



**HAL**  
open science

# Étude de la planification d'une unité de fabrication en vue de sa gestion intégrée

Philippe Mahey

► **To cite this version:**

Philippe Mahey. Étude de la planification d'une unité de fabrication en vue de sa gestion intégrée. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1978. Français. NNT: . tel-00178418

**HAL Id: tel-00178418**

**<https://theses.hal.science/tel-00178418>**

Submitted on 11 Oct 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

présentée

**DEVANT L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE (SCIENCES)**

pour l'obtention

du titre de DOCTEUR de 3<sup>e</sup> Cycle

Spécialité : Electronique, Electrotechnique, Automatique

Option : Automatique

par

**Philippe MAHEY**

Maitre es Sciences

---

## ÉTUDE DE LA PLANIFICATION D'UNE UNITÉ DE FABRICATION EN VUE DE SA GESTION INTÉGRÉE

---

*Soutenue le 20 Février 1978 devant la commission d'examen :*

MM. J.L. ABATUT

Président

M. AUBERT

J. DELMAS

G. GIRALT

F. ROUBELLAT

}  
Examineurs

## AVANT-PROPOS

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes du C.N.R.S., dirigé par Monsieur le Professeur G. GRATELOUP, dans l'équipe "Ordonnancement dynamique" animée par Monsieur F. ROUBELLAT, chargé de recherche au C.N.R.S., qui m'a fait bénéficier de son expérience et de ses judicieux conseils tout au long de mon travail. Qu'il trouve ici toute ma reconnaissance.

Je tiens à remercier Monsieur J.L. ABATUT, Maître de Conférences à l'Université Paul Sabatier, d'avoir bien voulu accepter la présidence du jury de thèse.

J'exprime ici toute ma gratitude à Messieurs M. AUBERT, Directeur de l'Informatique à l'usine de Radiotechnique-Compelec d'Evreux, qui me fait l'honneur de participer au jury de cette thèse, et R. PETIT, Responsable du département des Circuits Hybrides pendant l'étude, ainsi qu'à tous ceux qui par deux fois m'ont accueilli à Evreux et ont participé à ce travail.

Je remercie également Monsieur J. DELMAS, professeur à l'E.N.S.A.E., qui a accepté de s'intéresser à cette étude, ainsi que Monsieur G. GIRALT, Directeur de Recherche au C.N.R.S., dont le dynamisme et la compétence m'ont été bien souvent d'un grand secours.

Je remercie également tous les membres de l'équipe "Ordonnancement dynamique" du L.A.A.S., ainsi que tous ceux qui ont contribué à mon travail d'une manière ou d'une autre et plus particulièrement, Mademoiselle F. COQUOT qui a eu la charge de la dactylographie de ce mémoire ainsi que Messieurs R. ZITTEL, D. DAURAT et J. LORTAL du service imprimerie du L.A.A.S.

## NOTATIONS UTILISEES

---

### INDICES PRINCIPAUX :

i	représente une gamme de fabrication (§ 2.3.2)
$\alpha$	représente un sous-atelier et le stock qui l'alimente (§ 2.3.2)
K	représente une période de l'horizon discrétisé (§ 2.3.2)
$\beta$	représente un poste critique (§ 2.3.3.2)
j	représente un produit du magasin d'approvisionnement (§ 2.3.3.3.)

### LA TAILLE DU PROBLEME EST DEFINIE PAR LES 4 PARAMETRES :

NI	nombre de gammes différentes prises en compte par le modèle
N $\alpha$	nombre de sous-ateliers
NK	nombre de périodes constituant l'horizon
N $\beta$	nombre de postes critiques

$\alpha_e$	stock d'entrée
$\alpha_s$	stock de sortie
$K_0$	instant initial
T	fin de l'horizon

- $X(\alpha, i, K)$  = Niveau résiduel du stock  $\alpha$  en produits utilisant la gamme i à la fin de la période K

$Y(\alpha, i, K)$  = Quantité de produits utilisant la gamme i lancés en fabrication dans le sous-atelier  $\alpha$  pendant la période K.

$X_0(\alpha, i)$  = état initial du stock  $\alpha$  en produits de gamme i

$XC(i, K)$  = quantité de produits de gamme i commandés pour la date K

- $\rho(\alpha, i)$  = rendement de fabrication affectant le transit des produits de gamme  $i$  à travers le sous-atelier  $\alpha$ .
- $CAP(\beta, K)$  = capacité en heures de poste  $M_\beta$  pendant la période  $K$   
 = nombre de postes critiques inclus dans le premier sous-atelier
- $F(i, \beta)$  = (noté souvent  $F_{i\beta}$ ) = temps fictif d'occupation du poste  $M_\beta$  pour l'usinage d'une unité de produit-gamme  $i$
- $XM(\beta, K)$  = charge résiduelle en heures d'occupation du poste  $M_\beta$  restant dans le stock en amont du poste  $M_\beta$  pendant la période  $K$
- $M(\beta, K)$  = niveau optimal de la variable  $XM(\beta, K)$
- $\epsilon_M(\beta, K)$  = écart entre le niveau optimal  $M(\beta, K)$  et la variable  $XM(\beta, K)$
- $\epsilon_S(i, D)$  = écart entre la livraison de produits de gamme  $i$  et la commande prévue pour la date  $D$
- $a_{i\alpha}^j$  = quantité de produit/magasin n°  $j$  nécessitée par la fabrication d'une unité de produit/gamme n°  $i$  dans le sous-atelier  $\alpha$ .
- $XA(j, K)$  = niveau du stock de produits/magasin n°  $j$  à la fin de la période  $K$
- $TA(j, K)$  = quantité de produit/magasin n°  $j$  commandé pour la date  $K$

## INTRODUCTION

---



Les travaux présentés dans cette thèse se situent dans le domaine de l'"Automatisation Intégrée" des systèmes de production industriels.

