, il faut définir une structure particulière de dioïdes pour résoudre ce problème. Pour résoudre notre problème de routage, nous avons besoin d'une méthode de calcul rapide qui tienne compte de l'occupation dynamique du système de transport. Une des difficultés caractéristiques de ce type de problème est de prendre en compte la dynamique du problème. Nous allons donc définir une fonction de transition qui permettra d'exprimer le temps de séjour d'un produit dans un emplacement de stockage intermédiaire du système de transport (représenté par un noeud du graphe). Cette fonction de transition traduit le comportement dynamique des produits sur le convoyeur et va être introduite dans l'algorithme de Dijkstra utilisé comme algorithme de base de la recherche de chemins.

### 2.2.2. Algorithme de résolution

Le système de transport est modélisé par un graphe orienté non symétrique, dont les sommets représentent les machines et leur files d'attente, les zones de stockage temporaires, ou les aiguillages (convergent, divergent). Un routage est défini comme une suite de  $n$  décisions élémentaires  $X_i$  constituée d'une liste de sommets  $x_i$  ( $i=1..f$ ), où  $X_i = [x_i, t_i]$ ,  $X_f = [x_f, t_f]$ , et sa valeur égale à la date d'arrivée  $t_f$  : somme des temps de trajets élémentaires empruntés par le produit.

En fait, en dynamique nous allons évaluer le chemin le plus court à l'instant  $t$  en tenant compte de la charge et des conflits potentiels. Le poids des arcs est évalué en fonction de

la charge courante du système de transport, correspondant au temps d'attente d'un produit aux postes par lesquels il transite, lors de son transfert d'une machine à l'autre.

Nous allons expliciter l'expression de la fonction de transition avant de présenter les algorithmes de recherche des deux plus courts chemins en temps de transfert avec un minimum de sommets dans un intervalle de temps.

### 2.2.2.1. Recherche du plus court chemin avec distance fonction du temps

Nous allons représenter le système de transport par un graphe  $(S,U,h)$  où  $S$  représente l'ensemble des sommets (aiguillage, jonctions, emplacement de stockage),  $U$  l'ensembles des arcs, et  $h$  la fonction évaluant le temps de transit d'un produit entre deux sommets du graphe. Nous utilisons les notations suivantes :

- \*  $\Gamma_n$  : ensemble des successeurs du sommet  $n$ .
- \*  $\pi(n)$  : longueur du plus court chemin de 1 à  $n$ .
- \*  $C_q$ :  $q$  ième chemin (vecteur contenant la liste des sommets correspondant au plus court chemin).
- \*  $l_{m,n}$  durée de transfert entre les sommets  $m$  et  $n$ .
- \*  $A_m(t)$ : variable indiquant le temps d'attente en un sommet  $m$  du graphe.

$t_n = h_{m,n}(t_m)$ : date d'arrivée en tête de file de la ressource  $n$  lorsqu'on part de la ressources  $m$  à  $t_m$ .

Nous définissons cette fonction de transition  $h_{m,n}$  de la façon suivante :

$$h_{m,n} = A_m + l_{m,n} \quad (8)$$

La fonction de transition est égale à la somme du temps de transfert statique  $l_{m,n}$ , et du temps de séjour au sommet  $m$ . Si la file d'attente en  $m$  est vide, la fonction de transition est tout simplement égale au temps de transfert statique entre  $m$  et  $n$ . La date d'arrivée en  $n$  s'écrit, alors :

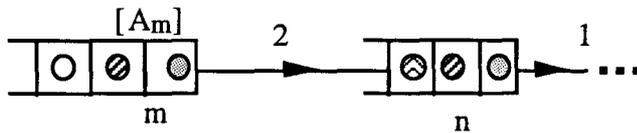
$$\begin{aligned} t_n &= t_m + h_{m,n} \\ h_{m,n}(t) &= t + A_m(t) + l_{m,n} \end{aligned} \quad (9)$$

**a- Expression du temps de séjour dans une file d'attente**

Le temps d'attente concerne toujours le produit dont on détermine le chemin, et il se calcule toujours par rapport au temps d'attente de la dernière palette de la file par laquelle le produit à orienter va passer.

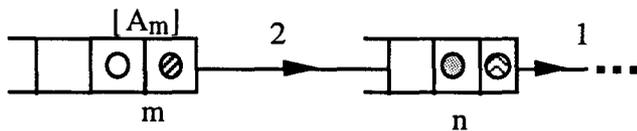
**1er cas :** deux postes successifs.

soit à déterminer le chemin du produit  $\bigcirc$



On est à  $t = 10$ , le temps d'attente du produit  $\bigcirc$  dans la file  $m$  est  $A_m(10) = 2 + 2 = 4$ . Ce temps d'attente correspond à la durée de transfert des produits  $\otimes$  et  $\odot$  de  $m$  en  $n$ .

A  $t = 12$  on a la situation suivante :  $A_m(12) = 2$



à  $t = 14$ ,  $A_m(14) = A_m(12) - 2 = 0$

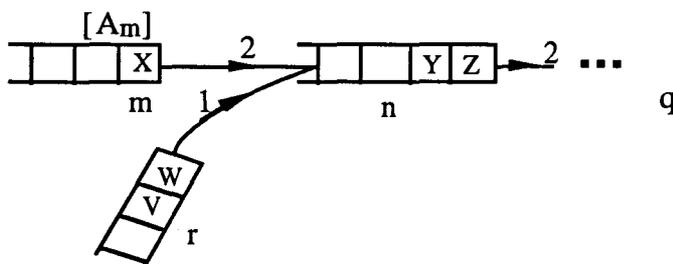
On part de la machine  $m$  à  $t = 14$  :  $t_m = 14$ .

La date d'arrivée  $t_n$  en  $n$  est  $t_n = t_m + h_{m,n}$

$$h_{m,n}(t) = t + A_m(t) + l_{m,n} \\ = 14 + 0 + 2 = 16$$

**2ème cas :** file après une jonction

Le produit  $X$  doit transiter par  $n$ , après les produits  $W$  et  $V$  de la file  $r$ .

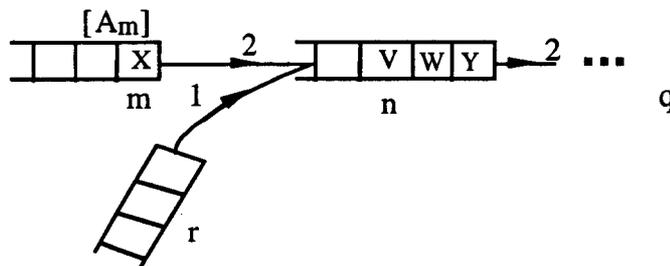


Au départ, le temps d'attente (de tout autre produits autre que Y et Z) en n dû au transfert des produits Y et Z de n vers q est  $A_n(10) = 2+2 = 4$

En 2 unités de temps, W et V sont transférés de r en n ;

à  $t=12$ ,  $A_n(12)=4-2+2=4$ ;

on a la configuration suivante :



Le temps d'attente de V est égal à  $4-2+2$ .

(4) correspond au temps d'attente du produit en queue de la file n avant le transfert de W et V, (-2) pour le départ du produit W (cette valeur correspond au temps de transfert de n à q), (+2) pour prendre en compte le temps de transfert du produit W (qui précède V) de n à q.

Lorsque le produit X arrivera en n, son temps d'attente à  $t=12$  sera donné par l'expression

$$A_n(12) = A_n(10) - x \cdot l_{n,q} + x' \cdot l_{n,q}$$

Dans le cas précédent,  $x=1$  (1 produit a quitté n), et  $x'=2$  (2 produits sont arrivés en n)

$$A_n(12)=4-2+4=6$$

On en déduit l'expression générale du temps d'attente qui est donnée par l'expression

$$A_n(t) = A_n(t'') - A^- + A^+ \tag{10}$$

avec  $t''$  (date de la dernière mise à jour), q successeur de n,

$$A^- = x \cdot l_{n,q} \tag{11}$$

$$\text{et } A^+ = x' \cdot l_{n,q} \tag{12}$$

où  $x$  est le nombre de produits ayant quittés la file n,  
et  $x'$  le nombre de produits à transférer en n.

Le temps d'attente dépend de la charge de la file à visiter, car la palette concernée par le routage vient en accumulation derrière celle déjà présente dans la file, et ne peut la quitter que lorsque ses prédécesseurs sont partis. Ce temps d'attente traduit l'évolution ou l'occupation dynamique des emplacements de stockage des produits dans le système de transport.

$A^-$  : temps de séjour des produits ayant quitté  $m$  après la mise à jour précédente.

$A^+$  : temps de séjour (durée d'attente des palettes) des produits qui viennent d'arriver en  $n$  (dans la file de  $n$ ) après la mise à jour précédente.

(La mise à jour des  $A_n$  se fait du sommet source vers le sommet destination. A chaque sélection partielle d'arc sur le graphe, la valeur de la fonction est mise à jour.)

***b- Recherche du plus court chemin en temps de transit***

La fonction est introduite dans l'algorithme de Dijkstra, qui sert de base à la recherche de chemin. L'algorithme de recherche du plus court chemin en temps de transit (PCCTT) se déroule selon les étapes suivantes :

**(a)- Initialisation**

$\bar{S} = \{2, 3, \dots, N\}$   $\pi(1) = 0$ ; -- on part du sommet 1

$\pi(n) = h_{1,n}$  Si  $n \in \Gamma_1$  Sinon  $\pi(n) = +\infty$ ;

$C_q(1) = 1$  ;

**(b)- Sélectionner**

$m \in \bar{S}$  tel que  $\pi(m) = \min_{n \in \bar{S}} \pi(n)$ ; -- on prend  $m$  le plus proche de 1

Faire  $\bar{S} \leftarrow \bar{S} - \{m\}$ ;

Si  $m = x_f$  Alors Fin. -- si  $m$  est le sommet Final alors Fin

Sinon aller en (c);

**(c)- Faire pour tout  $n \in \Gamma_m$  et  $n \in \bar{S}$**

$h_{m,n} = A_m + l_{m,n}$ ;

$\pi(n) \leftarrow \min(\pi(n), \pi(m) + h_{m,n}(t_n))$ ;

Si  $\pi(n) = \pi(m) + h_{m,n}(t_n)$  Alors  $C_q(i) = m$  ;

$i := i + 1$  ;

Retourner en (b);

### 2.2.2.2. Heuristique de routage dynamique des produits entre lieux physiques

L'algorithme précédent nous permet d'obtenir, lorsque cela est possible, le chemin le plus court entre deux lieux physiques (tenant compte des temps d'attente), et satisfaisant l'intervalle de temps admissible. Le nombre de sommets d'un chemin traduit les éventuels conflits d'accès aux ressources de transfert, que le produit à orienter rencontrera dans son cheminement. En effet, plus ce nombre est important, moins vite évoluera le produit (car la résolution des conflits d'accès ne se font pas en temps nul). Il est donc judicieux de choisir parmi les chemins respectant les contraintes temporelles (dates dues), celui qui a le nombre de sommets le plus petit (le plus court et un avec nombre de sommets minimum et longueur inférieure à une borne).

Nous avons ici limité le nombre de chemins envisageables à deux, dans le but d'avoir au moins une possibilité de choix. En fait il aurait été souhaitable de rechercher l'ensemble des chemins possibles. Mais face aux exigences temps réel, et la multiplicité des chemins, le temps de recherche peut être extrêmement important. L'évaluation de toutes les possibilités ou mieux la généralisation de la recherche aux  $k$  plus courts chemins peut s'avérer très longue par rapport au temps nécessaire à l'obtention de la solution. Nous sommes donc soumis par des contraintes de temps à limiter le nombre de chemins. Un exemple de calcul des  $k$  plus courts chemin est présenté dans [Yen 71] [Boffey 93], et [Topkis 88].

L'algorithme de routage va nous permettre de calculer deux chemins possibles. Parmi ces chemins nous allons choisir celui de cardinalité minimale. L'algorithme de routage se déroule suivant les trois phases suivantes.

- (a) - Appliquer PCCTT pour trouver le premier chemin  $C_1$
- (b) - Supprimer sur le graphe représentant le système de transport l'arc de  $C_1$  de plus grande longueur.
  - Appliquer PCCTT pour trouver le deuxième chemin  $C_2$
  - Si ce chemin n'existe pas, Appliquer PCCTT à partir du premier aiguillage du graphe initial, pour trouver le deuxième chemin  $C_2$ .
- (c) - Choisir entre  $C_1$  et  $C_2$  le chemin ayant le moins de sommets.

### 2.2.3. exemple

Considérons la cellule suivante [Huvenoit 94], constituée :

- de quatre machines
- d'un convoyeur continu,

- et d'un ensemble de robots assurant l'alimentation des ressources de transformation en produits.

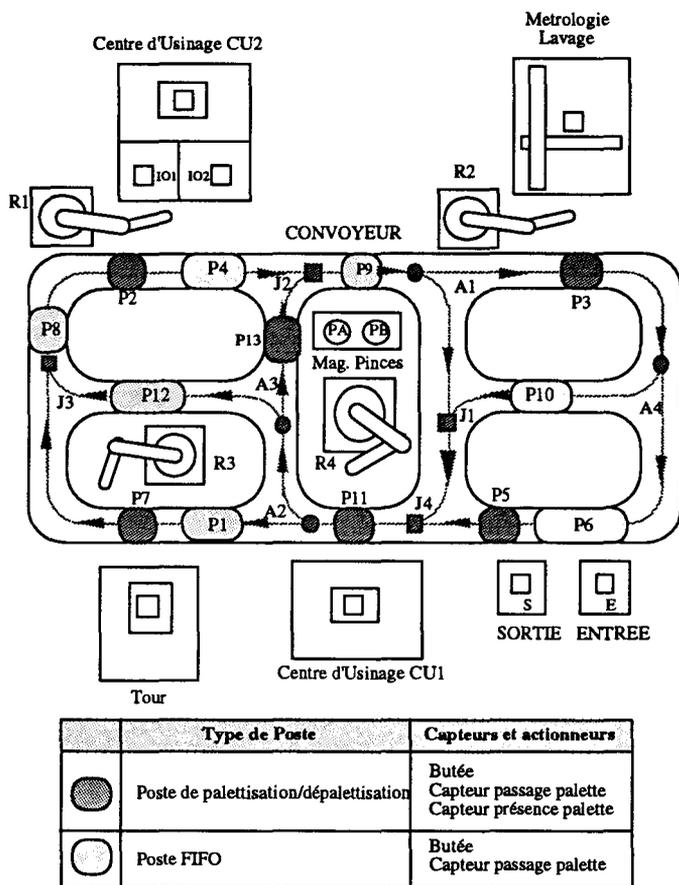


Figure III. 9 : Exemple de cellule flexible

Nous allons considérer le système de transport constitué principalement par le convoyeur. Le dépliage du convoyeur nous permet d'obtenir le graphe d'accessibilité suivant.

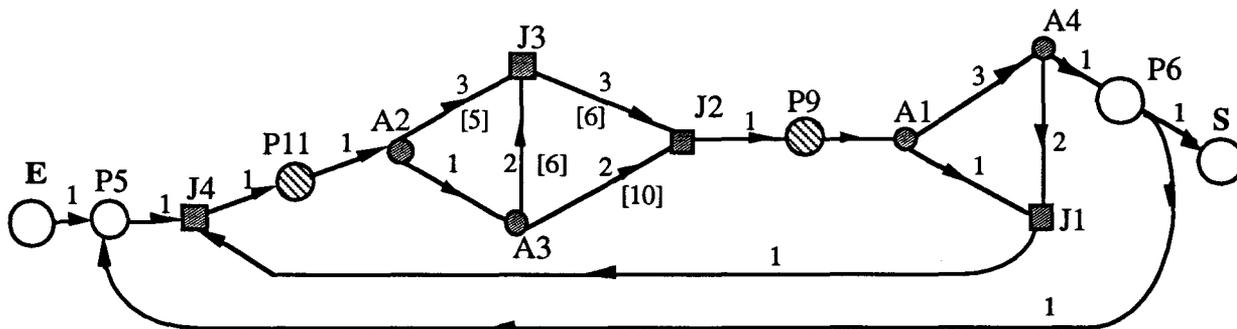


Figure III.10 : Graphe du système de transport

Sur le graphe, nous avons représenté les différentes possibilités d'évolution, c'est-à-dire les différents chemins permettant d'aller d'un point à l'autre de la cellule. Pour ne pas surcharger le schéma, les postes ne représentant pas un choix de chemins sont représentés par la deuxième pondération des arcs. Cette pondération correspond au temps d'attente à ces postes. Ainsi, le poids [5] étiquetant l'arc A2-J3 représente le temps d'attente en P1 et P7, alors que la valeur 3, correspond au temps de transfert  $1_{A2,J3}$  de A2 vers J3. Ce temps d'attente va être mis à jour progressivement lorsque le temps évoluera.

Supposons que nous désirons transférer un produits du poste P11 au poste P9, en 10ut. La figure ci-dessus représente l'état d'occupation du système de transfert au début de la recherche de chemins. Lorsque les temps d'attente ne sont pas pris en compte, le plus court chemin en temps de transfert, correspond à la séquence P11, A2, A3, J2, P9 de longueur 5.

2 ut plus tard, si nous supposons que le produit dont on cherche le chemin se trouve en A3, nous avons le graphe suivant :

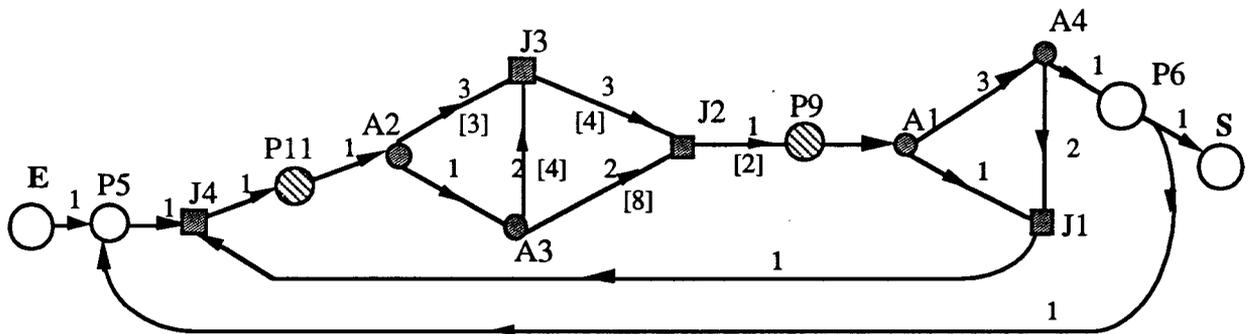


Figure III.11 : Graphe modifié du système de transport

L'application de l'algorithme de recherche de chemin présenté précédemment nous permet d'obtenir comme premier chemin la séquence ( $C_1 = P11, A2, A3, J3, J2, P9$ ), se faisant en 10ut. Si nous supprimons l'arc A3-J3 de ce premier chemin, nous obtenons un deuxième chemin correspondant à la séquence ( $C_2 = P11, A2, A3, J2, P9$ ), se faisant en 11ut. Ce deuxième chemin ne satisfaisant pas les contraintes temporelles, nous allons chercher le nouveau deuxième chemin à partir du premier aiguillage du graphe initial. Ce deuxième chemin correspond à la séquence ( $C_2 = P11, A2, J3, J2, P9$ ), de longueur 9. Parmi les deux chemins satisfaisant les contraintes temporelles, celui ayant le moins de sommet est le deuxième. Ce chemin ( $C_2 = P11, A2, J3, J2, P9$ ) correspond donc à la séquence que devra emprunter le produits à router si ce dernier veut arriver en P9 au maximum en 10ut.

## 2.3. Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans cette partie au contrôle du déroulement des opérations de transfert. Concernant les conflits d'accès aux ressources, nous avons présenté deux fonctions de priorité permettant de gérer dynamiquement ces conflits en tenant compte de l'état d'avancement des produits. Dans le cadre du routage des produits entre ressources de transformation d'état, nous avons proposé un algorithme de recherche de chemins qui prend en compte l'occupation dynamique du système de transport. Cet algorithme nous permet de choisir parmi deux chemins possibles respectant l'intervalle de temps admissible, celui ayant le moins de sommets. L'optimalité de la solution obtenue n'est pas garantie, mais la flexibilité du système de transport est assez bien exploitée.

## 3. CONTROLE DES OPERATIONS DE TRANSFORMATION D'ETAT

Cette partie concerne le contrôle du déroulement des opérations de transformation d'état en phase de production. Ce problème a été abordé de différentes façons soit par l'analyse de profil de flux, soit par la notion de séquence de groupes (voir Chapitre I, §3.2.1).

D'autres approches sont basées sur les règles de production [Panwalker et al 77], [Hershauer et al 75]. L'inconvénient majeur des règles de production pour le contrôle des opérations est qu'elles réalisent un choix immédiat d'opérations, sans prendre en compte l'environnement spatio-temporel du produit. Par conséquent, une machine occupée peut être dans l'instant évitée, mais, si elle doit être revisitée plus tard par le même produit, il est possible que la situation de la machine à ce moment là soit beaucoup moins favorable. Cette apparente flexibilité de séquençement (de choix de règle de priorité simple) diffère en partie le problème mais ne le résout pas [Lin et al 91]. Les conséquences sur l'horizon de production peuvent être désastreuses, comme par exemple des dépassements de capacités ou de délais en fin de période. Ceci confirme notre proposition selon laquelle la coordination entre les produits contrôlés et les machines a besoin d'être étudiée en détail, avec estimation des conséquences des décisions. C'est ce que nous proposons d'aborder dans cette partie.

Nous introduisons d'abord des indicateurs permettant de déterminer si le maintien de la séquence prévisionnelle vis-à-vis de l'état courant du procédé ne dégrade pas fortement l'ordonnancement initial. Nous présentons par la suite des corrections progressives en exploitant

d'une part les marges disponibles, et d'autre part la flexibilité inhérente au système de production : gammes flexibles, machines polyvalentes, etc.

### **3.1. Eléments de quantification de l'état du système : *détection des incohérences par rapport au calcul prévisionnel***

Nous avons défini dans le paragraphe 1.3.2.2 du chapitre III, la notion de séquence d'opérations et d'intervalle de lancement. Ces subdivisions sont nécessaires car le comportement du système est par hypothèse difficile à quantifier sur un horizon important, et par conséquent, l'observabilité qu'on peut en avoir est limitée. De plus, lorsqu'un horizon de pilotage est important, si on modifie certaines dates d'affectation, cela peut avoir des conséquences sur l'ordonnancement prévu, car les modifications effectuées ne sont pas toujours locales.

Nous allons introduire ici deux notions permettant de qualifier ou de statuer sur l'admissibilité d'un ensemble d'opérations. La première évalue la conformité de la séquence d'opération par rapport aux dates de fin souhaitées, et la seconde sa conformité par rapport à la disponibilité du produit dans les files d'attente des machines. Puisque nous nous occupons de l'aspect adaptatif, ces deux notions sont évaluées avant la fin de l'opération en cours (phase de stabilité transformationnelle), et conditionnent l'opération à engager au prochain changement d'état du système (§1.3.2.3 chap. III).

#### **3.1.1. Marge d'une séquence d'opérations (MS)**

Nous considérons une séquence d'opérations, et raisonnons de façon prévisionnelle sur la structure de données correspondante. Cela permet de valider partiellement l'ordonnancement prévisionnel, avant tout lancement d'opérations. La marge de séquence va permettre de déterminer l'opération en retard dans la séquence.

##### **3.1.1.1. définition de la marge opératoire**

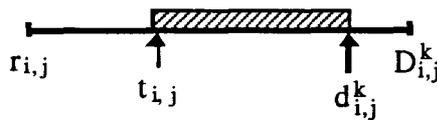
Considérons une opération  $i$  d'un produit  $j$  à réaliser sur une ressource  $k$ , et une date de début  $t_{i,j}$  d'exécution de cette opération qui sera précisée par l'environnement le moment venu.

La marge opératoire considère individuellement les opérations. A partir des données courantes, on compare la date de fin initialement prévue et la date de fin estimée en temps réel.

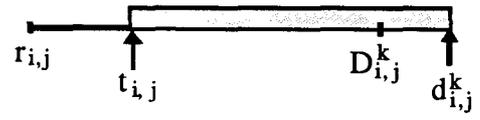
La marge opératoire se définit comme la différence entre la date de fin prévisionnelle  $D_{i,j}^k$  et la date de fin  $d_{i,j}^k$  estimée en temps réel. On peut donc écrire :

$$m_{i,j}^k = D_{i,j}^k - d_{i,j}^k \tag{13}$$

Deux cas peuvent se produire



$$m_{i,j}^k \geq 0 \tag{14}$$



$$m_{i,j}^k < 0 \tag{15}$$

Figure III.12 : définition de la marge opératoire

\* la marge opératoire est positive ou nulle (1er cas) : on est dans la zone de fonctionnement normal. Les délais internes (locaux) sont respectés.

\* la marge opératoire est négative (2ème cas) : Le délai local interne n'est pas respecté, ce qui correspond à une indication de dysfonctionnement partiel. On va chercher à estimer la conséquence de ce dépassement de date sur les autres opérations ou produits liés par l'utilisation de la même ressource, à l'intérieur d'une même séquence d'opérations.

### 3.1.1.2. définition de la marge d'une séquence d'opérations

Pour étendre le calcul de marge à l'ensemble des produits de la séquence d'opérations, la marge opératoire est calculée pour chaque opération de la séquence. Lorsque toutes les marges opératoires sont positives, les délais locaux sont tous respectés. En revanche, si une marge opératoire est négative, l'opération correspondante est localement en retard dans la séquence. Il est donc judicieux de s'intéresser aux produits qui ont le moins de marge opératoire.

La marge d'une séquence se définit comme étant la plus petite marge opératoire de la séquence. Ce qui se traduit par l'expression suivante:

$$MS(G^k) = \text{Min}_{j \in G^k} [m_{i,j}] \tag{16}$$

Cette marge de séquence  $MS(G^k)$  permet de savoir si la séquence commençant par l'opération candidate est exécutable sans qu'aucune opération de la séquence ne soit en retard. De cette définition, découle l'une des deux conditions d'admissibilité d'une séquence d'opérations.

### 3.1.1.3. 1<sup>ère</sup> condition d'admissibilité d'une séquence d'opérations

L'admissibilité d'une séquence s'obtient en examinant la marge de séquence définie précédemment. Une séquence d'opérations est admissible si sa marge de séquence est positive; c'est-à-dire si au vu des conditions courantes (connaissance que l'on a du système), aucune opération n'est en retard. Cette condition se traduit de la façon suivante:

$$MS(G^k) \geq 0 \text{ séquence d'opérations admissible,} \quad (17)$$

$$MS(G^k) < 0 \text{ séquence d'opérations non admissible.} \quad (18)$$

Ce résultat constitue la première condition à satisfaire pour le lancement d'opérations. Il est principalement basé sur les dates de fin d'opérations, et sur les dates de début d'opérations. Lorsque, pour deux séquences possibles, toutes les marges de séquences sont négatives, la moins mauvaise des solutions c'est-à-dire celle correspondant au plus petit retard est la séquence de plus grande marge. Ce choix permet de guider les actions correctives vers des opérations particulières.

## 3.1.2. Marge d'absorption de l'opération à lancer (MA)

La seconde condition permettant de s'assurer du bon déroulement de la production est la satisfaction de la date de disponibilité des produits qui se mesure par la capacité d'absorption de l'opération de tête de séquence ou encore par le degré de liberté temporel que l'on a sur la disponibilité des produits. Cette marge d'absorption permet du fait de la bonne utilisation du potentiel d'anticipation, d'évaluer quantitativement la possibilité d'absorber des défaillances limitées dans le temps.

### 3.1.2.1. Définition

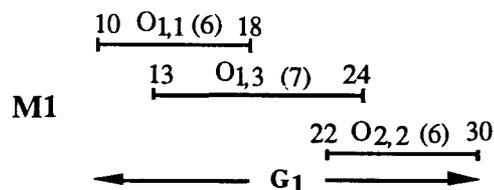
La marge d'absorption permet de mesurer la marge dont on dispose si on commence la séquence par l'opération en tête de séquence. Elle correspond au décalage maximum que l'on peut avoir sur la date de début au plus tôt de l'opération en tête de séquence, si on veut respecter

les dates de fin au plus tard des autres opérations de la séquence. Elle indique le degré de liberté que l'on a en permutant deux opérations de façon à obtenir celle qui donne le plus de marge.

Ce test permet de déterminer la marge dont on dispose sur la disponibilité des produits concernant les opérations en concurrence. Elle permet d'une part, de choisir parmi les opérations exécutables celle qui a le moins de marge et d'autre part, de savoir si l'exécution tardive des opérations (cas le plus défavorable) modifie les dates de disponibilité des produits au pied des machines.

Il est donc convenable pour se préserver des possibilités de réaction de choisir l'opération qui a le moins de marge, tout en espérant que les perturbations aient une durée inférieure aux marges existantes. Cette technique consistant à choisir l'opération qui a le moins de marge est similaire l'approche développée dans ORDO [Billaut 93], concernant le calcul de la marge libre séquentielle.

Nous allons définir formellement la marge d'absorption à l'aide d'un exemple. Considérons la séquence d'opérations suivante constituée de  $(O_{1,1}, O_{1,3}, O_{2,2})$  figure III.13.



**Figure III.13 : Exemple de séquence d'opérations**

Le but est de rechercher dans la séquence courante, l'opération ou le produit dont la transformation commencerait avant la date de disponibilité du produit. Rappelons ici que la notion de prévisionnel ne se réfère pas toujours à l'ordonnancement initial, mais aux dernières modifications compte tenu du contexte dynamique de l'atelier, et de l'autonomie partielle accordée au pilotage.

Nous allons d'abord calculer successivement les dates de début au plus tard de l'opération de tête de séquence si chaque opération de la séquence s'achevait à sa date au plus tard. Autrement dit, nous calculons la date de début au plus tard de  $O_{i,j}$  pour que les dates de fin des autres opérations soient respectées.

Supposons  $t=10$ , avec la séquence principale donnée, calculons les dates de début au plus tard de chaque opération, en supposant le cas le plus défavorable où les opérations s'achèvent à leur date de fin prévue.

Supposons que l'opération  $O_{1,1}$  s'exécute au plus tard. Sa date de disponibilité sera  $t=12$ .

$$- O_{1,1} \text{ au plus tard : } \hat{r}_{1,1} = 18-6=12$$

De même si les opérations  $O_{1,1}$  et  $O_{1,3}$  s'exécutent au plus tard, on aurait pour date de disponibilité.

$$- O_{1,3} \text{ au plus tard } \hat{r}_{1,3} = 24-7-6= 11$$

Si les trois opérations s'achevaient au plus tard, on aurait :

$$- O_{2,2} \text{ au plus tard } \hat{r}_{2,2} = 30-6-7-6= 11$$

Le minimum des dates de début au plus tard de  $O_{1,1}$  étant égal à 12. Appelons ce minimum  $\hat{r}^*$ . On en déduit :

$$\hat{r}^*_{1,1} = 11$$

Nous constatons dans ce cas particulier que les dates de début au plus tard sont toutes supérieures aux dates de début au plus tôt ou de disponibilité prévisionnelle.

Ainsi, si nous considérons une séquence d'opérations, ayant un ordre partiel ou total dû à l'ordonnancement prévisionnel, et si nous donnons à chaque opération un rang  $v$  lié à cet ordre, l'expression générale de la date de début au plus tard de l'opération de tête de séquence est donnée par :

$$\hat{r}_{i,j} = D_{u,v}(w) - \sum_{\substack{q=1 \\ (i',j') \in G^k}}^w p_{i',j'}(q) \quad (19)$$

avec  $D_{u,v}(w)$  date de fin de l'opération  $O_{u,v}$  de rang  $w$  dans la séquence,

et  $q= 1, \dots, w$ .

Se pose ici le problème de l'explosion combinatoire du nombre de séquences possibles à explorer pour ce calcul. On démontre dans [Kallel et al 85] que, lorsque les opérations sont classées par dates dues croissantes, la recherche combinatoire est réduite par l'ordre partiel introduit par ce classement. Dans notre cas, cette réduction du nombre de

séquences à explorer est due à la notion de gamme opératoire et au préordre induit par l'ordonnement prévisionnel à travers la séquence principale.

Parmi toutes les dates de disponibilité courantes, la valeur du minimum nous renseigne sur le produit nécessitant une attention particulière. Le produit correspondant serait celui qui dispose de la marge la plus petite sur sa disponibilité, et qui serait donc un produit critique. Dans ce cas, son transfert devrait se faire très rapidement (produit prioritaire statiquement) et/ou la transformation devrait être envisagée sur une ressource équivalente. Ainsi, la marge d'absorption de l'opération candidate est définie de la façon suivante :

$$MA(O_{i,j}) = \hat{r}^*_{i,j} - r_{i,j} \quad (20)$$

$$\text{où } \hat{r}^*_{i,j} = \underset{G^k}{\text{Min}} [ \hat{r}_{i,j} ] \quad (21)$$

En effet, s'il en était autrement, c'est-à-dire si une des dates calculées était inférieure à celle de l'opération de tête sur la figure III.13, cela reviendrait à prendre en compte une situation complexe dans laquelle l'opération concernée devrait commencer avant que le produit ne soit disponible; ce qui remettrait en cause les dates de fin des opérations précédentes, d'où une incohérence par rapport à l'ordonnement prévisionnel (ou un problème dans la mise à jour des données). Ce cas sera traité dans le cadre des actions correctives (cf. §3.2.2. de ce chapitre). Dans le cas d'un ordre total, cela signifie que les opérations qui précèdent celle en difficulté doivent :

- s'exécuter le plus tôt possible sur une machine plus rapide ou,
- être transférées le plus rapidement possible ou,
- être reportées, s'il s'agit d'une gamme flexible.

### 3.1.2.2. 2<sup>ème</sup> condition d'admissibilité d'une séquence d'opérations

La deuxième condition de lancement d'une opération est liée à sa marge d'absorption. Ainsi, pour que tout se passe bien par rapport à la date de disponibilité des produits, il est souhaitable que la marge d'admissibilité soit positive ou nulle. Cette deuxième condition d'admissibilité de séquence s'écrit donc :

$$MA(O_{i,j}) \geq 0 \quad \text{séquence admissible} \quad (22)$$

$$MA(O_{i,j}) < 0 \quad \text{" non admissible.} \quad (23)$$

### 3.1.3. Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie deux indicateurs permettant de déterminer si la production évolue conformément aux prévisions. Puisque le temps constitue un facteur important de mesure de comportement, nous vérifions à travers ces notions la satisfaction des dates de début et de fin d'opérations appartenant à la séquence. La détermination de la marge de séquence d'opérations et de la marge d'admissibilité est nécessaire pour déterminer l'action corrective à engager.

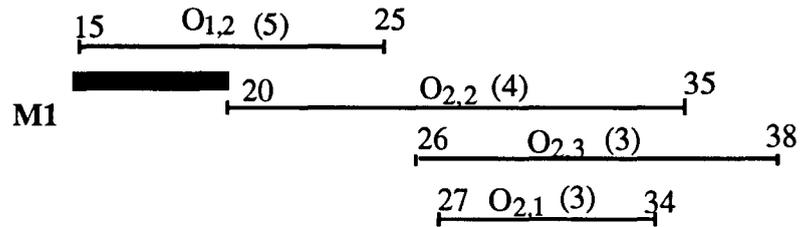
## 3.2. Types d'actions correctives [Tawegoum et al 94a]

Après avoir défini les notions permettant de quantifier l'état du système, nous proposons dans cette partie, différentes actions correctives lorsque des modifications ou des comportements inattendus surviennent. Nous allons successivement présenter les techniques de correction basées sur la permutation d'opérations, la consommation de marge d'opérations, l'échange d'opérations entre machines équivalentes, le transfert d'opérations vers une machine équivalente et le réordonnancement des opérations.

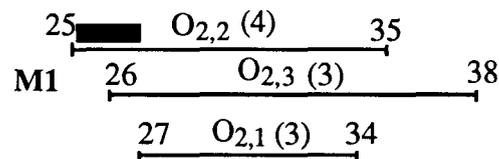
### 3.2.1. Permutation locale d'opération

Il s'agit d'exploiter la flexibilité des gammes, ou la marge opératoire de certains produits appartenant à une séquence d'opérations pour réagir aux perturbations. En effet, alors que l'ordonnancement a conduit au choix d'une séquence, les modifications successives de données en cours de production peuvent conduire à une structure de données où deux opérations sont potentiellement permutable. Nous proposons d'utiliser les indicateurs présentés précédemment (marge de séquence et marge d'absorption) pour choisir l'opération à exécuter.

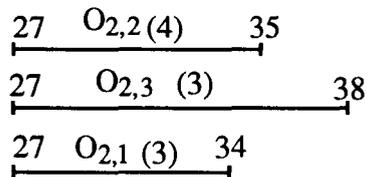
Nous avons choisi des exemples simples pour illustrer notre propos. Dans les schémas représentant les opérations à réaliser, les perturbations seront représenté par des traits épais noir. Considérons tout d'abord une séquence constituée de quatre opérations à réaliser sur la machine M1. Sur la figure suivante, l'immobilisation partielle de M1 commence à  $t=15$  et finit à  $t=20$ .



Supposons que nous soyons à la date 20, Après cette première perturbation, les calculs montrent que l'opération  $O_{1,2}$  peut encore se réaliser dans les conditions satisfaisant l'ordonnancement prévisionnel en consommant simplement sa propre marge. Supposons de plus, qu'à la fin de l'opération  $O_{1,2}$ , M1 soit encore en immobilisation de 2 ut (unité de temps) comme représenté ci-dessous :



Supposons de plus qu'avant la fin de l'opération  $O_{1,2}$  le séquençage initial soit  $O_{2,2}, [O_{2,3}, O_{2,1}]^*$ . L'astérisque représente la permutableté des opérations entre crochets. Puisque les dates de disponibilité sont voisines, nous pouvons avoir les nouvelles séquences suivantes:  $G_1^1: O_{2,2}, O_{2,3}, O_{2,1}$  et  $G_2^1: O_{2,2}, O_{2,1}, O_{2,3}$ . La situation à la fin de cette nouvelle perturbation est :



Nous allons vérifier l'admissibilité de chacune des deux séquences  $G_1^1: O_{2,2}, O_{2,3}, O_{2,1}$  et  $G_2^1: O_{2,2}, O_{2,1}, O_{2,3}$  sur la machine M1.

Le calcul de la marge de séquence donne :

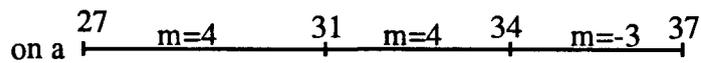
pour  $G_1^1: O_{2,2}, O_{2,3}, O_{2,1}$ ,

la marge opératoire de  $O_{2,2}$  est  $m_{2,2} = 35 - (27 + 4) = 4$ ,

la marge opératoire de  $O_{2,3}$  (précédé par  $O_{2,2}$ ) est  $m_{2,3} = 38 - (27 + 4 + 3) = 4$ ,

la marge opératoire de  $O_{2,1}$  (précédé par  $O_{2,2}$  et  $O_{2,3}$ ) est  $m_{2,1} = 34 - (27 + 4 + 3 + 3) = -3$ .