L'existence de systèmes de plus en plus grands et complexes d'une part, les développements technologiques dans l'informatique d'autre part, ont amené les automaticiens à s'intéresser à la commande des grands systèmes évolutifs, qualifiés de systèmes complexes et à élaborer de nouvelles techniques d'analyse appropriées, dites "Analyse systémique".

La gestion de la production d'une entreprise constitue un champ de recherche et d'application de ces nouvelles techniques particulièrement favorable.

Planification, gestion des stocks, ordonnancement, calcul des prix, autant de sujets d'étude que beaucoup de gestionnaires ont eu tort d'analyser de manière indépendante en isolant l'un d'eux du contexte globale pour le résoudre. L'entreprise est un tout indissociable et il est apparu d'une façon impérative la nécessité d'intégrer les différentes fonctions constituant la gestion réelle de la production.

"La gestion intégrée doit avoir essentiellement pour caractéristique de délivrer des renseignements synthétiques et en ce sens elle constitue une aide précieuse à la gestion de l'Entreprise, car elle évite aux responsables la manipulation de très nombreuses informations élémentaires "  
(M. Crolais).

C'est dans cette optique d'"Automatisation Intégrée" qu'a été développé un programme de recherche entre le L.A.A.S. et l'industrie, principalement la Radiotechnique Compelec. Trois objectifs essentielles ont été formulés :

- . La planification de la production
- . Le contrôle statistique de la qualité de la fabrication
- . La coordination logique des décisions.



Notre contribution concerne le premier de ces objectifs et pourrait s'intituler : "Etude de faisabilité d'une aide informatique à la planification moyen terme de la production d'un atelier en vue d'une implantation". Nous délimitons dans un premier chapitre le cadre de cette étude, située à un niveau intermédiaire dans la structure décisionnelle de gestion de l'entreprise entre commerçants et fabricants, d'où son intérêt stratégique.

L'analyse d'un cas réel fourni par notre partenaire industriel nous a permis d'élaborer un modèle simple de la production adapté aux objectifs moyen terme, modèle dont nous donnons les caractéristiques dans un second chapitre. Inconnues, contraintes, critères constituent les éléments d'un système linéaire de grande dimension et notre souci principal restera la recherche d'un équilibre entre la réduction de la taille du modèle et la prise en compte du maximum d'information.

Dans un troisième chapitre, nous décrirons l'atelier de fabrication des circuits intégrés hybrides de la R.T.C. Evreux qui nous a servi de support industriel et nous détaillons les nombreux problèmes rencontrés au cours de sa modélisation. Performances et résultats de l'outil informatique construit sont ensuite exposés.

L'intérêt d'une seconde application pratique nous est apparu en cours d'étude et la proximité et la disponibilité d'autres ateliers aux caractéristiques favorables à Evreux nous ont permis d'évaluer les possibilités d'adaptation du modèle et de compléter sa mise au point.

Dans la conclusion, l'importance des travaux en cours et à venir devant prolonger et amplifier notre contribution est soulignée. L'espoir d'une proche implantation d'un outil de planification efficace issu de celui que nous avons réalisé est modestement avancé.

# CHAPITRE I

---

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION DANS UN SYSTEME  
DE GESTION INTEGREE DE L'ENTREPRISE

I-1 - L'ENTREPRISE, SYSTEME COMPLEXE

"La tâche du manager d'une entreprise est bien plus complexe et plus stimulante que celle du mathématicien, du physicien ou de l'ingénieur. Dans un problème de gestion, un plus grand nombre de facteurs significatifs doivent être pris en compte. Les interconnexions entre ces facteurs sont plus complexes, les systèmes de plus grandes dimensions, les relations non linéaires qui contrôlent le cours des événements plus significatives. L'environnement du manager a pour caractère essentiel, l'évolution ....."  
J.W. FORRESTER ("Industrial dynamics", MIT Press, 1961).

Dans une entreprise moderne, un des tous premiers objectifs à atteindre est sans doute la rentabilité de la gestion interne. Améliorer cette gestion signifie appréhender les différentes fonctions de l'entreprise ainsi que les paramètres qui leur sont liés, évaluer les interconnexions entre ces sous-problèmes, et enfin élaborer une méthodologie pour la conception d'une commande variable.

Nous avons volontairement employé le langage de la théorie des systèmes pour souligner la nécessité de considérer l'entreprise comme un système complexe entier et non pas comme la somme d'une foule de tâches et de projets simultanés et sans liens.

Jusqu'à présent, ces nombreux sous-problèmes que rencontrent les gestionnaires ont fait l'objet d'un grand nombre d'études séparées et le développement de l'utilisation de l'ordinateur a stimulé l'esprit de cette recherche tout en le transformant peu à peu. Progressivement, l'ordinateur est apparu dans l'entreprise, d'une part pour informatiser la gestion comptable de l'usine et d'autre part aux côtés de l'ouvrier dans un souci croissant des dirigeants d'automatiser les postes de travail. Simultanément, des problèmes d'ordre humain sont apparus surtout au niveau inférieur de la hiérarchie sociale de l'entreprise, montrant un besoin d'adaptation des structures sociales devant ce bouleversement des conditions de travail. Sans doute ces problèmes ont-ils été moins considérés par les industriels ceux-ci restant plus désireux d'accroître le rendement de la production par des moyens relativement peu coûteux ? L'imbrication des problèmes

socio-économiques et des besoins de la production se fait aujourd'hui plus vivement ressentir comme le prouve l'intérêt grandissant des industriels devant des théories telles que l'intégration de la gestion de la production. Du point de vue recherche pure on peut signaler les travaux de J.L. Giordano et J.C. Suquet sur l'"Aide à la décision en matière d'organisation d'atelier" [2] .