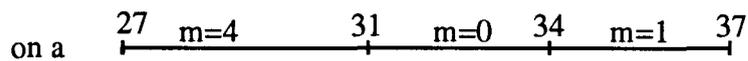
Ces résultats sont regroupés sur le diagramme suivant :



m représente la marge opératoire des opérations dans la séquence, calculée précédemment d'après l'expression (13).

On déduit, d'après (16) une marge de séquence  $MS(G_1^1) = -3$ .

Pour  $G_2^1: O_{2,2}, O_{2,1}, O_{2,3}$ ,



et on déduit la marge de séquence  $MS(G_2^1) = 0$ .

La deuxième séquence satisfait la première condition d'admissibilité (expression 17).

Calculons la marge d'admissibilité de l'opération  $O_{2,2}$  dans cette séquence.

- \* Si  $O_{2,2}$  est exécutée au plus tard, sa date de début au plus tard est  $\hat{r}_{2,2} = 35 - 4 = 31$ .
- \* Si  $O_{2,2}$  et  $O_{2,1}$  sont exécutés au plus tard, la date de début au plus tard de  $O_{2,2}$  est  $\hat{r}_{2,2} = 38 - 3 - 4 = 31$ .
- \* Si  $O_{2,2}$ ,  $O_{2,1}$  et  $O_{2,3}$  sont exécutés au plus tard, la date de début au plus tard de  $O_{2,2}$  est  $\hat{r}_{2,2} = 34 - 3 - 3 - 4 = 28$ .

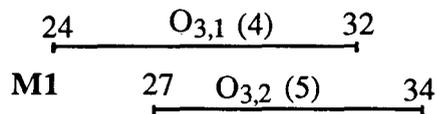
Parmi ces trois valeurs le minimum correspond à la valeur de  $r^*_{2,2}$ . Nous avons donc  $\hat{r}^*_{2,2} = 28$ . Nous déduisons d'après l'expression (20), la marge d'admissibilité  $MA(O_{2,2}) = 28 - 27 = 1$ ,

Les deux conditions d'admissibilité étant satisfaites pour la deuxième séquence, nous pouvons considérer après cette vérification que le lancement de l'opération  $O_{2,2}$  moyennant une permutation locale des opérations  $O_{2,3}$  et  $O_{2,1}$ , permet de respecter les consignes initiales d'ordonnement.

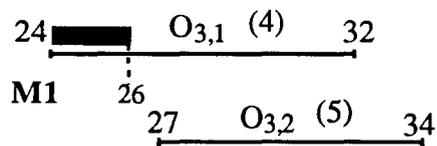
### 3.2.2. Consommation de marge par anticipation

Lorsque la situation courante rend la séquence non admissible par rapport au prévisionnel, la consommation par anticipation permet d'analyser s'il est possible d'accepter un retard local. Pour ce faire, nous allons estimer la conséquence de l'acceptation d'un dépassement local de la marge d'une opération, sur les opérations suivantes du même produit ou de la même séquence. Ce dépassement se fait sous la condition de ne pas modifier de façon significative le séquencement initial, et risquant de rendre inadmissible l'ordonnancement prévisionnel.

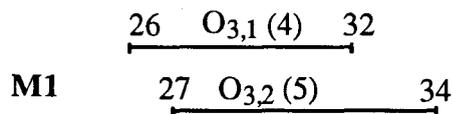
Cet exemple illustre une séquence d'opérations sur M1. Nous supposons les opérations  $O_{3,1}$  et  $O_{3,2}$  permutables.



Le calcul montre que les conditions d'admissibilité de séquence sont bien vérifiées ( $MS(G_1^1) = 1$  et  $MA(O_{3,1}) = 1$ ). Supposons qu'un problème apparaisse sur M1, et que la nouvelle situation soit telle que la date de disponibilité de M1 soit égale à 26.



A une date quelconque  $t < 26$ , nous voulons prédire ce qui se passera à la fin de l'arrêt de M1, qui se termine à l'instant  $t=26$ . Les informations disponibles sont représentées ci-dessous.



Calculons la marge de séquence de  $G_1^1: O_{3,1}, O_{3,2}$

Nous obtenons :  $\begin{array}{c} 26 \quad m=2 \quad 30 \quad m=-1 \quad 35 \\ \hline \end{array}$

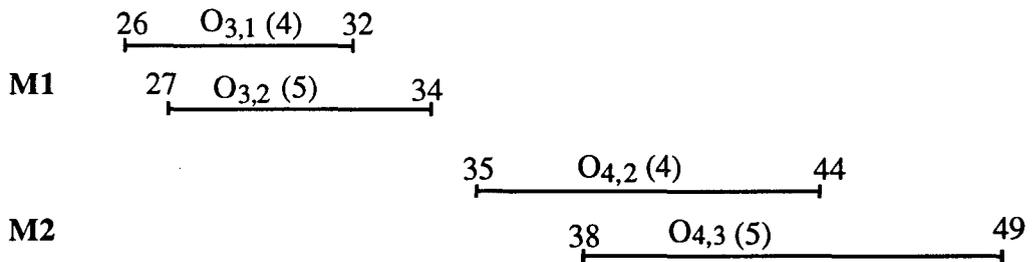
et on en déduit  $MS(G_1^1) = -1$

La marge de séquence étant négative, et les dates de disponibilité assez voisines, si nous permutons les opérations de la séquence, nous obtenons une nouvelle séquence définie par  $G_2^1:O_{3,2},O_{3,1}$ . Cette séquence a pour marge opératoire

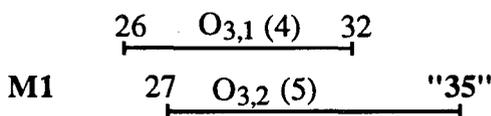
$$\begin{array}{c} 27 \quad m=+2 \quad 32 \quad m=-4 \quad 36 \\ \hline \end{array}$$

et pour marge de séquence  $MS(G_2^1) = -4$ .

Cette nouvelle séquence est donc moins bonne que la séquence initiale qui sera conservée. Considérons maintenant la situation actuelle avec un retard local sur  $O_{3,2}$  en supposant donc que tout se déroule suivant la séquence 1, nous allons étudier l'effet de ce retard local sur l'opération suivante du même produit; par exemple, l'opération  $O_{4,2}$  appartenant à la séquence de M2. Nous allons dans ce cas considérer deux séquences d'opérations appartenant à deux machines différentes M1 et M2.



Nous allons étudier dans quelles conditions le retard de 1 ut de la première séquence peut être rattrapé dans le séquençement de M2. En se projetant sur la séquence à laquelle appartient l'opération suivante sur M2, le calcul de  $MS(G^2)$  donne 5 ut. Ainsi, si aucune autre perturbation ne survient, le retard sur la date de fin de l'opération  $O_{4,2}$  peut être de 5 ut. La date de disponibilité de  $O_{4,2}$  sur M2 peut donc être modifiée (décalée de 1 ut vers la droite) pour satisfaire la condition de marge de séquence sur M1. Avec ces nouvelles modifications, on obtient les nouvelles données de  $O_{3,2}$  reprises sur la figure suivante :



\* Avec les modifications courantes la marge d'absorption de l'opération de tête de séquence (correspondant à la meilleure séquence) est :

$$\hat{r}^*_{3,1} = 25 \quad \text{on en déduit} \quad MA(O_{3,1}) = -1$$

Etudions le comportement de  $O_{4,2}$ . Puisque la marge de séquence est positive, nous calculons sa marge d'admissibilité. Nous avons  $\hat{r}^*_{4,2} = 40$  et nous déduisons  $MA(O_{4,2}) = 5$ . On peut donc consommer cinq unités de temps sur  $O_{4,2}$ . Pour tenir compte de la durée de transfert (1 ut) du produit 2, de la machine M1 vers M2 après la réalisation de l'opération  $O_{3,2}$ , la nouvelle date de disponibilité de  $O_{4,2}$  sur la machine M2 est  $t=36$ .

Le nouveau calcul donne pour  $G^2:O_{4,2},O_{4,3}$

$$\begin{array}{c} 36 \quad m=+4 \quad 40 \quad m=+4 \quad 45 \\ \hline \end{array}$$

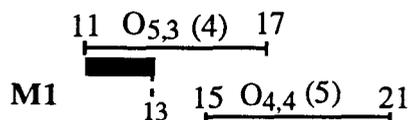
et on en déduit  $MS(G^2) = 4$

Un relâchement de contraintes est ainsi possible sur la base de deux séquences consécutives.

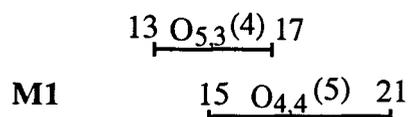
### 3.2.3. Echange d'opérations entre deux machines équivalentes

Cette réaction nécessite une condition supplémentaire concernant l'existence des machines équivalentes. L'échange d'opérations doit aussi se dérouler sous la condition de non dépassement de capacité des ressources dans l'intervalle de lancement correspondant.

Considérons la machine M1 devant réaliser les opérations suivantes et supposons que l'opération précédente soit terminée plus tard ou encore que nous avons un arrêt momentané de M1, et que sa date de disponibilité est 13.

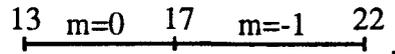


Après remise en état (ou à la fin de l'opération en cours), nous avons la situation



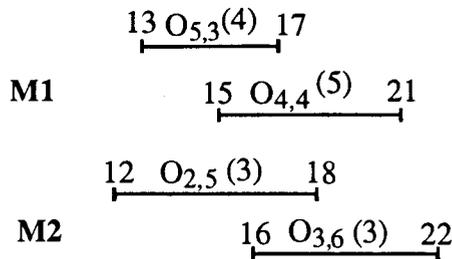
Nous allons calculer la marge de la séquence d'opérations à réaliser sur M1.

Pour  $G_1^1: O_{5,3}, O_{4,4}$ , nous avons



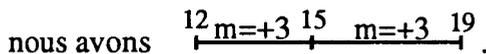
La marge de séquence correspondante est  $MS(G_1^1) = -1$ .

Nous supposons que les machines M1 et M2 sont équivalentes, et nous allons rechercher la faisabilité d'un échange d'opérations entre les deux machines. Deux séquences d'opérations doivent ainsi être considérées. Supposons que nous sommes par exemple à  $t=11$ , et que la situation à la fin des opérations sur M1 et M2 soit la suivante:



Nous allons donc calculer la marge de la séquence d'opérations à réaliser par M2.

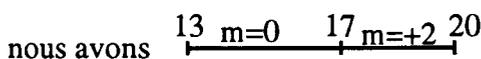
Pour  $G_1^2: O_{2,5}, O_{3,6}$



La marge de séquence correspondante est  $MS(G_1^2) = +3$ .

La marge de la séquence d'opération sur M1 est négative et celle de M2 positive. Supposons que  $O_{4,4}$ , opération responsable du retard constaté sur l'indicateur  $MS(G_1^1)$ , soit réalisable par M2. Nous allons analyser la conséquence de l'échange des opérations  $O_{4,4}$  et  $O_{3,6}$  entre les deux machines. Le calcul des nouvelles marges de séquence donne :

Pour  $G_2^1: O_{5,3}, O_{3,6}$



La marge de séquence correspondante est  $MS(G_2^1) = 0$

Pour  $G_2^2: O_{2,5}, O_{4,4}$

nous avons  $\underbrace{12 \quad m=+3 \quad 15 \quad m=+1 \quad 20}$  .

La marge de séquence correspondante est  $MS(G_2^2) = +1$ .

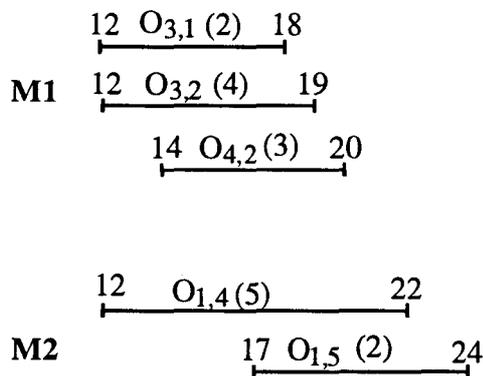
Le calcul des marges d'admissibilité donne  $MA(O_{5,3}) = 0$  et  $MA(O_{2,5}) = 1$ . Les deux conditions d'admissibilité sont vérifiées. On peut donc réorienter  $O_{4,4}$  vers M2 et  $O_{3,6}$  vers M1. Ce qui permet au système de production d'évoluer normalement grâce à une meilleure utilisation des marges.

Le cas suivant est assez similaire et peut correspondre à un dépassement temporaire de capacité sur une machine, ce qui nécessite un transfert vers une ressource équivalente.

### 3.2.4. Transfert d'opération d'une machine vers une autre

Cette réaction diffère de la précédente car elle est unidirectionnelle. Ce type de situation se produit lorsque le maintien d'une séquence après modification entraîne un fort dépassement de charge d'une machine et un retard pour les opérations devant se succéder sur la même machine pendant le même intervalle de lancement. La réaction à tenter est le transfert d'opérations ce qui nécessite des machines équivalentes non saturées pendant l'intervalle de lancement.

Considérons deux machines, disponibles à  $t=12$ , et ayant des opérations à réaliser selon la configuration suivante :



Le calcul de marge de la séquence M1 donne :  $MS(G_1^1) = -1$

Le minimum des dates de début de  $O_{3,1}$  en considérant que les autres opérations de sa séquence s'achèvent au plus tard étant égal à 11, on a  $\hat{r}^*_{3,1} = 11$ . On en déduit une marge d'admissibilité négative :  $MA(O_{3,1}) = -1$ . Dans ces conditions, la séquence n'est pas admissible.

calculons maintenant la marge de la séquence d'opérations  $G_1^2:O_{1,4},O_{1,5}$  sur la machine M2

Nous avons  $\begin{array}{c} 10 \quad 12 \quad 16 \\ \underbrace{\quad \quad \quad}_{m=+5} \quad \underbrace{\quad \quad \quad}_{m=+5} \end{array}$

et nous en déduisons  $MS(G_1^2) = +5$ .

Nous constatons que la marge de la séquence  $G_1^2:O_{1,4},O_{1,5}$  sur M2 est au moins égale à la durée de  $O_{4,2}$  qui est l'opération rendant  $MS(G_1^1)$  négative, nous allons former une nouvelle séquence  $G_2^2$  sur M2 par transfert de  $O_{4,2}$  sur cette machine, et vérifier ensuite son admissibilité.

Le calcul de sa marge de séquence de  $G_2^2:O_{1,4},O_{4,2},O_{1,5}$  obtenue après insertion de  $O_{4,2}$  nous donne

$\begin{array}{c} 12 \quad 17 \quad 20 \quad 22 \\ \underbrace{\quad \quad \quad}_{m=5} \quad \underbrace{\quad \quad \quad}_{m=0} \quad \underbrace{\quad \quad \quad}_{m=2} \end{array}$

$MS(G_2^2) = 0$ .

La marge d'admissibilité est de  $\hat{r}^*_{1,4} = 12$        $MA(O_{1,4}) = 0$ .

La nouvelle séquence est admissible et l'opération  $O_{4,2}$  ne commence qu'à  $t=17$ , ce qui laisse assez de temps pour le routage effectif vers M2. Un transfert partiel d'opérations entre machine équivalente constitue une autre type de réaction permettant d'absorber une perturbation.

### 3.2.5. Réordonnement

Les réactions menées jusqu'à maintenant mettaient en jeu un nombre réduit de produits et ressources. Il peut arriver des situations pour lesquelles, malgré ces essais de réaction, la perturbation est telle que les dates de libération des ressources dépassent l'intervalle de lancement. Nous proposons dans ce paragraphe d'analyser le dernier type d'action corrective

basé sur la recherche d'un nouvel ordonnancement. Dans le cas du réordonnancement, deux sous problèmes doivent être résolus:

- un problème d'affectation : choix parmi un ensemble de ressources possibles de celle qu'il faut affecter à la réalisation de chacune des tâches,
- un problème de séquençement : choix de l'ordre de réalisation de ces tâches sur les différentes ressources auxquelles elles ont été affectées.

L'affectation en temps réel des produits aux ressources est formulée comme un problème de recherche dans un espace d'état. L'espace d'état de recherche est généralement défini par le triplet (I,O,F) où I est l'ensemble des états initiaux (état courant), O l'ensemble des opérateurs sur les états (gamme opératoire, processus séquentiel d'usinage), et F l'ensemble des états "buts" dans lequel tous les produits d'un intervalle de lancement sont affectés.

Dans l'espace d'état, la stratégie de recherche est construite à partir d'un arbre de recherche pour lequel chaque noeud caractérise un état et la transition d'un état à un autre constitue l'affectation d'une opération à une machine. Ce processus est communément appelé expansion de noeud. Une solution du problème de recherche est un chemin défini par une séquence d'opérateurs qui conduisent de l'état de départ à l'état "but". Dans notre problème de réordonnancement, une solution est une séquence optimale d'affectation qui minimise une fonction de coût qui sera présentée par la suite.

Chaque feuille de l'arborescence correspond à l'ordonnancement d'un produit. Chaque état correspondant à l'affectation de la dernière opération est un état but. En commençant par l'opération source de la perturbation, chaque opération est ainsi assignée à une machine en respectant les contraintes de date et de précedence entre produits. Ainsi, le nombre de branches candidates en chaque noeud augmente avec le nombre de machines susceptibles de les réaliser, et le nombre de niveau fonction de l'état d'avancement du produit, ce qui équivaut au nombre d'opérations restantes. Le chemin du noeud de départ au noeud but correspond au problème d'assignation. En général dans la recherche d'espace d'état, le nombre de noeuds exploités avant d'atteindre la solution est souvent très prohibitif compte tenu de la taille des problèmes traités et de la flexibilité des systèmes étudiés.

Si la recherche n'est pas contrôlée, se pose alors le problème de l'explosion combinatoire. Du fait que les réactions, sur la base des propositions précédentes aient été menées en permanence, le nombre de produits généralement concernés par un réordonnancement est réduit, par rapport à la totalité des produits à contrôler sur un intervalle de lancement.

Parmi les algorithmes de recherche ordonnées, nous allons utiliser l'algorithme du A\* [Winston 84] pour trouver une solution d'affectation. Cette solution d'affectation garantit une solution rapide si la fonction d'évaluation  $f(n)$  de développement des noeuds est correctement définie. La fonction d'évaluation est utilisée pour accélérer le processus de recherche, en ordonnant correctement les noeuds les plus prometteurs : le noeud sélectionné pour l'expansion sera celui qui minimise  $f(n)$ . L'évaluation de la fonction  $f(n)$  à chaque noeud  $n$  estime la somme des coûts du chemin minimal du noeud  $n$  au noeud final. L'expression générale de  $f(n)$  est la suivante :

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (24)$$

où  $g(n)$  est le coût minimal du chemin du noeud racine au noeud  $n$  dans l'espace d'état et  $h(n)$  est le coût estimé du chemin (de coût minimal  $h^*(n)$ ) du noeud  $n$  au noeud but. On montre dans [Winston 84] que l'algorithme A\* garantit de trouver le chemin de coût minimal si la fonction heuristique  $h(n)$  du noeud  $n$  au noeud final est une sous estimation de la borne inférieure du chemin de coût minimal  $h^*(n)$  du noeud  $n$  au noeud but. Nous allons définir maintenant  $g(n)$  et  $h(n)$ .

### Expression de $g(n)$

Pour le problème d'affectation, nous définissons la disponibilité d'une machine  $l$  à l'instant  $t_0$ , comme étant la somme de l'instant courant  $t_0$  et de sa charge de travail correspondant à la séquence d'opérations courante (déjà affectées). Cette mesure de disponibilité permet de satisfaire la condition liée à la capacité cumulative des ressources de transformation. Ceci se traduit par l'expression :

$$\text{Disp}_{t_0}^l = t_0 + \sum_{j \in G^l} p_{i,j}^l \quad (25)$$

En effet, avant d'assigner une opération à une ressource, nous devons comparer la date d'arrivée du produit dans la file d'attente de la machine à la disponibilité de la même machine. Cette date est égale à la somme de la date courante et la durée de transfert du produit jusqu'à la machine candidate.

Nous allons comparer la disponibilité de la machine par rapport à la date d'arrivée du produit dans la file d'attente. En effet, si la date d'arrivée du produit est inférieure à la

disponibilité de la machine, le produit devra attendre. Si la situation inverse se produit, la machine devra attendre c'est la situation de famine. Dans les deux cas, c'est la plus grande des deux valeurs qui est dominante. D'où le choix du maximum pour tenir compte de cette simultanéité de disponibilité. La date de début de l'opération peut donc s'écrire :

$$\text{Max} (t_0 + \text{transf}_{i,j}^{k,l}; \text{Disp}_{t_0}^l) \quad (26)$$

Pour tenir compte des caractéristiques des machines, car nous supposons les machines polyvalentes et éventuellement à temps d'exécution différents, nous introduisons dans l'expression de  $g$  la durée d'usinage de l'opération candidate. Ainsi, pour que le produit soit rapidement usiné, il faudra choisir le minimum parmi toutes les dates de fin sur l'ensemble des machines pouvant réaliser l'opération à affecter. L'expression finale de  $g$  est donc :

$$g_j(n) = \text{Min}_{l \in L_i} [\max(t_0 + \text{transf}_{i,j}^{k,l}; \text{Disp}_{t_0}^l) + p_{i,j}^l] \quad (27)$$

où  $L_i$  est l'ensemble des machines pouvant réaliser l'opération  $i$ .

Ainsi,  $g(n)$ , coût de l'affectation courante, est la somme des durées d'exécution et/ou temps de transfert du noeud source au noeud  $n$ . Elle correspond à la date de fin au plus tôt de l'opération à affecter et tient compte de la file d'attente des produits au pied de chaque machine candidate.

### Expression de $h(n)$

Il s'agit ici de déterminer la deuxième partie de la fonction  $f$ . L'objectif est de définir  $h(n)$  de façon à avoir une sous-estimation bornée de  $h^*(n)$  pour tout  $n$ . Si la fonction  $h(n)$  surestime  $h^*(n)$  la recherche ordonnée peut diverger énormément de la solution optimale. D'un autre côté, si  $h(n) = 0$  pour tout  $n$ , aucune information heuristique sur le problème de recherche n'est utilisée pour ordonner les noeuds candidats et la recherche se réduit à une recherche de coût uniforme.  $h(n)$  est connue sous le nom de fonction de sous-estimation.

Ainsi, pour accélérer le processus de recherche, et réduire le nombre de noeuds d'expansion, une estimation de la borne inférieure de  $h^*(n)$  doit être choisie. Elle doit permettre de limiter le nombre de noeuds générés dans le placement d'opérations.

Considérons les deux expressions suivantes représentant les dates de fin de l'opération  $O_{i,j}$  sur  $l$  dans le cas où il n'y a aucun produit en attente sur  $l$  (23), et dans le cas où la charge de  $l$  serait non nulle (24):

$$\alpha = (t_0 + \text{transf}_{i,j}^{k,l} + p_{i,j}^l) \quad (28)$$

$$\beta = \text{Disp}_{t_0}^l + p_{i,j}^l \quad (29)$$

Pour ne pas surestimer la durée restante pour réaliser les opérations non encore placées, nous allons choisir le minimum entre ces deux termes, d'où l'expression suivante proposée pour  $h$  :

$$\mu = \min(\alpha, \beta) \quad (30)$$

$$h_j^l(n) = \sum_{l \in \Gamma} \mu \quad (31)$$

$h$  est donc une évaluation sous-estimée du coût minimal complétant l'affectation. La charge des machines et les temps de transfert (par produit, indépendamment des autres) sont pris en compte sans toutefois qu'il soit ici possible de tenir compte de attentes inévitables dues aux transferts des autres produits.

### Expression de $f(n)$

Dans cette recherche, le principe consiste à parcourir l'arbre des possibilités en minimisant la fonction de coût proposée. Chaque noeud de l'arborescence représente une allocation partielle d'un sous ensemble d'opérations. Il y aura donc autant de niveaux que d'opérations. Dans cette recherche arborescente, lorsqu'on connaît ou lorsqu'on obtient une solution réalisable  $S$ , il est inutile d'explorer les sous arbres dont la fonction de coût est supérieure à  $S$ . A chaque affectation on choisit la machine correspondant à la fonction de coût minimale. On place le produit sur la machine qui l'usinera le plus rapidement. L'expression de  $f$  que nous utilisons est minorante. En effet, l'estimation de la durée restante revient à supposer que le produit se déplace seul dans la cellule.

Un exemple d'utilisation de cette fonction de coût est donné au paragraphe 3.3.2.3-

### 3.3. Heuristique de contrôle d'opérations de transformation d'état [Tawegoum et al 94a]

#### 3.3.1. Heuristique de contrôle

En général, l'exploration systématique ou quasi systématique de toutes les alternatives de séquençement a une complexité à croissance exponentielle. Les heuristiques sont proposées dans le but de réduire les alternatives et de guider les choix non déterministes que doit faire l'algorithme de recherche. L'inconvénient est qu'elle ne peut constituer une preuve d'optimalité. Cependant, l'avantage d'une heuristique est qu'elle peut exploiter une information spécifique. L'heuristique que nous présentons ici permet de hiérarchiser les recherches en privilégiant d'abord les réactions qui font intervenir un nombre limité de ressources. Dans cet algorithme, les séquences d'instructions (blocs) sont représentées par les rectangles.

**POUR** chaque Machine

**A Chaque fin** d'évènement / opération, arrêt, panne .../

**CACULER** \* la marge de la séquence d'opérations

\* la marge d'absorption de l'opération candidate

**SI** Séquence admissible

**ALORS** **LANCER**  $O_i, j'$  ;

**SINON**

Essai réaction locale;

**SI** (il existe opérations permutable) **ET** (la nouvelle Séquence  $S'$  est admissible)

**ALORS** **LANCER**  $O_i, j'$  ;

**SINON**

Essai consommation par anticipation de la marge du produit rendant la marge de séquence négative;

**SI** la nouvelle Séquence  $S'$  est admissible

**ALORS** **LANCER**  $O_i, j'$  ; **MAJ** données;

**SINON**

Essai échange d'opération avec machine équivalente  
Essai Transfert d'opération vers machine équivalente  
**Si** la nouvelle séquence  $S'$  est admissible  
(*Choix de la séquence de grande marge d'absorption*)

**ALORS** **LANCER**  $O_i, j'$  ; **MAJ** données;

**SINON**

**REORDONNANCER** l'ensemble des produits;  
**MAJ** données

Une autre variante de cette heuristique consisterait à évaluer dans un même bloc les trois dernières actions correctives. Cela permettrait d'avoir au moment de la décision, un nombre plus important de solutions, parmi lesquelles le conducteur de ligne choisira, compte-tenu de la perturbation, celle qui satisfait le mieux les consignes de production. Cette inter-activité est nécessaire car si le système est fortement autonome, il est peu réceptif à certains événements extérieurs conditionnant son évolution.

La dynamique liée à l'évolution est simulée par le placement parallèle de produits sur différentes machines. Les produits sont classés par dates-dues croissantes, et leurs opérations successives sont ensuite placées. La charge des machines est prise en compte à chaque placement, et la machine choisie est celle qui réalisera le plus rapidement l'opération à placer.

### 3.3.2. Exemple de synthèse

Pour illustrer ce chapitre, nous présentons sur la figure III.14, un exemple d'ordonnancement prévisionnel obtenu par la méthode des ratios critiques, algorithmé à une machine avec règles de priorité. Cet exemple concerne un ensemble constitué de six produits appartenant à trois gammes A (ayant pour opérations t-f-l-), B (ayant pour opération t-f-t-l-) et C (ayant pour opérations f-t-l-) à réaliser dans la cellule flexible de l'EC Lille (Chap. II, fig. II.3) constituée de quatre machines : T, F1, F2 et L. Sur cet exemple,  $A_{21}$  représente l'opération 2 (f-) du produit 1 de la gamme A (t-f-l-). La gamme t-(f-t-)\*l- est flexible car les opérations 2 et 3 (entre parenthèses) sont permutables, l'astérisque traduisant la permutabilité des opérations. Nous supposons aussi dans cet exemple disposer de machines polyvalentes F1 et F2.

L'ordonnancement présenté sur la figure III.14 est supposé correspondre à un intervalle de lancement. Les taux de charge des machines T, F1, F2 et L sont respectivement 85%, 90%, 70% et 60%. Les dates de fin sont calculées au sens PERT. Cet exemple prend en compte les caractéristiques des produits (gamme flexible [gamme 2]) et la flexibilité des machines [F2]. Les flèches correspondent aux dates de libération des machines, et donc aux dates de fin au plus tard des dernières opérations de l'intervalle de lancement.

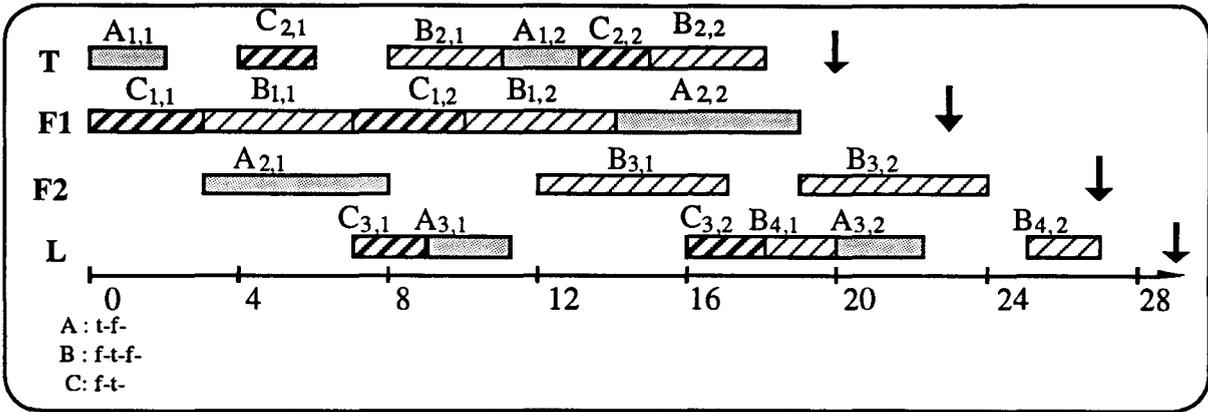


Figure III.14 : Exemple d'ordonnancement prévisionnel sur un intervalle de lancement

Nous allons présenter quelques exemples d'application des réactions précédemment développées. Dans ce qui suit, nous considérons les temps inter-opérateurs suffisants pour que le routage se fasse dans les fenêtres temporelles prévues. Les durées d'immobilisation des ressources sont estimables ou sont à peu près connues. Nous allons dans chaque cas créer des perturbations différentes qui vont se traduire par des arrêts machines, puis nous illustrerons l'application des actions correctives en suivant l'évolution de la production au cours du temps.

3.3.2.1. Exemple 1

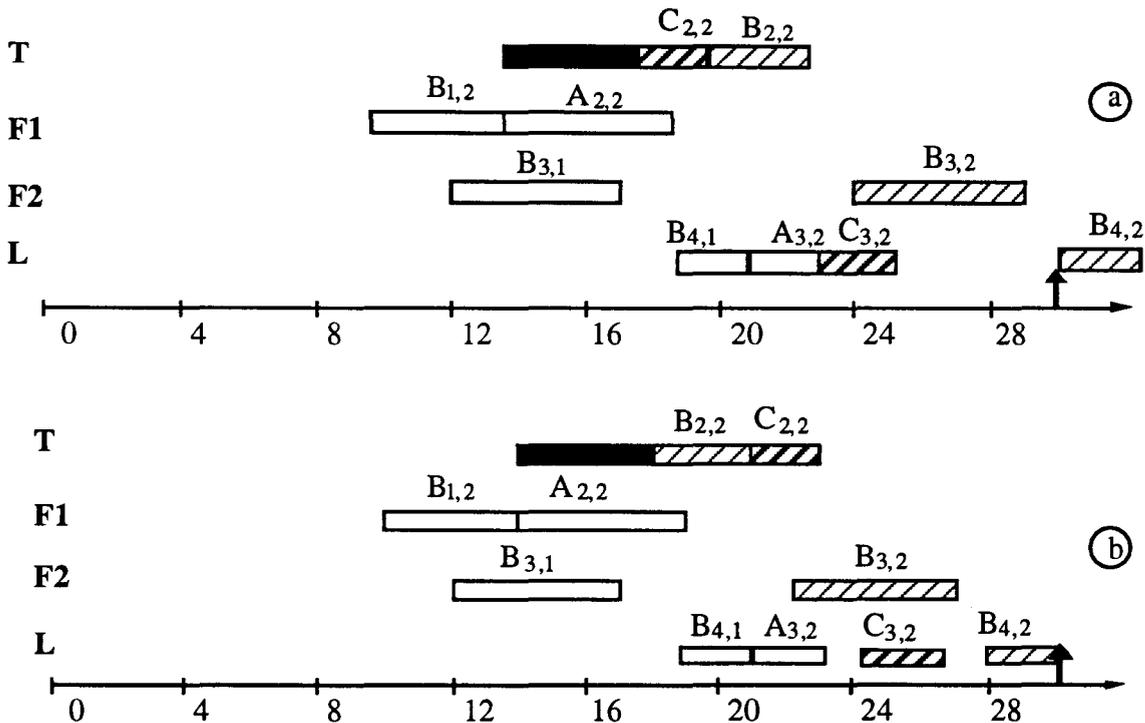


Figure III.15 : Exemple 1

Cet exemple traite du cas de la perturbation de 3 ut sur T après exécution de  $B_{2,1}$ . Nous supposons que toutes les opérations se sont bien réalisées jusqu'à  $t=13$ . Nous représentons uniquement sur les figures les situations après perturbation

La figure III.15.a représente le système de production où les opérations sur le tour sont décalées, si aucune réaction n'est entreprise. On constate que le produit  $B_2$  est en retard; puisque l'opération  $B_{4,2}$  ne commence qu'après sa date due. Ce décalage sans réaction crée automatiquement des temps morts sur d'autres machines, et réduit par conséquent leur taux d'utilisation.

la permutation locale entre les opérations  $C_{2,2}$  et  $B_{2,2}$  dans le groupe d'opérations du tour, permet d'absorber cette perturbation (fig. II.5.b). En effet, toutes les dates dues sont respectées. Pour un observateur extérieur au système de production, qui n'a pas la connaissance du comportement des ressources, tout se passe normalement. En effet, les produits sont disponibles en sortie à la date prévue.

### 3.3.2.2. Exemple 2

Cet exemple traite le cas de l'arrêt d'une ressource polyvalente F1

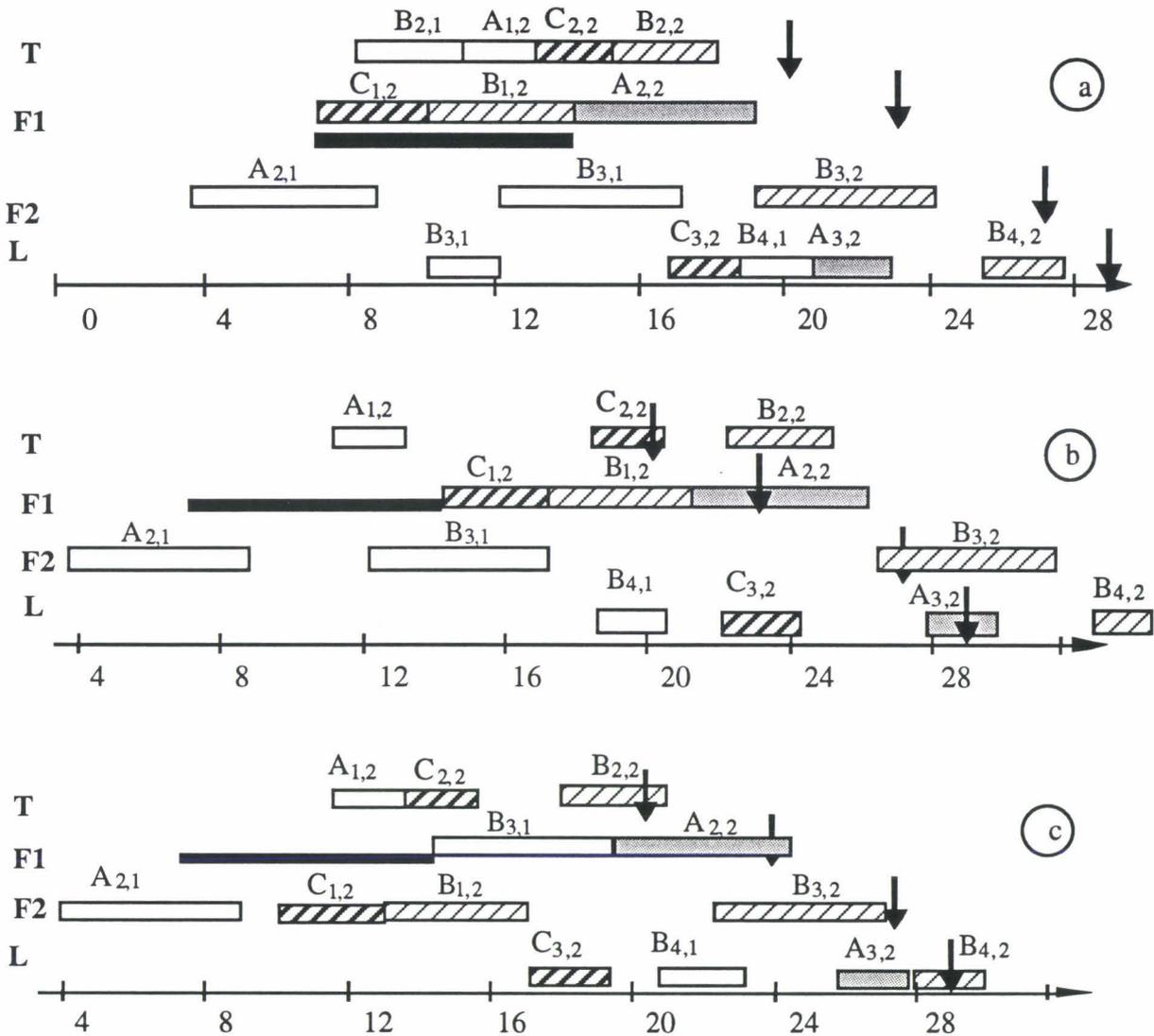


Figure III.16 : Exemple 2

La figure III.16.a représente la durée d'arrêt de F1 de 7 ut et l'ordonnancement initial. La figure III.16.b schématise la moins bonne des solutions consistant à décaler (ne rien faire) les opérations après la mise en route et à la propagation du décalage aux autres opérations ou produits. Ce décalage a pour conséquence le retard du produit B<sub>2</sub> et un dépassement de l'intervalle d'utilisation de la machine F2, bien que ce retard soit absorbé en définitive par la marge restante sur A<sub>3,2</sub>. (en réalité, le produit A<sub>2</sub> est aussi en retard, mais ceci n'apparaît pas sur la figure III.16.b car nous avons uniquement représenté les dates de libération des machines).

La nécessité d'absorber les perturbations nous conduit à essayer différentes possibilités : nous utilisons donc la flexibilité des opérations, la polyvalence des ressources (en particulier F2) pour procéder à la réaffectation des produits. La séquence sur T est conservée mais la date d'exécution de B<sub>2,2</sub> se trouve un peu modifiée : décalée vers la droite. Nous avons

aussi un échange d'opérations entre F1 et F2: B<sub>1,2</sub> et C<sub>1,2</sub> sont transférés sur la fraiseuse F2 et B<sub>3,1</sub> sur la fraiseuse F1. Sous l'hypothèse que les conditions de transfert (temps de transport) sont respectés, les produits sont exécutés sans qu'aucun retard ne soit constaté. Le taux d'utilisation de F2 est légèrement accru suite au transfert d'opération réalisé.