L'apport de l'ordinateur doit maintenant faciliter la tâche du gestionnaire en assouplissant les structures hiérarchiques de l'entreprise. C'est une véritable collaboration qui doit exister entre l'informatique et le décideur humain.

Comme le souligne Forrester, l'entreprise ne peut être analysée comme un système figé, mais en évolution permanente. Supprimer totalement la lourdeur des structures décisionnelles existantes pour aboutir à un contrôle automatisé global et en temps réel de la production reste aujourd'hui un objectif assez utopique, étant donné l'énormité du système à commander et sa position dans un milieu extrêmement imprévisible. Toutefois, l'automatisation intégrée des fonctions de la gestion de production réalisée dans une structure hiérarchisée simplifiée doit fournir petit à petit une aide à la décision efficace à tous les décideurs concernés.

#### I-2 - NECESSITE D'UNE AIDE A LA DECISION

Dans une grande entreprise, l'enchaînement des différentes décisions réglant la production est extrêmement complexe et fastidieux à décrire. Il relève principalement de la loi suivante : plus on s'élève dans la hiérarchie de l'entreprise, plus l'information utilisée par le décideur est complexe et plus la décision prise sera "grave!"

L'écoulement des décisions dans l'arbre hiérarchique est bien souvent univoque.

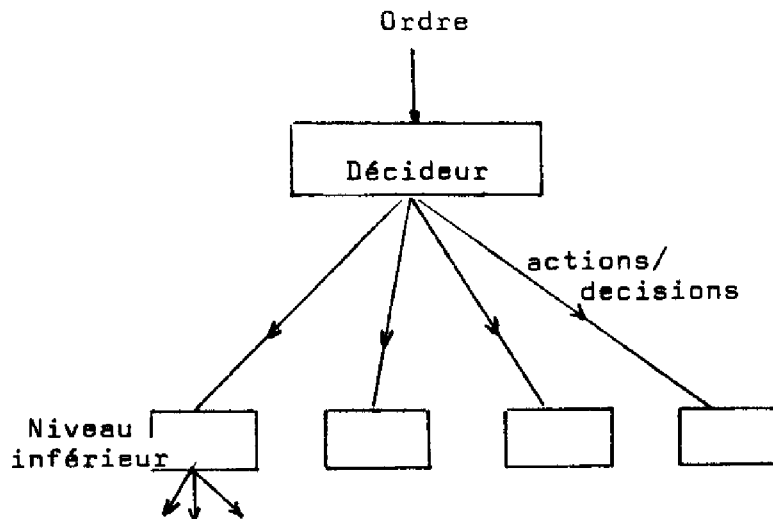
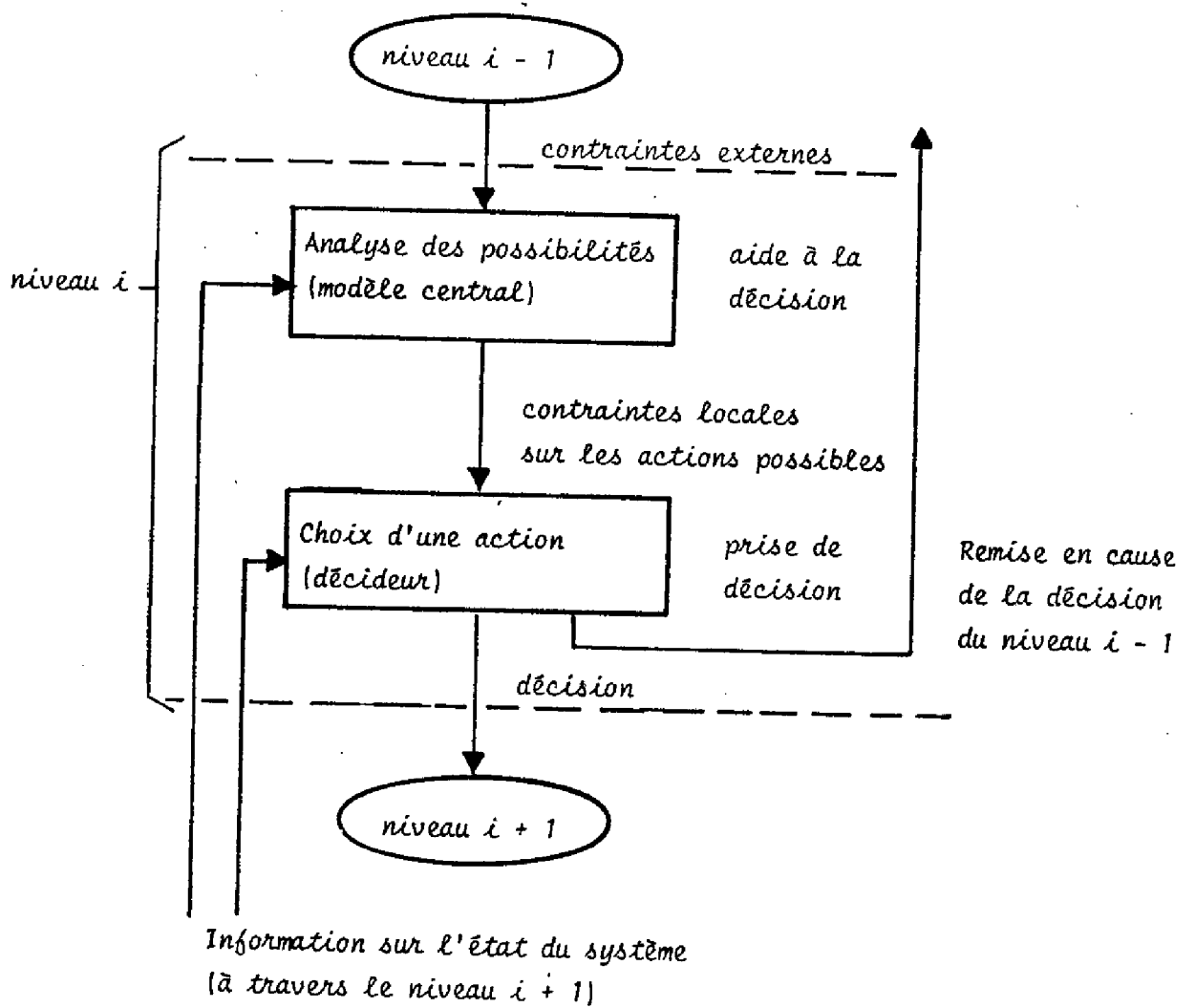


fig.1-1

Pour améliorer cette situation, chaque décideur doit disposer d'un capital d'informations adaptées à ses fonctions, c'est-à-dire plus ou moins agrégées et plus ou moins traitées au préalable. Cette phase de traitement de l'information par son ampleur d'une part et son côté répétitif d'autre part, est particulièrement destinée à l'ordinateur. Grâce à une automatisation contrôlée de cette première phase, le décideur a réduit son problème à une taille raisonnable et peut utiliser des informations plus spécifiques de ses fonctions (interruptions locales, données floues ou aléatoires, expérience personnelle) pour choisir l'action la meilleure et la transmettre au niveau inférieur. On a ainsi séparé le travail du gestionnaire en deux niveaux : un niveau "aide à la décision" qui sélectionne grâce à un modèle informatique adapté un certain nombre d'actions possibles et un niveau "prise de décision" qui choisit la meilleure.

fig. 1-2 - Schéma général de l'aide à la décision

d'après [3]



Si l'aide à la décision reste insuffisante, le décideur peut renvoyer une information d'alerte au niveau supérieur (figure 1-2).

C'est donc au niveau "aide à la décision" que l'automatisation apparaît dans la gestion de l'entreprise, car il est bon que la prise de décision reste entièrement commandée par l'homme. Le degré d'automatisation relatif de chaque niveau diffère suivant la situation dans l'arbre hiérarchique. Ainsi, au niveau le plus bas, l'action humaine n'est nécessaire qu'en cas de perturbations majeures, le régime permanent étant commandé automatiquement : par exemple, c'est le cas des postes de travail automatiques.

Chaque niveau utilise donc un modèle informatique alimenté par le flux d'informations qui irrigue de manière homogène et contrôlée le système de gestion intégrée de l'entreprise.

### 1-3 - UN SYSTEME DE COMMANDE HIERARCHISE

Dans une première étude que l'équipe réalisa en collaboration avec la Radiotechnique-Caen, l'accent avait été porté sur la description d'un modèle global de gestion intégrée dans le but d'approfondir plus particulièrement le contrôle qualité en temps réel des semiconducteurs produits par l'usine. Nous nous devons de rappeler sommairement ce modèle, décrit plus en détail dans les travaux de M. Richetin [4].

L'objectif à observer avait été partagé en trois volets :

- qualité et quantité de produits finis
- coûts de production et de stockage minimums
- conditions de travail

Le système de commande et de surveillance a été situé à un niveau intermédiaire entre un niveau supérieur, fixant la politique de production et un niveau inférieur réalisant la fabrication elle-même, c'est-à-dire l'atelier. L'ensemble du système et les différents flux d'information sont schématisés figure 1-3. Expliquons sommairement ce schéma :