3.3.2.3. Exemple 3

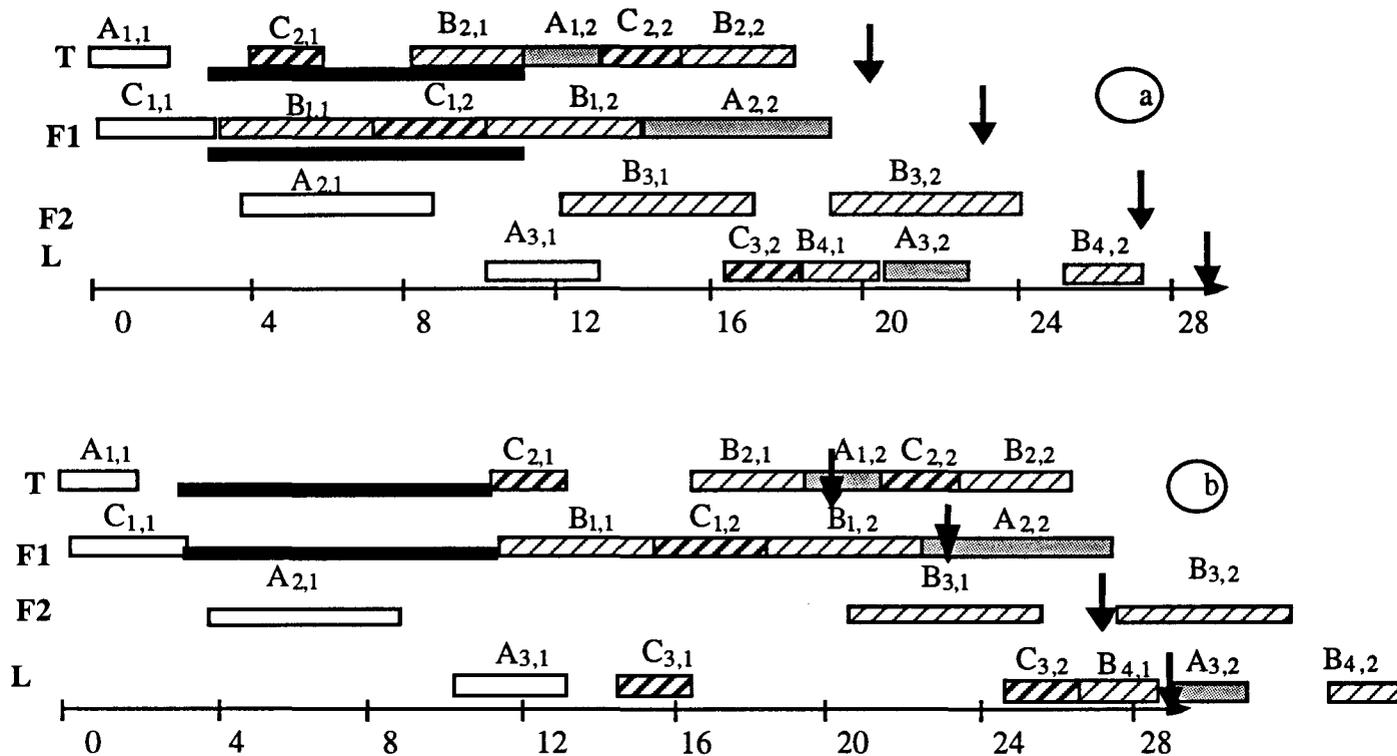


Figure III.17 : Exemple 3.a

Nous avons représenté sur cet exemple un arrêt simultané de 2 machines F1 et T (figure III.17.a). La deuxième figure III.17.b, montre le décalage des opérations après réparation des machines fautives si aucune réaction n'est envisagée. On constate que les dates de disponibilité des ressources sont dépassées par répercussion des effets du décalage d'opération sur les autres machines. De plus, le nombre de produits en retard est important par rapport à l'ensemble de produits du groupe.

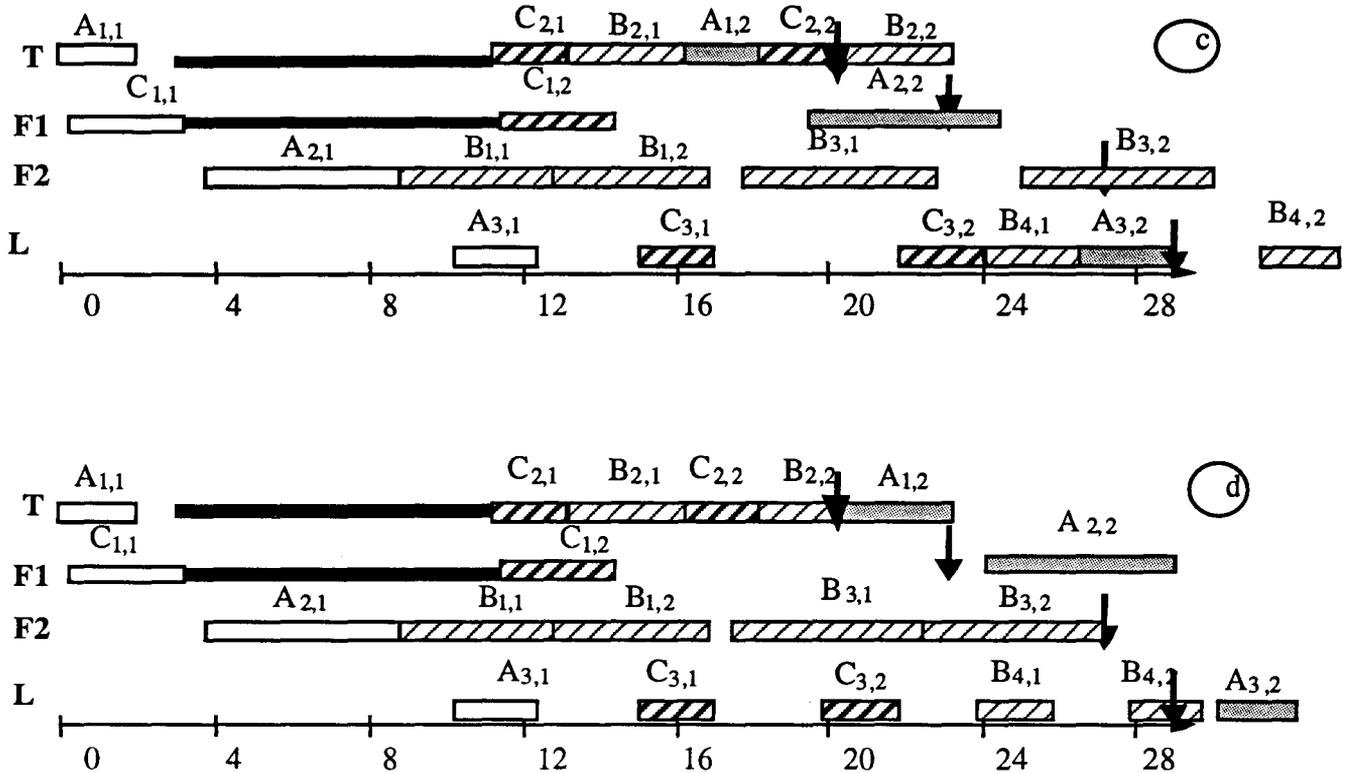


Figure III.18 : Exemple 3.b

Sur la figure III.18.c, on retrouve la situation obtenue après réaction locale. Cette réaction, a consisté à la création d'un espace d'accueil sur F2, puis au transfert d'opérations B<sub>1,1</sub> et B<sub>1,2</sub> de F1 à F2. Le transfert de B<sub>1,1</sub> de F1 à F2 permet donc un décalage vers la gauche et donc un usinage beaucoup plus tôt de B<sub>2,1</sub> et celui des produits suivant dans la file de T. Par rapport au Tour, une seule opération est en retard, alors que nous en avons trois dans le cas précédent. Concernant les autres machines de ce cas de figure, les réactions engagées ici, trois opérations au total sont retardées par rapport à leur dates de fin au plus tard, et ce retard ne concerne que 2 produits.

La figure III.18.d présente l'affectation issue du réordonnement, réalisé dans le cadre des actions correctives. Ayant classé auparavant les produits par date due croissante (on peut imaginer d'autres critères de choix ou de classement), nous appliquons l'algorithme de réordonnement présenté dans le paragraphe précédent avec les fonctions d'évaluation développées. La réorganisation complète est ainsi obtenue par placement de tâches, où les opérations sont placées sur les machines où elles seront usinées le plus rapidement possible. (les temps de transfert étant aussi pris en compte) et estimés au minimum. Par cette méthode, le nombre de produits en retard est moins important que dans les cas précédents. Elle a permis de limiter les effets d'une perturbation.

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une approche dynamique de contrôle du déroulement des opérations dans les systèmes de production flexibles. Ce contrôle s'est fait à la fois sur les opérations de transfert et les opérations de transformation d'état. Afin de réduire la complexité du contrôle, nous avons travaillé sur les intervalles de lancement.

Concernant la gestion des opérations de transfert, nous avons utilisé des fonctions de priorité pour résoudre dynamiquement les conflits d'accès aux ressources de transfert. Ces fonctions de priorité prennent en compte l'état courant des produits à gérer. Pour réaliser le routage des produits entre lieux de transformation d'état, nous avons proposé un algorithme de recherche de chemin tenant compte de la charge dynamique du système de transfert, et qui permet de choisir le plus court chemin en temps de transfert. (recherchant les deux plus courts chemins respectant les contraintes temporelles).

Dans le cadre du routage des produits entre ressources de transformation d'état, nous avons proposé un algorithme de recherche de chemins qui prend en compte l'occupation dynamique du système de transport. En effet, en phase opérationnelle, le plus court chemin, compte tenu de l'occupation dynamique du système de transport, ne correspond pas toujours au plus court en temps de transfert. Il peut arriver que ce plus court chemin fortement sollicité, soit plus long à cause des temps d'attente plus importants. Pour tenir compte de cette occupation dynamique nous avons pris en compte le temps d'attente dans la recherche du chemin. L'algorithme nous permet de choisir parmi les deux chemins possibles respectant l'intervalle de temps admissible, celui ayant le moins de sommets.

Le contrôle des opérations de transformation d'état s'est fait par l'évaluation de l'admissibilité en mesurant la déviation de l'écart entre l'état courant et l'ordonnancement prévisionnel par rapport aux dates de début et de fin d'opérations planifiées. Cette mesure d'admissibilité est évaluée grâce aux deux indicateurs que sont la marge d'une séquence d'opérations, et la marge d'absorption de la séquence. Lorsque l'effet d'une perturbation sur le système a entraîné des déviations nous avons proposé de les limiter grâce à l'utilisation des techniques de corrections, exploitant quand cela était possible la flexibilité des gammes, la polyvalence des ressources et les degrés de liberté temporels disponibles.

Ces différentes possibilités de réaction, réalisées grâce à la flexibilité inhérente aux systèmes étudiés dans la méthode CASPAIM, traduisent le fait que la flexibilité décisionnelle est nécessaire à la bonne conduite du système de production.

## **CONCLUSION GENERALE**



Nous avons présenté dans ce mémoire une approche de contrôle en temps réel des opérations dans un système automatisé de production flexible. Cette approche est particulièrement adaptée à l'environnement dynamique des ateliers flexibles.

Notre objectif principal a consisté à assurer le maintien du niveau de production, par adaptation de l'état courant aux prévisions de production, établies par l'ordonnancement. Cela nous a permis de conserver au mieux le système de production dans l'état normal et par conséquent limiter son évolution vers l'état dégradé. Les délais de production étant considérés comme contraignant, le contrôle est basé sur le suivi des différentes opérations à réaliser sur chaque produit.

Pour tenir compte de l'environnement perturbé, des indéterminismes de comportement des ressources, et surtout de la nécessité de réagir le plus rapidement possible vis à vis des défaillances limitées dans le temps, nous avons proposé une approche de contrôle du déroulement des opérations afin de limiter la propagation des perturbations sur l'ensemble du système de production.

Tout au long de ce mémoire il est apparu que la flexibilité décisionnelle est un complément indispensable de la flexibilité initiale du système si on veut optimiser son fonctionnement. Les difficultés inhérentes à la réalisation de cette flexibilité décisionnelle sont liées au temps de réponse du système de décision et à la qualité de la solution. Afin de réduire la complexité du contrôle, nous avons travaillé sur les intervalles de lancement et déterminé les procédures de recouvrement de perturbations, permettant de respecter le mieux possible les consignes de production. Les aspects du pilotage que nous avons développés concernent : l'organisation du pilotage en centres de décision, le contrôle des opérations de transfert et le contrôle des opérations de transformation d'état.

L'organisation des allocateurs de ressources a été réalisée suivant une approche mixte dans laquelle la hiérarchisation permet de coordonner plusieurs centres de décision et la distribution confère une autonomie décisionnelle aux centres de décision. Cette organisation permet de gérer la complexité de la production car elle permet de prendre des décisions d'exécution d'opérations, qui font intervenir le moins de produits possibles.

Afin d'assurer la disponibilité des produits devant les machines en respectant les contraintes temporelles sur les dates d'exécution de ces opérations, nous avons utilisé d'une part, des fonctions de priorité pour résoudre les conflits d'accès aux ressources de transfert. D'autre part, dans le cadre du routage des produits entre lieux de transformation d'état, nous avons

proposé un algorithme de recherche de chemin tenant compte de la charge dynamique du système de transfert, et minimisant le temps de transit.

Lorsque l'effet d'une perturbation sur le système entraîne des déviations par rapport à la production planifiée, nous avons proposé de les limiter en ayant recours à diverses techniques de correction. Celles-ci exploitent quand cela est possible la flexibilité des gammes, la polyvalence des ressources et les degrés de liberté temporels disponibles. Le contrôle des opérations de transformation d'état permet de limiter le nombre de produits susceptibles d'être affectés par la propagation d'une perturbation.

Ces différentes possibilités de réaction, induites par la flexibilité des systèmes étudiés dans la méthode CASPAIM, traduisent le fait que la flexibilité décisionnelle est nécessaire à la bonne conduite du système de production. La flexibilité permet donc de réagir à d'éventuelles défaillances des ressources de production, par une adaptation ou une reconfiguration du système dans le but d'accroître la disponibilité de l'atelier. Les exemples d'illustration utilisés montrent bien l'intérêt du pilotage lorsque le contexte de production est perturbé.

Les premiers résultats présentés dans ce mémoire et le contexte du projet CASPAIM offrent de nombreuses perspectives :

A court terme, nous envisageons d'aborder :

- les aspects structuration des données liées à l'organisation des centres de décision. En général, l'agrégation des données s'accompagne d'une dégradation d'informations sur la connaissance du système [Aldanondo et al 94],
- les aspects homme-machine, [Wang 91], [Bonneval et al 92], qui permettent de mieux intégrer les compétences d'un superviseur humain dans l'architecture de décision.

A moyen terme, nous proposons d'explorer :

Le contrôle des systèmes de production où l'ordonnancement se présente sous la forme de séquences d'entrées de produits. Nous proposons d'utiliser les techniques de quantification de flexibilité [Brill et al 89], [Gupta et al 89], [Kochikar et al 92], pour réaliser en temps réel l'affectation des ressources aux produits. Dans ce processus d'affectation, la flexibilité des gammes, des machines et du système de transport peuvent être considérés simultanément [Tawegoum 93].

# **BIBLIOGRAPHIE**



- [Aguillera et al 93] L.M Aguillera, B. Peng, H. Song et Z. Binder  
"Design and implementation of a scheduling software"  
IEEE, International Conference on System, Man and Cybernetics, Le Touquet, France, vol. 4, pp 276-282, October 17-20, 1993.
- [Akella et al 90] R. Akella, O. Maimon et S.B. Gershwin  
"Value function approximation via linear programming for FMS scheduling"  
International Journal of Production Research, Vol 28, N° 8, pp 1459-1470, 1990.
- [Aldanondo et al 94] M. Aldanondo et D. Breuil  
"A GRAI extended approach with information aggregation mechanisms"  
Proceedings of the 2nd IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS'94, Vienna, Austria, pp. 411-416, June 13-15, 1994.
- [Allen 1983] J.F Allen  
"Maintening knowledge about temporal intervals"  
Communication of the ACM, Vol 26, N° 11, nov 1983.
- [Amar et al 90] S. Amar, E. Craye et J.C. Gentina  
"Modélisation des moyens de production par langage orientés objets en vue de la conception de la commande d'un système de production flexible."  
Congrès CIM 90, Proc. pp 323-331, Bordeaux 12-14 Juin, 1990.
- [Amar et al 92] S. Amar, E. Craye et J.C. Gentina  
"A method of hierachical specification and prototyping of FMS."  
Congrès IEEE / ETFA '92, Melbourne 11-14 Août 1992, Australie, p 44-49, 1992.
- [Amar 94] S. Amar  
"Méthode de conception du système de coordination par prototypage orienté objet de la partie procédé".  
Thèse de doctorat, Université de Lille1, FRANCE, Avril 1994.
- [Archimede 91] B. Archimède  
"Conduite temps réel d'ateliers"  
Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 1991.

- [Ausfelder et al 92] C. Ausfelder, E. Castelain et J.C. Gentina  
"An object oriented simulation tool to validate a dynamic behaviour of Flexible manufacturing System".  
Congrès ESM'92, Proc. pp 528-532, York (UK), 1992.
- [Ausfelder 94] C. Ausfelder  
"Contribution à la conception d'un système de conduite pour les systèmes flexibles de production manufacturière".  
Thèse de doctorat, Université de Lille1, FRANCE, Mars 1994.
- [Bajic et al 91] E. Bajic, T. Divoux et J. Richard  
"Définition d'une cellule autocontrôlée de fabrication mécanique"  
Revue d'Automatique et de Productique Appliquée, vol. 4, n°4, p 403-434, 1991.
- [Baker 84] K.R. Baker  
"Sequencing rules and due-date assignments in job shop"  
Management science, vol.30, n°9, pp 1093-1104, sept 1984.
- [Baptiste et al 90] P. Baptiste, C. Cho, J. Favrel et N. Zouhri  
"Une caractérisation analytique des ordonnancements admissibles sous contraintes hétérogènes en flow-shop"  
CNRS, G.R Automatique, pôle SED, Groupe de travail 3,GT3, 21 mars 1990.
- [Baptiste et al 93] P. Baptiste et H. Manier  
"Pilotage par comportement : ordonnancement réactif"  
CNRS, G.R Automatique, pôle SED, Groupe de travail 3 : Ordonnancement, 1993.
- [Barbier et al 92] F. Barbier et P. Jaulent  
"Techniques orientés objets et CIM"  
Editions Eyrolles, 1992.
- [Bel et al 88] G. Bel, E. Bensana et D. Dubois  
"Construction d'ordonnancement prévisionnel : un compromis entre approches classiques et systèmes experts"  
RAIRO, APII, vol 22 pp 509-534, 1988.