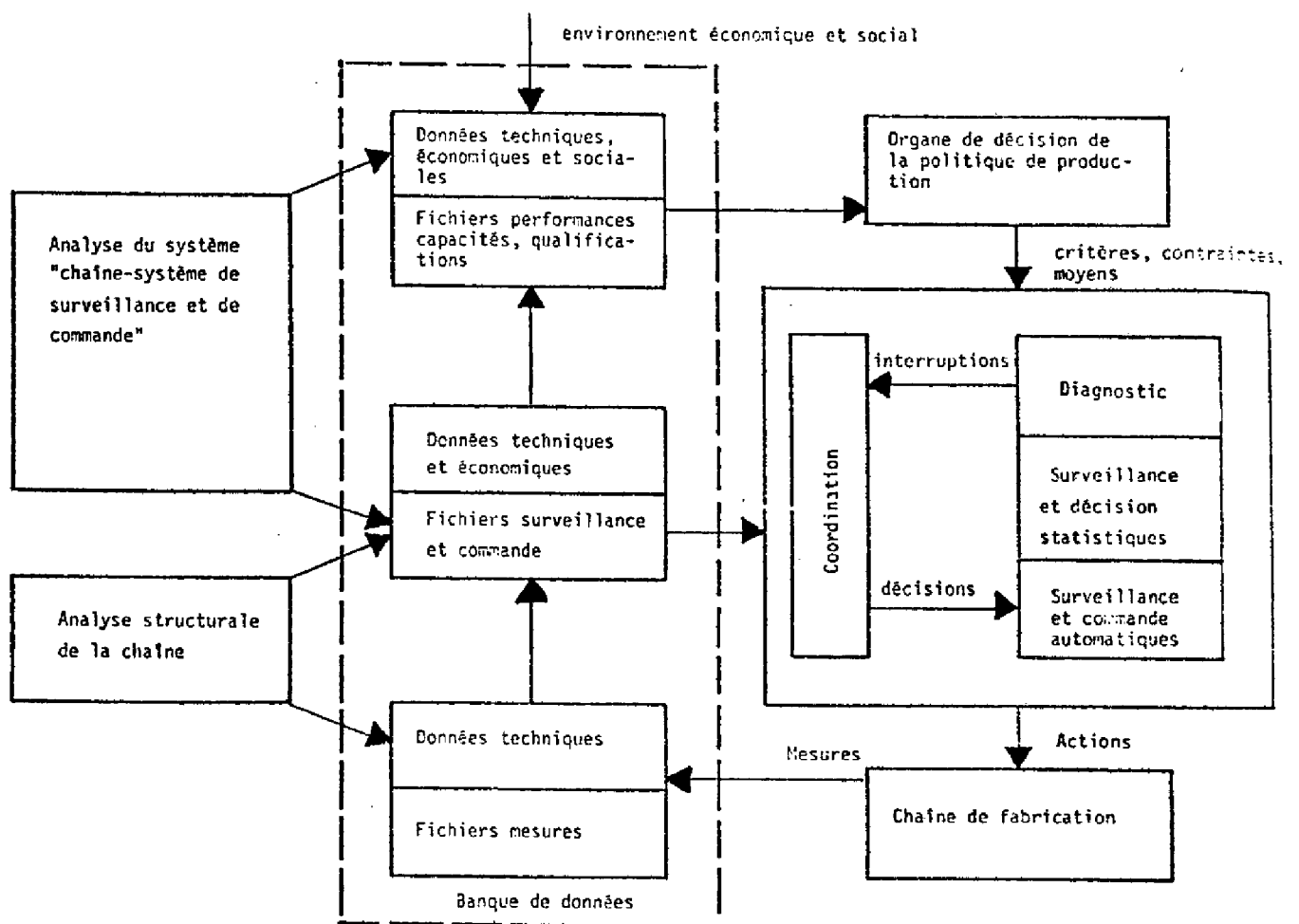


Figure 1-3 - Système hiérarchisé de commande



### 1-3-1 - Le niveau supérieur

Il utilise une information de deux types :

- . active, ce sont les contraintes du marché extérieur, les perturbations dont il assume la responsabilité (économiques ou sociales, grèves...)
- . passive, ce sont les données techniques, économiques et sociales de l'entreprise

Il fixe alors la politique de production sur un horizon long terme (nous retrouverons ces fonctions quand nous détaillerons les niveaux de gestion de la production) et précalcule critères et contraintes généraux devant motiver les niveaux inférieurs.

### 1-3-2 - Le système de surveillance et de commande

Il regroupe l'ensemble des modèles informatiques du type "aide à la décision" qui aident à la gestion de l'entreprise. Dans le cas d'une perturbation survenue sur le processus réel, un coordinateur logique choisit le module qui devra répondre à l'interruption et prendre une décision en conséquence. Ces modules au nombre de trois correspondent, non pas à une fonction de gestion donnée, mais à un type d'information, déterministe, statistique répertoriée ou non répertoriée.

i) Surveillance et commande automatique : l'information utilisée est très complète et conduit à une automatisation poussée (machine à commande numérique, robots...)

ii) Surveillance et décision statistique : la connaissance du processus est imparfaite et d'origine statistique. Ce niveau reste encore l'objet de recherches et intègre le contrôle qualité, la planification des besoins et desancements, ce dernier problème faisant l'objet de notre étude.

iii) Diagnostic : son rôle est de prendre en compte des incidents qui ne peuvent être maîtrisés par les niveaux précédents par manque d'information (apprentissage).

iv) Coordination logique : il décide de la meilleure gestion des interruptions survenues dans la chaîne et du choix du module décideur en minimisant le coût de recherche de l'action justifiée à l'intérieur d'un modèle logique du type "tables de décision".

### 1-3-3 - La banque de données et l'analyse du système

Chaque niveau de surveillance utilise un type d'informations donné, informations organisées sous forme de banque dont la structure est fonction d'une analyse préalable du système. L'ensemble des fonctions d'analyse constitue un module d'apprentissage s'insérant dans la boucle de commande globale et permet une remise à jour permanente du système informatique.

I-4 - OBJECTIFS DU PROGRAMME "AUTOMATISATION INTEGREE"

Le modèle global décrit au paragraphe précédent fournit les bases d'un vaste programme de recherche qui a regroupé des équipes de natures aussi différentes que commande stochastique, ordonnancement dynamique ou théorie des systèmes évolutifs commandés. L'accent a été porté sur la relation étroite entre qualité de l'information et degré d'automatisation.

L'intérêt pratique d'un tel système au moment où se manifeste de manière aigue la nécessité d'une meilleure maîtrise de la production ainsi que d'amples modifications de la structure de fabrication des entreprises, a favorisé la collaboration des chercheurs et des industriels.

Ces conditions exceptionnelles ont permis l'approfondissement d'un certain nombre de points rassemblés dans un rapport final ( [5] , [5.1] , [5.2] , [5.3] , [5.4] ).

L'élaboration d'une méthodologie générale visant au contrôle qualité a été l'objectif principal de la première partie du programme et c'est pourquoi notre contribution a concerné le côté planification de la production déjà abordé par de courtes études [6] .

L'aspect "coordination logique" a été traité en parallèle au L.A.A.S. par M. Ghallab [7] .

En résumé les objectifs essentiels du programme de recherche restent liés aux trois fonctions de la gestion industrielle telles que les définit J.L. Riggs [8] .