- [Benassy et al 86] J. Benassy, G. Benchimol, G. Bloch, A. Ferre, C. Philip, G. Rostan, L. Sauvage et P. Vayssiere.  
"L'usine intégrée par l'ordinateur"  
Edition Hermes, Paris, 1986.
- [Benchimol 85] G. Benchimol  
"La conception des usines de demain"  
Edition Hermes, Paris, 1985.
- [Berard 92] C. Berard  
"La place de l'ordonnancement dans le pilotage d'atelier"  
CNRS, G.R Automatique, pôle SED, Groupe de travail 3, ordonnancement,  
Avril 1992.
- [Berthul 85] C. Berthul  
"Pilotage d'ateliers flexibles en présence de perturbations",  
Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Paris dauphine, 1985.
- [Billaut 93] J.C. Billaut  
"Prise en compte des ressources multiples et des temps de préparation dans les  
problèmes d'ordonnancement en temps réel"  
Thèse de Doctorat, Université paul Sabatier, Toulouse, Dec. 1993.
- [Bonneval et al 92] A. de Bonneval, M. Courvoisier et M. Combacau  
"Rôle de l'opérateur humain dans une boucle de surveillance automatique de  
systèmes à événements discrets"  
Conférence canadienne sur l'automatisation industrielle, Montréal, p 6.17-6.20,  
1-3 Juin 1992 .
- [Boffey 93] B. Boffey  
"The all-to-all alternative route problem"  
Operations Research, vol. 27, n°4, p. 375-387, 1993.
- [Bois 91] S. Bois  
"Intégration de la gestion des modes de marche dans le pilotage d'un système  
automatisé"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, Novembre 1991.

- [Bonetto 87] R. Bonetto  
"Les ateliers flexibles de production"  
Hermes, 1987.
- [Bourey 88] J.P. Bourey  
"Structuration de la partie procédurale du système de commande des cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Mars 1988.
- [Bouteille et al 89] D. Bouteille, N. Bouteille, S. Chentreuil, R. Collot, J.P. Frachet, H. Le Gras, C. Merland, J. Selosse et A. Sfar  
"Les automatismes "  
Cepadues-Editions Septembre 1987.
- [Bowen et al 89] J. Bowen, P. O'Grady, H. Nuttle et M. Terrible  
"An artificial intelligent approach to loading workstation resources in a distributed job shop controller"  
Computer-Integrated Manufacturing Systems, vol 2, N°1, pp 21-28, february 1989.
- [Brill et al 89] P.H. Brill et M. Mandelbaum  
"On measures of flexibility in manufacturing systems"  
International Journal of Production Research, vol. 27, n°5, pp 747-756, 1989.
- [Browne 84] J. Browne  
"Classification of F.M.S"  
F.M.S Magazine, April 1984
- [Browne et al 84] J. Browne, O.S. Yilmaz et R.P. Davis  
"Flexible manufacturing Systems - characteristics and assesment"  
Engineering management International, Vol 4, pp 209-212, 1987.
- [Brucker et al 92] P. Bruker, B. Jurisch et M. Jurisch  
"Open shop problems with time unit operations"  
Third International Workshop on Project Management and Scheduling, Como, Italy, July 6-8, 1992.

- [Camus et al 94] H. Camus, H. Ohl, E. Castelain et J.C. Gentina  
"A heuristic algorithm for the computational of cycle schedules and the necessary W.I.P to obtain optimal cycle time"  
Rensselaer's Fourth International Conference on CIM and automation Technology, vol. 1 pp. 339-344, Tron, NY, USA, Oct 1994.
- [Carlier 75a] J. Carlier  
"Disjonctions dans les ordonnancements"  
RAIRO 9e année, vol. 2, pp 83-100, juin 1975.
- [Carlier 78] J. Carlier  
"Ordonnements à contraintes disjonctives"  
RAIRO, Recherche opérationnelle, vol 12, n°4, p 333-351, nov 1978.
- [Carlier et al 87] J. Carlier et E. Pinson  
"An algorithm for solving the job-shop problem"  
Management Science, pp. , february 1987
- [Carlier et al 88] J. Carlier et P. Chrétienne  
"Problèmes d'ordonnements : modélisation, complexité et algorithme"  
Masson (Collection Etude et Recherches en Informatique), Paris 1988.
- [Carlier et al 92] J. Carlier et E. Pinson  
"Adjustment of heads and tails for job-shop problems"  
Third International Workshop on Project Management and Scheduling, Como, Italy, July 6-8, 1992.
- [Carlier et al 90] J. Carlier et P. Villon  
"A new heuristic for the traveling salesman problem"  
Operations Research, vol. 24, n°3, p. 245-253, 1990.
- [Castelain 87] E. Castelain  
"Modélisation et simulation interactive des cellules de production dans l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Février 1987.

- [Choulet et al 93] C. Choulet et P. Baptiste  
"MUCO : A cognitive system for problem solving based on self organisation, a  
"Multi Agent" implementation with blackboard"  
Proceedings of the IEEE international conference on Systems, Man and  
Cybernetics, le Touquet, France, vol. 4 pp 131-136, Oct 17-20, 1993.
- [Chunsheng et al 91] F. Chunsheng, L. Meng, L. Jianzhang, W. Shuqing et W. Jichen  
"A proposal structure for hierarchical control system"  
Information and Decision Technologies, n° 17, pp 71-76, 1991.
- [Chrétienne 84a] P. Chrétienne  
"Exécution contrôlée des réseaux de Petri temporisés"  
Technique et Sciences Informatiques (TSI) vol. 1, pp 23-31, 1984.
- [Chrétienne 84b] P. Chrétienne  
"Chemins extrémaux d'un graphe doublement valué"  
RAIRO, Recherche Opérationnelle, vol. 18, n°3, p. 221-245, Août 1984.
- [Chu 90] C. Chu  
"Nouvelles approches analytiques et concept de la mémoire artificielle pour  
divers problèmes d'ordonnancements"  
Thèse de Doctorat, Université de Metz, 1990.
- [CIM 88] CIM-OSA  
"CIM-OSA Reference Architecture Spécification"  
Projet Esprit n°688, Consortium AMICE, nov 1988.
- [CNRS 88] Groupe de réflexion temps réel du CNRS  
"Le temps réel",  
Technique et Sciences Informatiques (TSI), Afcet Bordas Vol 7, N°5, p 493-  
500, 1988.
- [Cohen 89] G. Cohen  
"Qu'est-ce qu'un système à événements discrets? Le point de vue du  
conférencier"  
CNRS, G.R Automatique, Groupe de travail modèle et évaluation des  
performances, Paris, 7 decembre 1989.

- [Cohendet et al 89] P. Cohendet et P. Lecrena  
"Flexibilité, information et décision"  
Edition Economica, Paris, 1989.
- [Craye 89] E. Craye  
"De la modélisation à l'implantation automatisées de la commande hiérarchisée de cellule de production flexibles dans l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Janvier 1989.
- [Cruette 91] D. Cruette  
"Méthodologie de conception des systèmes complexes à événements discrets : application à la conception et à la validation hiérarchisée de la commande de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, Février 1991.
- [Dejax et al 90] P. Dejax et W. Han  
"Une heuristique pour le problème d'ordonnancement de type  $n/m/F/C_{max}$  avec présence de machines goulots"  
Recherche Opérationnelle, vol 24, n°4, p 315-330, 1990.
- [Dessouky et al 72] M.I. Dessouky et C.R. Margenthaler  
"The one machine sequencing problem with early starts and due dates"  
AIIE transaction 4, pp. 212-222, 1972.
- [Dindeleux 92] E. Dindeleux  
"Conception et mise en oeuvre d'un système interactif d'aide à la conduite d'atelier"  
Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, 1992.
- [Doumeingts et al 83] G. Doumeingts, D. Breuil et L. Pun  
"La gestion de production assistée par ordinateur - GPAO"  
Hermes, Paris, 1983.
- [Egbelu 90] P.J. Egbelu  
"Route selection and flow control in a multi-stage manufacturing system with heterogenous machines within stages"  
International Journal of Production Research, vol. 28, n°11, pp 2137-2155, 1990.

- [Elkhatabi 93] S. Elkhatabi  
"Intégration de la surveillance de bas niveau dans la conception des systèmes à événements discrets : application aux systèmes de production flexibles"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, Septembre 1993.
- [Erschler et al 88] J. Erschler , G. Fontan et C. Merce  
"Agrégation et désagrégation en planification hiérarchisée"  
Congrès Afcet Automatique, , Grenoble, pp 57-7510-12 Octobre 1988.
- [Esteban 92] P. Esteban  
"Commande hiérarchisée multiniveaux. Application à la commande d'une cellule flexible d'assemblage"  
Congrès sur l'Automatisation Intégrée, Montréal (Canada), Juin 1992.
- [Farah et al 93] A. Farah, E. Craye, J.P. Bourey et J.C Gentina  
"Une méthode hiérarchique orientée objet pour la conception du logiciel de contrôle/commande d'un Système Flexible de Production Manufacturière".  
Colloque Ecoles Centrales, Paris, Juin 1994.
- [Farah et al 95] A. Farah, E. Craye et J.P. Bourey  
"Une méthode hiérarchique orientée objet pour l'implantation répartie du système de contrôle/commande d'un Système Flexible de Production"  
accepté à 2nde conférence sur l'Automatisation Industrielle, Nancy, France 7-9 juin 1995.
- [Farreny et al 87] H. Farreny et M. Ghallab  
"Eléments d'Intelligence Artificielle"  
Editions Hermes, Paris, 1987.
- [Frein et al 88] Y. Frein, Y. Dallery, J-J. Pierrat et R. David  
"Optimisation du routage des pièces dans un atelier flexible par les méthodes analytiques"  
RAIRO, APII, n°22, p 489-508, 1988.
- [Gondran et al 79] M. Gondran et M. Minoux  
"Graphes et algorithmes"  
Editions Eyrolles, 1979.

- [Gong et al 93] D. Gong et R. Hugsted  
"Time-uncertainty analysis in project network with a new merge-even time-estimation technique"  
International Journal of Project Management, vol. 11, n°3, pp 165-174, August 1993.
- [GOThA 93] GOThA  
"Les problèmes d'ordonnancement"  
RAIRO-RO/Operations Research, vol. 27, n°1, pp. 77-150, 1993.
- [Grünenberger 94] E. Grünenberger  
"PC CoDe : une méthodologie opérationnelle pour concevoir le système de conduite des cellules de production"  
Thèse de Doctorat, Université de Tours (E3I : Ecole d'Ingénieurs en Informatique pour l'industrie), Decembre 1994.
- [Guinet et al 94] A. Guinet, R. Foulon et A. Dussauchoy  
"Scheduling jobs on hybrid flow shop to minimize maximum tardiness"  
Proceedings of the 2nd IFAC/IFIP/IFORS/ Workshop on Intelligent and Manufacturing Systems (IMS'94), vienna, Austria, pp 267-271, June 13-15, 1994.
- [Gupta et al 89] Y.P. Gupta et S. Goyal  
"Flexibility of manufacturing systems : concepts and measurements"  
European Journal of Operational Research, 43, 119-135, 1989.
- [Hammadi 91] S. Hammadi  
"Une méthode d'ordonnancement minimisant les temps d'attente et de transit dans les systèmes de production flexibles de type job-shop"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, Decembre 1991.
- [Haouari et al 90] M. Haouari, P. Dejax et M. Desrochers  
"Les problèmes de tournées avec contraintes de fenêtres de temps, l'état de l'art"  
RAIRO, Recherche Opérationnelle vol 24, n°3, p 217-224, 1990.

- [Happiette et al 90] M. Happiette et M. Staroswieki  
"Temporal decomposition for production scheduling"  
Proceedings of the ISATA, 22nd International Symposium on Automotive  
Technologie and Automation  
Florence, Italy, vol 2, pp1251-1256, May 14-18 1990.
- [Harhalakis et al 92] G. Harhalakis, C.P. Nagi et J.M. Proth  
"Hierarchical decision in Computer Integrated Manufacturing Systems"  
proceedings of the IEEE, Third international Conference on Computer  
Integrated Manufacturing, Troy, New York, pp.15- 24, May 20-22 1992.
- [Hershauer et al 75] J.C. Hershauer et R.J. Ebert  
"Search and simulation selection of a job shop sequencing rules"  
Management Science, vol. 21, n°7, pp 833-841, March 1973.
- [Hillion et al 88] H.P. Hillion et J.M. Proth  
"Système de gestion de production hiérarchisée : conception et utilisation"  
Congrès Afcet-Automatique, p 49-56, Grenoble 10-12 Octobre 1988.
- [Holloway et al 73] C.A. Holloway et R.T. Nelson  
"Alternative formulation of the job shop problem with due dates"  
Management science, vol 20, n°1, September 1973.
- [Huvenoit et al 93] B. Huvenoit, E. Craye et J.P. Bourey  
"Implantation oriented methodology in design control of FMS",  
Proc. Comp Euro, pp 125-131, Paris, FRANCE, 1993.
- [Huvenoit 94] B. Huvenoit  
"De la conception à l'implantation de la commande modulaire et hiérarchisée  
des systèmes flexibles de production manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, Octobre 1994.
- [Ingersoll 88] Ingersoll Engineers  
"L'usine intégrée"  
Editions Hermes, Paris, 1988.

- [Kallel et al 85] G. Kallel, X. Pellet et Z. Binder  
"Conduite décentralisée coordonnée d'ateliers".  
RAIRO, APII, Vol 19, N°4, pp 371-387, 1985.
- [Kapusta 88] M. Kapusta  
"Génération assistée d'un graphe fonctionnel destiné à l'élaboration structurée  
du modèle de la partie commande pour les cellules de production flexibles  
dans l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Decembre 1988.
- [Kermad et al 93] L. Kermad, C. Ausfelder, J.P. Bourey et E. Castelain  
"Integrative approach for a functional spécification of FMS control"  
Revue CIM, vol. 6 n°4, pp 219-227, 1993.
- [Kermad et al 94] L. Kermad, E. Craye, J.P. Bourey et J.C. Gentina  
"The working and exploiting modes in FMS"  
Proceedings of the IEEE international conference on Systems, Man and  
Cybernetics, San antonio, Texas, vol. 3 pp 1521-1526, Oct 2-5 1994.
- [Kimenia et al 85] J. Kimenia et S. Gershwin  
"Flow optimization in FMS"  
International Journal of Production Research, Vol 23, N° 1, pp 81-96, 1985.
- [Kinechi 83] S. Kinechi  
"Kanban"  
Ed Hommes et Techniques, 1983.
- [Kise et al 92] H. Kise, Y. Karuno et H. Matsumoto  
"Simultaneous optimization of tools allocation and scheduling for FMS's : An  
application of simulated annealing"  
Proceedings of the IMACS/SICE International Symposium on Robotics,  
Mechatronics and Manufacturing Systems 92, Kobe, Japan, pp 863-868, Sep  
16-20 1992.
- [Klein 91] C.M. Klein  
"A model for transportation of hazardous waste"  
Decision Sciences, vol. 22, n°5, pp1091-1108, December 1991.

- [Kochikar et al 92] V.P. Kochikar and T.T. Narendran  
"A framework for assessing the flexibility of manufacturing systems"  
International Journal of Production Research, vol. 30, n° 12, pp 2873-2895,  
1992.
- [Kusiak et al 92] A. Kusiak et J. Ahn  
"Intelligent scheduling of automated machining systems"  
Computer-Integrated Manufacturing Systems, vol 5, n°1, pp 3-14, february  
1992.
- [Lawrence 91] S.R. Lawrence  
"Scheduling a single machine to maximize net present value"  
International Journal of production Research, Vol 29, N° 6, pp 1141-1160,  
1991.
- [Lecomte 93] C. Lecomte  
"Un système à base de règles d'aide à l'ordonnancement d'un atelier  
travaillant à la commande"  
Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris, Juillet 1993.
- [Legall 89] A. Legall  
"Un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement et le  
pilotage en temps réel d'atelier",  
Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1989.
- [Lemoigne 90] J.L. Lemoigne  
"La modélisation des systèmes complexes"  
Afcet-systèmes, Dunod, 1990.
- [Lesage et al 84] J.J. Lesage et B. Froment  
"PRODUCTIQUE : les techniques d'usinages flexibles"  
Dunod, Série Génie Mécanique, 1984.
- [Lévis 87] A.H. Lévis  
"A challenge to control : A collective view"  
IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 32, n°4, April 1987.
- [Lévy 85] D. Lévy  
"GPAO : Choix d'un système et mise en oeuvre"  
Edition Eyrolles, (informatique et entreprise), Paris, 1985.

- [Lin et al 91] G.Y. Lin et J.J. Solberg  
"Effectiveness of flexible routing control"  
The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 3, pp 189-211,  
1991.
- [Lino et al 92] R. Lino, R. Marti et V. Valls  
"Using Tabu search technique to solve the resource constraints project  
scheduling problem"  
Third International Workshop on Project Management and Scheduling, Como,  
Italy, July 6-8 1992.
- [Maïk et al 94] J-P. Maïk, D. Corbeel et J-C. Gentina  
"Objets dynamiques et évolutifs pour le système d'information des systèmes  
de production manufacturière"  
Colloque AGI'94 (Automatique, Génie informatique, Image), pp 157-160,  
Poitiers 2-3 juin 1994.
- [Manier 95] H. Manier  
"Contribution au pilotage d'ateliers flexibles réactifs"  
Thèse de Doctorat, Université de Besançon, Janvier 1995.
- [Marti et al 92] R. Marti et V. Valls  
"How to draw a project network using Tabu search techniques"  
Third International Workshop on Project Management and Scheduling, Como,  
Italy, July 6-8, 1992.
- [Minoux 77] M. Minoux  
"Structures algébriques généralisées des problèmes de cheminement dans les  
graphes : Théorèmes, algorithmes et applications"  
RAIRO, Recherche Opérationnelle, vol. 10, n°6, p 33-62, 1977.
- [Mollet 89] H. Mollet  
"La nouvelle gestion de production"  
Collection Technologie de pointes, Hermes, Edition Scientifique et Technique  
1989.
- [Morel et al 88] G. Morel, M. Roesch et M. Veron  
"Génie productique, Génie -X"  
Congrès Afcet Automatique, grenoble, p 319-330, 10-12 Octobre 1988.

- [Na 1990] H.S. Na  
"Artificial intelligent in todays factory"  
Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, vol. 7, n°3/4, pp 315-320,  
1990.
- [Narayanan 92] V. Narayanan  
"Intelligent process routing"  
Proceedings of the IEEE, Third international Conference on Computer  
Integrated Manufacturing, Troy, New York, pp.270- 277, May 20-22 1992.
- [Nouma et al 92] H. Nouma, I. Hayashi et N. wakami  
"A learning method fusing fuzzy reasoning and genetic algorithm"  
Proceedings of the IMACS/SICE International Sympoium on Robotics,  
Mechatronics and Manufacturing Systems 92, Kobe, Japan, pp 155-160, Sep  
16-20 1992.
- [O'Grady et al 92] P. O'Grady et R. Seshadri  
"Operation of X-Cell : an intelligent celle control system"  
Computer-Integrated Manufacturing Systems, vol. 5, n°1 pp 21-30, february  
1992.
- [Ohl et al 93] H. Ohl, E. Castelain et J.C. Gentina  
"State dependant release control in FMS"  
Proceedings of the IEEE international conference on Systems, Man and  
Cybernetics, le Touquet, France, vol. 1 pp 295-300, Oct 17-20, 1993.
- [Ohl et al 94] H. Ohl, E. Castelain et J.C. Gentina  
"Synchrony theory applied to control problem in FMS"  
Proceedings of the IEEE international conference on Systems, Man and  
Cybernetics, San antonio, Texas, vol. 3 pp 1521-1526, Oct 2-5 1994.
- [Panwalker et al 77] S.S. Panwalker et W. Iskander  
"A survey of scheduling rules"  
Operations Research, vol. 25, n°1, pp. 45-61, Jan.-Feb. 1977.

- [Perez 90] J.P. Perez  
"Systèmes temps réel : méthodes de spécification et de conception"  
Dunod, informatique industrielle, Bordas, Paris 1990.
- [Portmann 88] M.C. Portmann  
"Méthode de décomposition spatiale et temporelle en ordonnancement de la production"  
RAIRO, APII, vol 28, pp 439-451, 1988.
- [Potvin et al 93] J.Y. Potvin et J.M. Rousseau  
"A parallel route building algorithm for vehicle routing and scheduling problem with time window"  
European Journal of Operational Research, n°66, pp 331-340, 1993.
- [Proth et al 88] J.M. Proth et H.P. Hillion  
"Analyse des fabrications non linéaires et répétitives à l'aide des graphes d'événements temporisés"  
RAIRO vol. 2, n°2, pp 137-176, 1988.
- [Proth et al 91] J.M. Proth et G. Feigin  
"Performance analysis of a flexible manufacturing cell feeding several machines with finite buffer capacity"  
RAIRO, APII, vol. 25, n°1, p 31-44, 1991.
- [Proust et al 91] C. Proust, J.N.D. Gupta et V. Deschamps  
"flowshop scheduling with setup, processing and removal times separated"  
Int. Jour. Prod. Res., vol. 29, n°3, pp. 479-493, 1991.
- [PTA89] BasePTa  
"Modèle conceptuel"  
Document CCGA à l'ISMCM de St Ouen 1989.
- [Rakotoson 93] M.P. Rakotoson  
"Synthèse des caractéristiques et techniques de développement de la commande des systèmes dis-continus : application aux systèmes de production flexibles batchs"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, Juillet 1993.

- [Ranky 90a] P.G. Ranky  
"Total quality control and JIT management in CIM"  
CIMware limited, Guildorf surrey, England, 1990.
- [Ranky 90b] P.G. Ranky  
"Manufacturing database management and knowledge expert systems"  
Chap 3. CIMware limited, Guildorf surrey, England 1990.
- [Raz et al 93] T. Raz et D. Bricker  
"sequencing of inspection operation subject to errors"  
European Journal of Operational Research, vol. 68, pp. 251-264, 1993.
- [Rodde 89] G. Rodde  
"Les systèmes de production : modélisation et performances"  
Editions Hermès, Paris, 1989.
- [Roubellat et al 88] F. Roubellat et V. Thomas  
"Une méthode et un logiciel pour l'ordonnancement en temps réel d'ateliers"  
APII, vol 22, p 419-438, 1988.
- [Roy 70] B. Roy  
"Algèbre moderne et théorie des graphes"  
Tome 2, Dunod, 1970.
- [Sakarowitch 84] M. Sakarowitch  
"Optimisation combinatoire (méthodes mathématiques et algorithmiques) :  
programmation discrète"  
Hermann, Editeur des sciences et des arts, Paris, ,1984.
- [Schrage et al 78] L. Schrage et K.R. Baker  
"Dynamic programming solution of sequencing problems with precedent  
constraints"  
Operation Research, vol. 26, n°3, pp 444-449, mai-juin 1978.
- [Sibertin-Blanc 85] C. Sibertin-Blanc  
"High level Petri-nets with data structure"  
6th European workshop and application of Petri-nets, Espoo, Finlande, 1985.

- [Slack 88a] N. Slack  
"Manufacturing systems flexibility : an assesment procedure"  
Computer-Integrated Manufacturing Systems, vol 1, N°1, pp 25-31, february 1988.
- [Slack 88b] N. Slack  
"The flexibility of Manufacturing Systems"  
IJOPM International Journal of Operation & Production Management, vol 7, N°4, pp 35-45, 1988.
- [Slomp et al 92] J. Slomp et J.N.D. Gupta  
"Interactive tool for scheduling jobs in a flexible manufacturing environment"  
Computer-Integrated Manufacturing Systems vol 5, n°4, pp 291-299, November 1992.
- [Solot 90] P. Solot  
"A concept for planning and scheduling in a FMS"  
European Journal of Operations Research, vol. 45, PP. 85-95, 1990.
- [Staroswieki et al 92] M. Staroswieki, M. Amamou et M. Happiette  
"The canonical digraph decomposition applied to the simplification of the single machine scheduling problem"  
Proceedings of the IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems 92, Kobe, Japan, pp 881-887, Sep 16-20 1992.
- [Stecke 85] K.E. Stecke  
" Design, planning, scheduling and control problems of FMS"  
Annals of operations Research 1985, Vol 3, pp 3-12.
- [Stecke et al 88] K.E. Stecke, I. Kim et M. Min  
"A knowledge-based approach to part type selection considering due dates in FMS"  
Proceedings of the IMACS conference pp 393-395, 1988.
- [Tacquard-Choulet 93] C. Tacquard-Choulet  
"Proposition d'un modèle cognitif axé sur l'auto-organisation des connaissances pour la résolution des problèmes"  
Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, Juillet 1993.

- [Tamaki et al 92] H. Tamaki et Y. Nishikawa  
"Maintenance of diversity in a genetic algorithm and application to the job shop scheduling"  
Proceedings of the IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems 92, Kobe, pp 869-874, Japan, Sep 16-20 1992.
- [Tawegoum et al 92] R. Tawegoum, E. Castelain et J.C. Gentina  
"Real time piloting of Flexible manufacturing Systems"  
Third International Workshop on Project Management and Scheduling, Como, Italy, July 6-8, 1992.  
Article repris pour publication dans:  
European Journal of Operational Research, vol. 78, n°2, pp 252-261, 1994.
- [Tawegoum 93] R. Tawegoum  
"Mesure de la flexibilité des systèmes de production"  
Seminaire, LAIL, Avril 1993.
- [Tawegoum et al 94a] R. Tawegoum, E. Castelain et J.C. Gentina  
"Dynamic operations control in flexible manufacturing systems"  
Proceedings of the 2nd IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS'94, Vienna, Austria, pp. 285- 290, June 13-15 1994,.
- [Tawegoum et al 94b] R. Tawegoum, E. Castelain et J.C. Gentina  
"Hierarchical and dynamic production control in flexible manufacturing systems"  
Proceedings of IEE,IMACS, EURISCON '94 (EUropean Robotics and Intelligent System CONFerence). August 20-24, 1994. Malaga, SPAIN. Vol. 2 , pp 576-584.
- [Tawegoum et al 95] R. Tawegoum, E. Castelain et J.C. Gentina  
"*Hierarchical and dynamic production control in flexible manufacturing systems*" extended versus  
A paraître dans Robotics & Computer Integrated Manufacturing journal Vol. 12, N°50, pp. ..., 1995.
- [Thiel 93] D. Thiel  
"Modèles génériques de comportement des systèmes de production"  
Revue Internationale de Systémique, vol. 7, n°2, p 117-142, 1993.

- [Toguyeni et al 90] A.K.A Toguyeni, E. Craye et J.C. Gentina  
"A method for temporal analysis to perform on-line diagnosis in the context of FMS"  
Proceedings of IECON' 90, Pacific Grove-California, vol. 1, pp 445-450, nov 1990.
- [Toguyeni 92] A.K.A Toguyeni  
"Surveillance et diagnostic en ligne dans les systèmes flexibles de l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, Novembre 1992.
- [Topkis 88] D. M. Topkis  
" A k shortest path algorithm for adaptative routing in communication network"  
IEEE transactions on communications, vol. 36, n°7, pp 855-859, July 1988.
- [Van Ryzin et al 91] G.J. Van Ryzin, S.X.C. Lou et S.B. Gershwin  
"Scheduling job shop with delays"  
International Journal of production Research Vol 29, N° 7, pp 1407-1422, 1991,.
- [Veeramani et al 93] D. Veeramani, B. Bhargava et M. Barash :  
"Information system achitecture control of large FMS".  
Computer-Integrated Manufacturing systems, vol 6, n°2, may 1993.
- [Wang et al 90] F. Y. Wang et G.N. Saridis  
"A coordination theory for intelligent machines"  
Automatica vol 26, n°5, pp833-844, 1990.
- [Wang 91] J. Wang  
"Conception d'un système de gestion d'interface d'utilisateurs dans l'environnement CIM"  
Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, 1991.
- [Winston 84] P.H. Winston  
"Artificial Intelligent"  
Addison-Wesley publishing compagny, Chap. 4, 1984.

- [Yamamoto 77] P. Yamamoto  
"An approximate solution of machine scheduling problems by decomposition methods"  
International Journal of production Research, Vol 15, N° 6, pp 599-608, 1977.
- [Yen 71] J. Y. Yen  
"Finding the k shortest loopless path in a network"  
Management science, vol. 17, n°11, pp 712-716, July 1971.
- [Yim et al 95] P. Yim, A. Hébrad et A. Lefort  
"Projet MINOS : Modeling and interpretation with nets and operational specification"  
CNRS, G.R Automatique, pôle SED, Groupe de travail 3,GT3, 26 janvier 1995.
- [Zi 89] Zhao Zi  
"Contribution à la construction d'un système expert d'aide à la conduite d'ateliers manufacturiers"  
Thèse de doctorat , Université de Valenciennes, 1989.

# **ANNEXES**



## I- RAPPEL SUR LA THEORIE DES GRAPHS

Nous allons présenter les principales définitions utilisées en théorie des graphes.

### Graphes et concepts orientés

Un graphe  $G=[X, U]$  est déterminé par la donnée :

- d'un ensemble  $X$  dont les éléments sont appelés sommets ou des noeuds. Si  $N=\text{Card } X$  est le nombre de sommets (de noeuds), on dit que le graphe est d'ordre  $N$ .
- d'un ensemble  $U$  dont les éléments  $u \in U$  sont des couples ordonnés de sommets appelés arcs. Si  $u=(i,j)$  est un arc de  $G$ ,  $i$  est l'extrémité initiale de  $u$  et  $j$  l'extrémité terminale de  $u$ . On notera  $\text{Card } U= M$ .

Un  $p$ -graphe est un graphe dans lequel il n'existe pas jamais plus de  $p$  arcs de la forme  $(i,j)$  entre deux sommets quelconques  $i$  et  $j$ , pris dans cet ordre. En particulier, un 1-graphe est un graphe tel qu'il n'existe jamais plus d'un arc de la forme  $(i,j) \quad \forall i, \forall j$ .

### Graphe et application multivoque

On dit que  $j$  est successeur de  $i$  si il existe un arc ayant  $i$  comme extrémité initiale et  $j$  comme extrémité terminale. L'ensemble des successeurs d'un sommet  $i \in X$  est noté  $\Gamma_i$ . L'application  $\Gamma$  qui, à tout élément de  $X$ , fait correspondre une partie de  $X$  (élément de  $\mathcal{p}(X)$ ) est appelé multivoque. On dit que  $j$  est prédécesseur de  $i$  si il existe un arc de la forme  $(j,i)$ . L'ensemble des prédécesseurs de  $i \in X$  peut être alors noté :  $\Gamma_i^{-1}$ , où  $\Gamma_i^{-1}$  est l'application (multivoque) réciproque de  $\Gamma_i$ .

Un multigraphe est graphe pour lequel il peut exister plusieurs arêtes entre deux sommets  $i$  et  $j$  donnés.

Un graphe est dit simple s'il est sans boucle et ne comporte jamais plus d'une arête entre deux sommets.

### Graphe complet, clique

Un graphe  $G= [X, U]$  est dit complet si, pour toute pair de sommets,  $(i,j)$ , il existe au moins un arc de la forme  $(i,j)$  ou  $(j,i)$ .

Un 1-graphe est complet si et seulement si :

$$(i,j) \notin U \Rightarrow (j,i) \in U$$

Un graphe simple complet d'ordre  $N$  est noté  $K_N$ . Un sous ensemble de sommets  $C \subseteq X$  tels que deux sommets quelconques de  $C$  sont reliés par une arête est appelé clique.

### Densité d'un graphe

La densité d'un graphe est le rapport entre le nombre d'arcs (d'arêtes) de ce graphe et la nombre (d'arêtes) que comporte le graphe complet ayant le même nombre de sommets. Ainsi dans le cas d'un graphe orienté, la densité est  $M/N(N-1)$ .

### Chemin et connexité

Une chaîne de longueur  $q$  (de cardinalité  $q$ ) est une séquence de  $q$  arcs :

$$L = \{u_1, u_2, \dots, u_q\}$$

telle que chaque arc  $u_r$  de la séquence ( $2 \leq r < q-1$ ) ait une extrémité commune avec l'arc  $u_{r-1}$  ( $u_{r-1} \neq u_r$ ) et l'autre commune avec l'arc  $u_{r+1}$  ( $u_{r+1} \neq u_r$ )

On appelle chaîne élémentaire un chaîne telle qu'en la parcourant, on ne rencontre pas deux fois le même sommet.

### Chemin, chemin élémentaire

Un chemin de longueur  $q$  (cardinalité  $q$ ) est une séquence de  $q$  arcs :

$$P = \{u_1, u_2, \dots, u_q\}$$

avec  $u_1 = (i_0, i_1)$ ,  $u_q = (i_{q-1}, i_q)$

(autrement dit, un chemin est une chaîne dont tous les arcs sont orientés dans le même sens).

Dans un 1-graphe, un chemin peut être décrit de façon équivalente, par la succession des sommets qu'il rencontre.

Un chemin élémentaire est un chemin tel qu'en le parcourant, on ne rencontre pas deux fois le même sommet. Dans un chemin élémentaire, tous les sommets sont de degré deux ou plus.

Un circuit est un chemin dont les extrémités coïncident. Un circuit élémentaire est un circuit dont tous les sommets sont de degré 2.

On appelle fermeture transitive de l'application multivoque  $\Gamma$ , l'application  $\hat{\Gamma}$  définie par :

$$\hat{\Gamma}_i = \Gamma_i \cup \Gamma_i^2 \cup \Gamma_i^3 \dots \cup \Gamma_i^{N-1}$$

$\Gamma_i^k$  représentant l'ensemble des sommets que l'on peut atteindre à partir du sommet  $i$  par le chemin ayant exactement  $k$  arcs. On en déduit que, puisque tout chemin élémentaire a au plus  $N-1$  arcs,  $\hat{\Gamma}_i$  représente l'ensemble des sommets que l'on peut atteindre par un chemin à partir du sommet  $i$  : on dit que  $\hat{\Gamma}_i$  est l'ensemble des descendant de  $i$ .

### Problème de cheminement dans les graphes

Le problème du plus court chemin peut être posé de la façon suivante : étant donné un graphe  $G=[X,U]$ , on associe à chaque arc  $u \in U$  un nombre réel  $l(u) = l_{i,j}$  appelé longueur de l'arc. Le plus court chemin entre 2 sommets spécifiés  $i_0 \in X$  et  $j_0 \in X$  consiste alors à déterminer parmi l'ensemble de tous les chemins joignant  $i_0$  à  $j_0$ , un chemin dont la longueur totale

$$l(\mu) = \sum_{u \in \mu} l(u)$$

soit minimale.

## II - EXEMPLE DETAILLE DE D'UTILISATION DES REGLES D'AGREGATIONS DES ALLOCATEURS DE RESSOURCES

Nous allons donner dans cette annexe l'application des règles d'agrégations énumérées au § 3.3.2.1, en illustrant progressivement les étapes de la construction. L'application de ces règles d'agrégation va nous permettre de retrouver la répartition du pilotage en centre de obtenue au chapitre II (figure II.14).

### 1- Identifier les ressources commandables de base (machines, robots, butée, aiguillages, etc.)

*Cette étape consiste en une mise à plat des différentes ressources commandables. Cela nous permet d'obtenir le niveau le plus bas de la hiérarchie.*

[P2] [T] [R1] [P3] [CU1] [R2] [P5] [R2] [P4] [A2] [J1] [A1] [J2] [P1] [P6] [A3]

[LM] [P11] [CU2] [R3] [P10] [A5] [A4] [P12] [P7] [P8]

### 2- Identifier les postes singuliers (machine+robot+butée)

*Cette étape permet de déterminer les ressources contribuant à la réalisation d'une tâche élémentaire. Elle correspond à la construction des postes de travail au sens PTA permettant l'arrêt et le transfert automatique d'un produit sur une ressource de transformation d'état. Elle permet d'obtenir les regroupements suivants :*

[P2, T,R1] [P3,CU1,R2,P5] [P5,R2] [LM,P11] [CU2,R3,P10]

### 3- Former le centre de décision locale de traitement (par ajout d'un aiguillage amont)

*Cette étape permet de sélectionner les produits de façon à les introduire dans la file d'attente des machines, selon le séquençement prévisionnel. Le centre de traitement local peut être assimilé à une machine virtuelle, ce qui revient à découpler l'aiguillage et la butée d'arrêt de l'ensemble du convoyeur (qui a été décomposé en différents éléments commandables dans l'étape 1). On obtient le regroupement suivant :*

[CU2,R3,P10,A5]

### 4- Agréger les centres de décision locaux ayant des ressources partagées (transfert, traitement, emplacement de stockage).

*On regroupe dans cette étape sous le même centre coordonateur, les centres de contrôle des ressources pouvant fréquemment entrer en conflit., à cause de la demande d'utilisation simultanée d'une même ressources . Cette règle permet le regroupement de [P3, CU1, R2] et de [P5, R2]. On obtient ainsi :*

[P3, CU1, R2, P5]

**5- Agréger les ressources mutuellement accessibles par deux ou plusieurs systèmes de transfert (deux robots, un aiguillage convergent)**

*Ce regroupement vise à établir une relation entre centres de décision pouvant s'échanger des produits, et à organiser l'accessibilité multiple à un même moyen de stockage ou de transformation.. Cette règle ne s'applique pas ici car la disposition du système de transfert ne le permet.*

**6- Agréger les aiguillages convergents et divergents adjacents n'appartenant pas à un centre de décision locale.**

*On regroupe les sections du convoyeur qui ont une fonction purement de transfert, car elles ne contribuent pas à l'acheminement direct des produits au pied des machines. Ces sections peuvent amplement être utilisées dans le cadre du routage dynamique . On obtient les regroupements suivants :*

[A2, J1] [A1, J2] [A4, P12] [P7, P8]

**7- Agréger les composantes connexes du point 1 [ressources commandables de base] en incluant 3 [Centre de décision de traitement] et 6 [Aiguillages adjacents]**

*(poste singulier autour du convoyeur : ensemble des circuits minimaux permettant l'échange des produits) . On veut ici regrouper les centres de décision afin de s'assurer de la maîtrise du cheminement des produits, dans une composante connexe du convoyeur .*

[P2, T, R1, A2, J1, P1, P4] [P3, CU1, R2, P5, A1, J2, P6, A3] [CU2, R3, P10, A5, A4, P12]

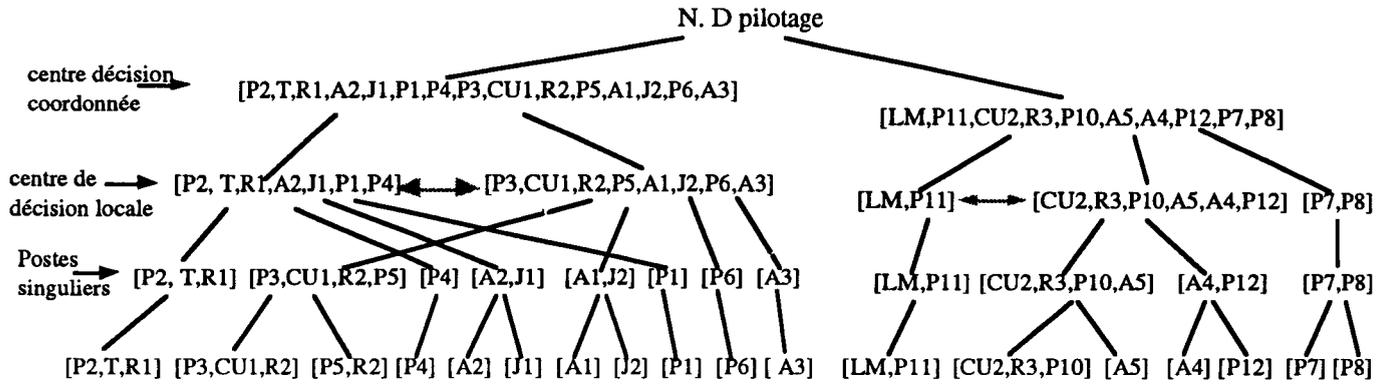
**8- Agréger les composants du point 2 [postes singuliers] communicant et ceux du point 7.**

*[On intègre ici les postes singuliers et autres composantes connexes pour former le niveau décisionnel supérieur principal]*

[P2, T, R1, A2, J1, P1, P4, P3, CU1, R2, P5, A1, J2, P6, A3]

[LM, P11, CU2, R3, P10, A5, A4, P12, P7, P8]

L'application de ces règles de façon opérationnelle conduit à l'obtention de l'arborescence des centres de décision.