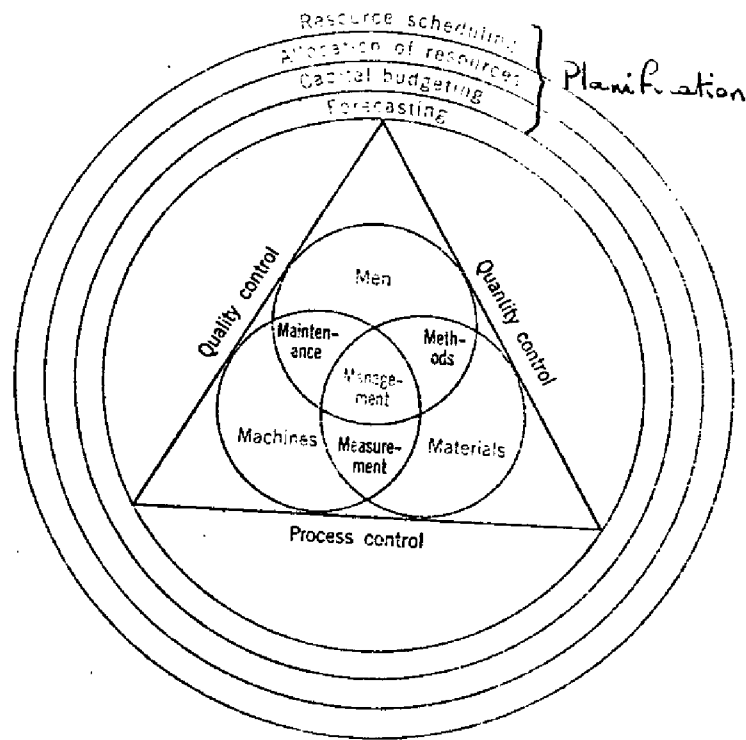


Figure 1-4 - Schéma des fonctions de la gestion industrielle d'après J.L. Riggs.

Sur ce schéma apparaissent les trois fonctions : planification, analyse et contrôle, ainsi que leurs imbrications réciproques.

A l'extérieur la planification est décomposée en :

- . Prévisions
- . Calcul budgétaire
- . Allocation de ressources
- . Ordonnancement

Le contrôle est représenté comme un triangle à trois côtés :

- . Contrôle du processus
- . Contrôle qualité
- . Contrôle de quantité.

Personnel, machines et matériaux s'opposent à l'intérieur de ce triangle et l'analyse des couplages internes est schématisée, rappelant les modules "analyse structurale" de la figure 1-3 qui couplent les différents " tiroirs " de la banque des données du système de gestion.

Le but de cette étude n'est pas d'épuiser tel ou tel aspect de la gestion ainsi découpée en toutes ses fonctions, mais de montrer comment, à un niveau donné de la hiérarchie des décisions, s'organisent les trois fonctions d'analyse, de contrôle et de planification pour engendrer un modèle de la production particulier qui aidera aux prises de décisions dont ce niveau est responsable.

Le niveau que nous avons choisi est le niveau de planification moyen terme que nous allons définir ci-après dans son propre contexte, c'est-à-dire la planification de la fabrication et des besoins matière.

## I-5 - LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION

### I-5-1 - Introduction

Planifier la production, c'est prendre en compte le plus possible d'informations prévisionnelles sur l'évolution de la fabrication dans l'avenir pour aboutir aux meilleures décisions. Les variations du marché, les retards importants affectant toute action sur le système de production, le caractère dynamique donc de l'entreprise, rendent nécessaire cette fonction de contrôle devant conduire au pilotage de la fabrication.

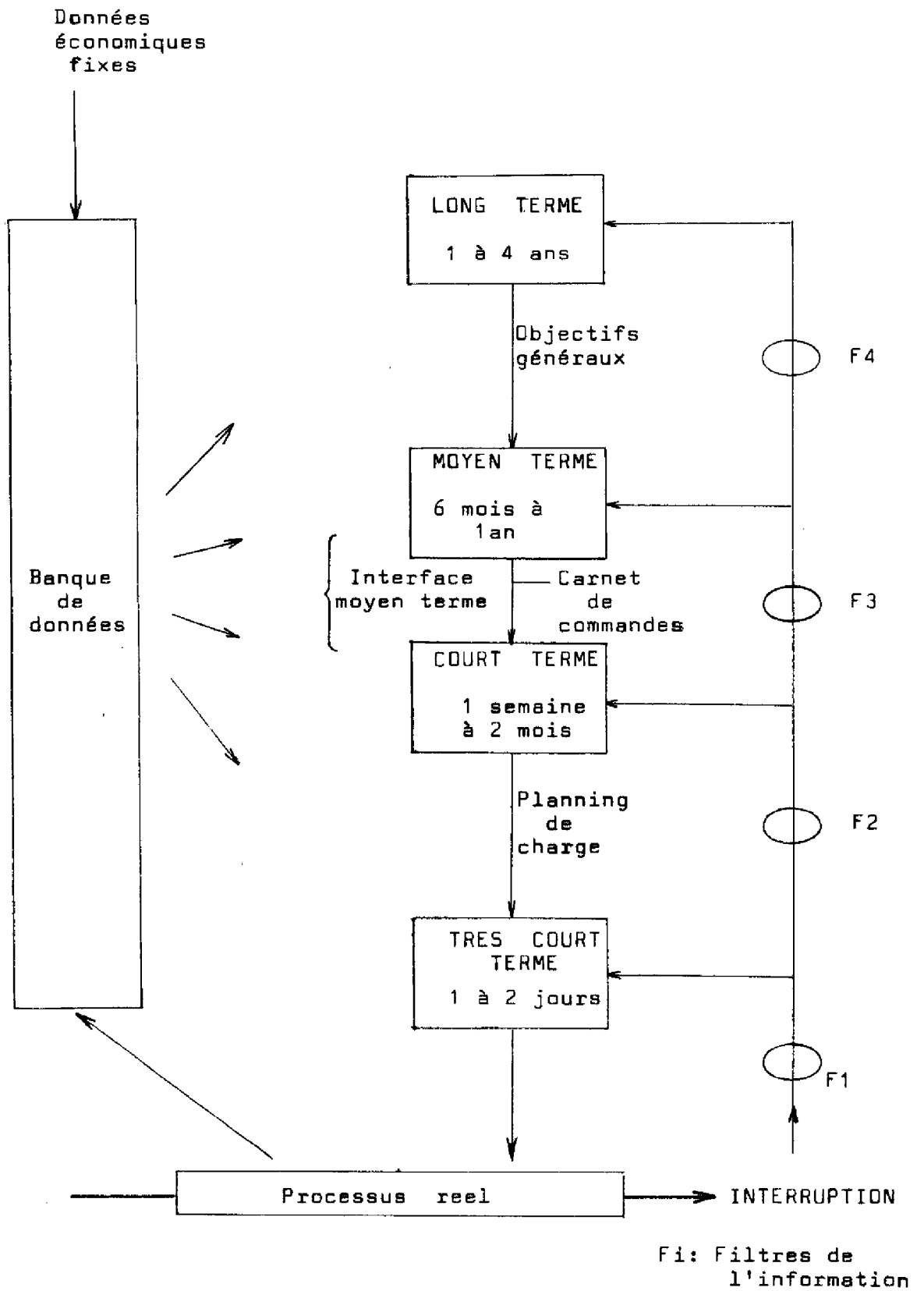


fig.1-5 : Hiérarchisation de la planification et filtrage de l'information.

"Le problème à résoudre est d'associer les demandes représentées par les ordres clients avec la capacité des ressources disponibles. Ce problème implique tant de facteurs différents qu'il est impossible d'atteindre mathématiquement la solution optimale. On doit le traiter par étapes dépendant de l'horizon de temps .... " Ch. Nissen [ 9 ]

Ceux qui, comme Nissen ont étudié ces problèmes de planification ont distingué généralement trois niveaux différents : le long terme, le moyen terme et le court terme. Naturellement, plus l'horizon est long et plus l'information utilisée sera agrégée et globale, donc plus le degré d'automatisation sera faible. Certains auteurs, désireux de séparer l'interface que constitue le moyen terme, intermédiaire entre long et court terme, rajoutent un quatrième niveau, appelant le niveau inférieur "très court terme" (figure 1-5). Nous allons étudier plus en détail les différentes caractéristiques de ces trois niveaux pour dégager les éléments qui seront le plus du domaine de l'automatisation et nous donnerons la structure globale des trois niveaux ainsi que les flux d'informations les liant entre eux.

#### 1-5-2 - Le long terme (L T)

Au niveau supérieur de la hiérarchie, la gestion long terme a par sa position privilégiée auprès de la direction et en contact direct avec le service commercial, un rôle dominant sur toutes les décisions prises aux niveaux dits inférieurs. Le L T s'intéresse à un avenir allant de 1 an à 4 ans suivant l'entreprise. Il correspond au module "élaboration de la politique globale de l'entreprise" défini dans le schéma général d'automatisation intégrée. Cette politique prend les aspects suivants :

- Contacts avec le milieu économique extérieur → détermination de carnet de commande, plan d'approvisionnement
- Politique budgétaire annuelle → précalcul des prix et des coûts de fabrication
- Politique de fabrication → précalcul des gammes
- Orientations générales de la production → nouveaux investissements, nouvelles techniques, etc...

Pour pouvoir prendre en compte le plus de paramètres possibles, le LT utilise une information très agrégée. Le flux d'informations inter-niveaux est décrit en détail sur le schéma 1-5.

Cette information doit lui permettre d'organiser des structures d'urgence répondant à l'environnement économique avec lequel il dialogue. Sa fonction est donc essentiellement une fonction d'organisation.

### 1-5-3 - La gestion moyen terme (MT)

Ce niveau de planification par sa situation intermédiaire entre les deux niveaux extrêmes a l'aspect d'une double interface.

D'une part le dialogue avec le niveau supérieur essentiellement basé sur une commande de l'adaptation de l'offre à la demande. Sur un horizon prévisionnel de un mois à six mois suivant les fabrications, la planification a les moyens de répondre aux propositions du LT par une adaptation dynamique de l'utilisation des ressources disponibles pendant cette période, main d'oeuvre, allocations de ressource, urgences d'approvisionnement. En cas d'impossibilité de commander le système devant une demande trop exigeante, il peut alerter le niveau supérieur de cette non commandabilité. Cette adaptation de l'offre à la demande doit être transposée dans le dialogue avec le niveau inférieur par l'intermédiaire d'un modèle dit modèle moyen terme, modèle dans lequel s'agrège un certain nombre d'informations nécessaires à la planification MT. Muni du carnet de commandes estimé sur l'horizon de planification, connaissant l'état de l'atelier, le modèle MT va construire un plan de fabrication couplé avec un plan d'approvisionnement en optimisant une certaine politique propre à l'atelier géré, dite politique de gestion MT. Cette phase du dialogue avec le niveau inférieur est qualifiable d'optimisation statique (figure 1-6).

Cette politique MT doit permettre de résorber les perturbations de fabrication de type courant afin que le décideur très court terme ne l'alerte que pour des incidents majeurs. Son but essentiel est donc la régularité du fonctionnement de l'atelier.