### III - PRESENTATION DE L'ALGORITHME DE REORDONNANCEMENT

Nous allons présenter dans cette annexes la variante de  $A^*$ , effectuant un développement partiel de l'espace de recherche afin de trouver rapidement une meilleure solution d'affectation.

#### III.1. Généralités

Soit  $U$  l'espace de représentation fini ou infini d'un problème dont chaque règle est un opérateur de changement d'état;  $u_0 \in U$  est l'état initial du problème, et  $T \in U$  est le sous-ensemble des états terminaux.

A un couple d'états  $(u,v)$  tel qu'il existe une règle valide en  $u$  et qui appliquée en cet état, amène le système en  $v$ , on associe un nombre réel  $k(u,v)$  positif ou nul qui reflète le coût de changement d'état de  $u$  à  $v$  (i.e., coût d'application de la règle correspondante).

Le problème de la recherche heuristique consiste à déterminer, s'il en existe, une séquence l'état  $(u_0, u_1, u_2, \dots, u_r)$  telle que:

- (i)  $u \in T$ ,
- (ii) pour tout  $i$ ,  $1 \leq i \leq r$ , il existe une règle qui permet d'amener le système de l'état  $u_{i-1}$  à l'état  $u_i$ ,
- (iii) la somme des coûts  $\sum_{i=1, k} k(u_{i-1}, u_i)$  est minimale sur toutes les séquences vérifiant (i) et (ii).

Ce problème est équivalent à celui de la recherche d'un chemin minimal dans un graphe orienté  $G=(U,S)$ .  $G$  est défini implicitement par la donnée de  $u_0 \in U$  et de la relation successeur  $S$ . Cette relation traduit un ensemble de règles.

$v \in S(u)$  (i.e.,  $G$  comporte un arc de  $u$  à  $v$  de coût  $k(u,v)$ ) si et seulement si, il existe une règle transformant l'état  $u$  en  $v$ .

On note:

$S(u): \{ v_1, v_2, \dots, v_i \}$  le sous-ensemble des états successeurs de  $u$  ;

Par hypothèse, quelque soit  $u \in U$ , le nombre  $|S(u)|$  des successeurs de  $u$  est fini.

Par définition, le coût d'un chemin de  $G$  est la somme des coûts de ses arcs, et on pose:

$k^*(u,v)$ : minimum du coût des chemins de  $u$  à  $v$  s'il existe un chemin entre ces deux états; sinon, on prend par convention  $k^*(u,v) = \infty$ .

On définit également les trois applications  $g^*, h^*$  et  $f^*$  de  $U$  dans  $R^+$ :

—  $g^*(u) = k^*(u_0, u)$ : minimum du coût des chemins de  $u_0$  à  $u$ ;



- $h^*(u) = \min \{k^*(u,v) \mid v \in T\}$ : minimum du coût des chemins de  $u$  à un état terminal quelconque et
- $f^*(u) = g^*(u) + h^*(u)$ : minimum du coût des chemins passant par  $u$  et menant de  $u_0$ , à un état terminal.

Notons que  $g^*(u)$ ,  $h^*(u)$  et  $f^*(u)$  sont infinis par convention si les chemins correspondants n'existent pas; et que  $f^*(u_0) = h^*(u_0)$  correspond au coût d'un chemin optimal solution du problème précédent.

Sauf dans des cas triviaux aucun des trois applications  $f^*$ ,  $g^*$  ou  $h^*$  n'est connue a priori. Pour s'aider dans la résolution du problème posé, on se donne une information heuristique sous la forme d'une application  $h$  de  $U$  dans  $\mathbb{R}^+$  :  $h(u)$  est une estimation du coût  $h^*(u)$ . On dira que  $h^*(u)$  correspond à l'information parfaite sur la position relative de  $u$  par rapport à l'objectif  $T$  et que  $h(u)$  en constitue une approximation.

La qualité de cet estimateur heuristique  $h$  est mesurée par l'écart  $h(u)-h^*(u)$ , et appréciée sur la base d'une ou de plusieurs des propriétés suivantes:

- 1)  $h$  est une heuristique presque parfaite si et seulement si elle définit sur  $U$  une relation d'ordre identique à celle que définit  $h^*$ ; i.e., quelque soit  $u$  et  $v \in U$ :  $h(u) < h(v) \Rightarrow h^*(u) < h^*(v)$ .
- 2)  $h$  est une heuristique consistante si et seulement si quelque soit  $u, v$  tels qu'il existe un chemin de  $u$  à  $v$ :  $h(u)-h(v) \leq k^*(u,v)$ .
- 3)  $h$  est une heuristique monotone si et seulement si quelque soit  $u, v \in S(u)$ :  $h(u)-h(v) \leq k(u,v)$ .
- 4)  $h$  est une heuristique minorante si et seulement si quelque soit  $u$ :  $h(u) \leq h^*(u)$ .
- 5)  $h$  est une heuristique coïncidente si et seulement si quelque soit  $u \in T$ :  $h(u) = 0$ .

La propriété de minoration permet dans certains cas de réduire la complexité du calcul. Les priorités d'admissibilité et de terminaisons sont montrées dans [farreny et al 87].

Pour apprécier l'intérêt d'un état  $u$  dans la résolution d'un problème les algorithmes de recherche heuristique ont également besoin d'une estimation de  $g^*(u)$ . Sachant que pour tout état  $u$  engendré explicitement par la recherche un ou plusieurs chemins de  $u_0$  à  $u$  sont explicitement connus, on prendra le coût du meilleur de ces chemins comme estimation de  $g^*(u)$ . On note

$$g(u) = \text{minimum du coût des chemins de } u_0 \text{ à } u \text{ connus explicitement à un moment donné de la recherche; et}$$

$$f(u) = g(u) + h(u).$$

### III.2. Recherche ordonnée par l'évaluation f : L'algorithme A\*

Cet algorithme apparaît avec de nombreuses variantes dans la littérature. Nous l'exposons tout d'abord sous une formulation simple.

A\* partition l'ensemble des états explicitement engendrés (les seuls connus) en deux sous-ensembles:

— P: ensemble des états susceptibles d'être développés ou redéveloppés, appelés états pendants (ou ouverts)

— Q: ensemble des états déjà développés et qui ne sont pas candidats au développement.

P est l'ensemble des alternatives parmi lesquels l'algorithme devra choisir l'état suivant à développer. Pour tout état u de P ou de Q, l'algorithme ne retient qu'un seul chemin.

On commence par classer les produits par dates due croissantes.

(chaque produit a déjà un certain nombre de ses opérations réalisées). Afin de réaliser la nouvelle affectation, on applique pour chaque produit les étapes suivantes:

1- P et Q sont vides;

2- Mettre l'état initial dans P; (l'état initial correspond à l'ensemble des opérations susceptibles d'être affectées)

3- Pour chaque opération (état de P)

Calculer  $f(n)$ ;

Choisir l'opération ayant la plus petite valeur de f;

$P \leftarrow P - \{\text{opération sélectionné}\}$ ;

4- Si l'opération sélectionnée est la dernière opération du produit

Alors aller à FIN;

5- Développer le noeud choisi en générant ses successeurs possibles:

-- on recherche ici l'ensemble des machines susceptibles

-- de d'usiner l'opération suivant celle qui vient d'être sélectionnée.

6- Si un successeur est égal à un état de ( une opération dans) Q

Alors Si la valeur f de ce nouvel état (nouvelle opération) est plus grand que celle du même état dans Q

Alors Mettre cet état dans Q;

Si la valeur f du nouvel état est inférieure à celle du même état dans Q

Alors Remplacer la valeur de f de l'état dans Q par la valeur du nouvel état.

7- Mettre tous les successeurs dans P;

8-  $Q \leftarrow Q + \{\text{opération sélectionné}\}$ ;

9- Aller en 3;

**Fin** : le noeud sélectionné est le noeud terminal.

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

Figure I.1 : Flexibilité et productivité .....	25
Figure I.2 : Interaction entre sous-systèmes de production .....	32
Figure I.3 : Hiérarchie entre niveaux de décision .....	34
Figure I.4 : décomposition du processus de décision dans ORABAID .....	46
Figure I.5 : Modèle de pilotage LAMSADE .....	47
Figure I.6 : Structure interne d'un centre de décision CODECO .....	48
Figure I.7 : Pilotage par l'approche PSC .....	49
Figure I.8 : Pilotage par comportement .....	50
Figure I.9 : Pilotage auto-contrôlé .....	51
Figure I.10 : Les différentes phases de PC CoDe.....	51
Figure I.11 : Décomposition d'un SFPM .....	51

## Chapitre II

Figure II.1 : Démarche de conception CASPAIM .....	67
Figure II.2 : Architecture de contrôle commande d'un SPF .....	72
Figure II.3 : Cellule flexible de l'EC Lille .....	74
Figure II.4 : Exemple de connexion entre modèles de la commande .....	75
Figure II.5 : Origine-conséquences des perturbations pour un produit .....	86
Figure II.6 : Origine-conséquences des perturbations pour les opérations .....	87
Figure II.7 : Origine-conséquences des perturbations pour les ressources .....	87
Figure II.8 : Architecture de contrôle hiérarchisé : décision et information centralisée .....	91
Figure II.9 : Architecture de contrôle hiérarchisé : décision centralisée et information distribuée.....	91
Figure II.10 : Architecture de contrôle réparti : décision distribuée et information centralisée .....	92
Figure II.11 : Architecture de contrôle réparti : décision distribuée et information distribuée .....	92
Figure II.12 : Structure d'un centre de décision .....	95
Figure II.13 : Hiérarchie et coopération entre centre de décision .....	99
Figure II.14 : Hiérarchie des centres de décision de la cellule de l'EC Lille .....	100

## Chapitre III

Figure III.1 : Hiérarchisation de la fonction gestion de production .....	107
Figure III.2 : Boite fonctionnelle de pilotage .....	109
Figure III.3 : Relation allocateur de ressources-surveillance .....	112
Figure III.4 : Définition des paramètres d'une opération .....	113
Figure III.5 : Exemple d'intervalle de lancement .....	115
Figure III.6 : Exemple de séquence d'opérations .....	116
Figure III.7 : Processus de décision .....	118
Figure III.8 : Instant d'apparition d'une requête .....	122
Figure III.9 : Exemple de cellule flexible .....	135
Figure III.10 : Graphe du système de transport .....	135
Figure III.11 : Graphe modifié du système de transport .....	136
Figure III.10 : Définition de la marge opératoire .....	139
Figure III.13 : Exemple de séquence d'opérations .....	141
Figure III.14 : Exemple d'ordonnancement prévisionnel .....	159
Figure III.15 : Exemple 1 .....	159
Figure III.16 : Exemple 2 .....	161
Figure III.17 : Exemple 3.a .....	162
Figure III.18 : Exemple 3.b .....	163

# **SOMMAIRE    DETAILLE**



Notations Utilisées .....	5
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>9</b>

## **CHAPITRE I : Problématique de la décision et du pilotage dans les systèmes de production flexibles.**

<b>Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>1-Présentation des ateliers flexibles .....</b>	<b>18</b>
1.1- Evolution des systèmes de production .....	18
1.1.1- Evolution et conséquences .....	18
1.1.2- Typologie des systèmes de production .....	20
1.1.2.1- Production de grande série ou de masse .....	20
1.1.2.2- Production en petite et moyenne série .....	21
1.1.2.3- Production unitaire .....	21
1.1.2.4- Conclusion .....	22
1.2- Description des ateliers flexibles de production .....	22
1.2.1- Définition .....	22
1.2.2- Niveau de flexibilité.....	23
1.2.3- Flexibilité et productivité .....	24
1.3- Contraintes temps réel et ateliers flexibles .....	26
1.3.1- Définition .....	26
1.3.2- Caractéristiques des applications temps réel .....	26
1.3.2.1- Contrainte de temps .....	26
1.3.2.2- Contrainte de parallélisme.....	27
1.3.2.3- Contrainte sur les entrées-sorties.....	27
1.3.2.4- Contrainte de fiabilité.....	27
1.3.3- Temps réel et ateliers flexibles .....	28
1.4- Notion d'usine intégrée .....	29
1.4.1- Concept CIM .....	30
1.4.2- Problèmes posés par le contexte CIM .....	31
1.5- Conclusion .....	31

<b>2- Décision en gestion de production .....</b>	<b>32</b>
2.1- Décomposition systémique d'un système de production .....	32
2.1.1- Système physique .....	33
2.1.2- Système d'information.....	33
2.1.3- Système de décision .....	33
2.2- Hiérarchisation des décisions opérationnelles .....	35
2.3- Organisation globale de la gestion de production .....	35
<b>3- Problématique du pilotage d'ateliers .....</b>	<b>38</b>
3.1- Problématique générale du pilotage d'ateliers flexibles .....	38
3.1.1- complexité et diversité des problèmes d'ordonnancement .....	39
3.1.1.1- Approche par décomposition .....	40
3.1.1.2- Approche par construction et exploration .....	41
3.1.1.3- Approche par enrichissement de connaissances .....	41
3.1.1.4- Autres outils de modélisation et/ou résolution .....	42
3.1.2- Environnement dynamique et contexte perturbé d'un atelier flexible .....	42
3.1.3- Problème de suivi .....	43
3.1.4 - Intégration du pilotage dans le système de conduite .....	44
3.1.5 - Conclusion .....	45
3.2- Quelques approches utilisées dans les méthodes d'aide au pilotage.....	45
3.2.1- Approches du LAAS .....	45
3.2.2- Approche LAMSADE .....	47
3.2.3- Approche du LAG .....	48
3.2.4- Approche GRAI .....	49
3.2.5- Approche du LAB .....	50
3.2.6- Approche du CRAN/LACN .....	51
3.2.7- Approche du LIT.....	52
3.2.8- Conclusion .....	53
3.3- Problématique de l'ordonnancement et du pilotage dans CASPAIM .....	54
3.3.1- Introduction à CASPAIM .....	54
3.3.2- Position du problème .....	55
<b>4- Conclusion .....</b>	<b>58</b>

## CHAPITRE II : Analyse des perturbations et organisation du pilotage temps réel

<b>Introduction</b> .....	61
<b>1 - Présentation de la méthode de conception du contrôle/commande</b> .....	62
1.1- Evolutions du projet CASPAIM .....	62
1.2- Principe de l'approche CASPAIM II .....	63
1.3- Définition des concepts .....	64
1.3.1- Gamme logique d'un produit .....	64
1.3.2- Gamme opératoire d'un produit .....	64
1.3.3- Gamme opératoire étendue d'un produit .....	64
1.4- Les étapes de la conception .....	65
1.4.1- Phase de spécification .....	66
1.4.1.1- Spécification de la partie logique et physique .....	66
1.4.1.2- Spécification de la partie décisionnelle .....	67
1.4.1.3- Spécification des modes de fonctionnement .....	67
1.4.2- Phase d'analyse et de conception .....	67
1.4.2.1- Génération automatique des gammes opératoires .....	67
1.4.2.2- Génération des gammes opératoires étendues .....	68
1.4.2.3- Elaboration du gestionnaire des modes de fonctionnement .....	68
1.4.2.4- Conception des modules décisionnels .....	68
1.4.2.5- Conception de la surveillance .....	69
1.4.3- Phase de validation .....	69
1.4.3.1- Validation statique des gammes .....	69
1.4.3.2- Validation du comportement dynamique des ressources .....	70
1.4.3.3- Phase d'implantation .....	70
1.5- Architecture de contrôle et aspects liés au pilotage .....	71
1.5.1- Architecture de contrôle .....	71
1.5.2- Exemple de connexion entre modèles de commande .....	72
1.5.3- Aspects liés au pilotage .....	75
1.6- Conclusion .....	76



<b>4 - Conclusion</b> .....	101
-----------------------------	-----

### **Chapitre III : Contrôle dynamique de l'évolution des opérations : réaction aux aléas.**

<b>introduction</b> .....	105
---------------------------	-----

#### **1- Hiérarchisation du niveau décisionnel et modélisation fonctionnelle du pilotage**

1.1- Hiérarchisation des fonctions de contrôle de production .....	106
1.2- Modélisation fonctionnelle du niveau pilotage .....	109
1.2.1- L'ordonnancement prévisionnel .....	110
1.2.2- Le suivi de production .....	110
1.2.3- Décision de réaliser une opération .....	111
1.2.4- Demande de réordonnancement .....	111
1.2.5- Relation entre pilotage et surveillance .....	112
1.3- Notations et définitions .....	113
1.3.1- Notations .....	113
1.3.2- Définitions .....	114
1.3.2.1- Intervalle de lancement .....	114
1.3.2.2- Séquence d'opérations .....	116
1.3.2.3- Notion d'état du système .....	117
1.4- Processus décisionnel .....	117
1.4.1- Détection .....	118
1.4.2- Qualification .....	119
1.4.3- Décision .....	119
1.5- Objectifs et critère de contrôle .....	120

#### **2- Contrôle des opérations de transfert** ..... 121 |

2.1- Gestion des requêtes et résolution des indéterminismes directionnels .....	121
2.1.1- Fonction de priorité face aux délais .....	123
2.1.1.1- Définition .....	123
2.1.1.2- Exemple .....	124
2.1.2- Fonction de priorité minimisant le temps de présence du produit dans la cell. ....	125
2.1.2.1- Définition .....	125
2.1.2.2- Exemple .....	126

2.1.3- Conclusion .....	127
2.2- Routage des produits entre lieux de transformation .....	128
2.2.1- But et problématique .....	128
2.2.2- Algorithme de résolution .....	129
2.2.2.1- Recherche du plus court chemin en temps de transfert .....	130
a- Expression du temps de séjour dans une file d'attente .....	131
b- Recherche du plus court chemin en temps de transfert .....	133
2.2.2.2- Heuristique de routage dynamique des produits entres lieux phys. ....	134
2.2.3- Exemple .....	134
2.3- Conclusion .....	137

### 3- Contrôle des opérations de transformation d'état

Introduction .....	137
3.1- Eléments de quantification de l'état du système :	
détection des incohérences par rapport au prévisionnel .....	138
3.1.1- Marge d'une séquence d'opérations .....	138
3.1.1.1- Définition de la marge opératoire .....	138
3.1.1.2- Définition de la marge d'une séquence opérations.....	139
3.1.1.3- 1ere condition d'admissibilité d'une séquence d'opérations .....	140
3.1.2- Marge d'absorption de l'opération à lancer .....	140
3.1.2.1- Définition .....	140
3.1.2.2- 2eme condition d'amissibilité d'une séquence d'opérations .....	143
3.1.3- Conclusion .....	144
3.2- Types d'actions correctives .....	144
3.2.1- Permutation locale d'opérations .....	144
3.2.2- Consommation de marge par anticipation .....	147
3.2.3- Echange d'opérations entre machines équivalentes .....	149
3.2.4- Transfert d'opérations d'une machine vers une autre .....	151
3.2.5- Réordonnancement .....	152
3.3- Heuristique de contrôle d'opérations de transformation d'état .....	157
3.3.1- Heuristique de contrôle .....	157
3.3.2- Exemple de synthèse .....	158
3.3.2.1- Exemple 1 .....	159
3.3.2.2- Exemple 2 .....	160
3.3.2.3- Exemple 3 .....	162

<b>4- Conclusion</b> .....	164
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	165
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	169
<b>ANNEXES</b> .....	191
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	203
<b>SOMMAIRE DETAILLE</b> .....	205