Fonctions de commande

Traitement de l'information

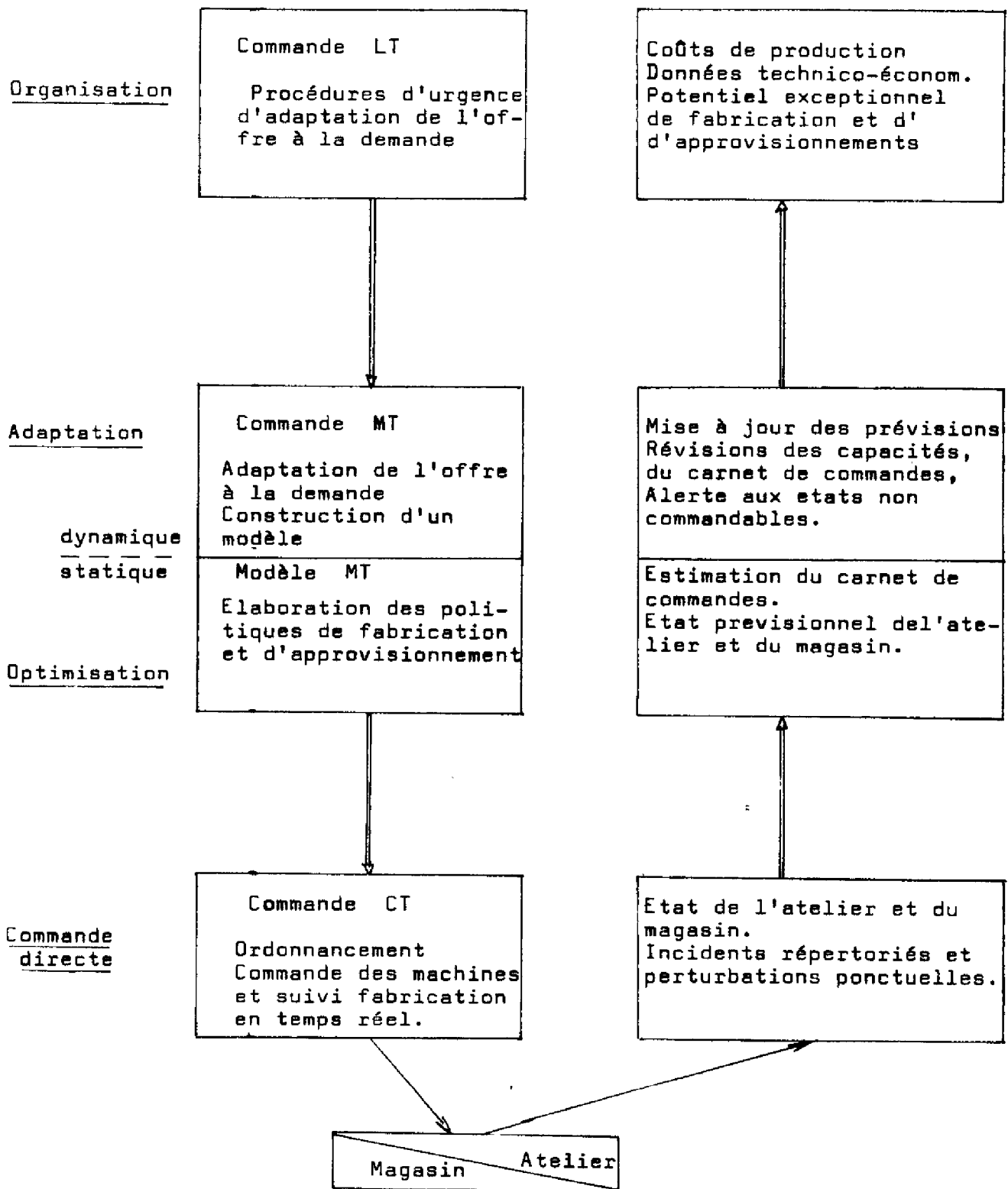


fig.1-6: Structure de commande hiérarchisée et flux d'informations.

d'après R. Soenen  
[10]

On doit toujours garder à l'esprit l'objectif de notre étude : l'implantation future dans un système de gestion de production réel d'un contrôle automatisé de la planification. Cette implantation ne peut être réalisée que progressivement et la construction du modèle d'optimisation moyen terme nous a paru indispensable en premier lieu.

Résumons les caractéristiques de ce modèle :

Objectifs : . Fournir à l'atelier un plan de fabrication réalisable sur un horizon moyen terme fixé au préalable ainsi qu'un plan d'approvisionnement cohérent, tels que :

- le carnet de commandes établi par le niveau supérieur est satisfait en quantités et délais
- les coûts de fabrication sont minimisés de manière globale

. Assurer un fonctionnement régulier à l'ensemble de la fabrication au moyen d'une politique de gestion à définir en fonction de la structure de l'atelier, du type de fabrication et des contraintes socio-économiques à satisfaire.

#### 1-5-4 - La gestion court terme (CT)

Placée au niveau inférieur du système hiérarchisé des décisions de fabrication, la gestion CT travaille sur des horizons très courts puisqu'elle doit surveiller la fabrication et l'utilisation des approvisionnements matière en temps réel. Elle dispose d'un plan optimal de fabrication et d'approvisionnement sur une période de deux jours à une semaine. Ce plan a été déterminé à partir d'un modèle moyen terme intégrant des données agrégées, incomplètes mais intégrant une politique de gestion calculée sur un horizon prévisionnel de 1 mois à 6 mois. Cette politique MT assure une charge régulière de l'atelier pour satisfaire un carnet de commandes estimé sur l'horizon et cela en minimisant les coûts de production.

A partir de ce plan, le responsable du court terme en étroite collaboration avec les chefs de fabrication construit un ordonnancement des tâches élémentaires effectuées chaque jour dans l'atelier. Le nombre de produits différents circulant dans l'atelier étant généralement grand, les informations qu'il doit rassembler sont volumineuses et de nature statistique (les données du fichier gammes étant insuffisantes). L'étude de ce problème très complexe de l'affectation des tâches aux moyens disponibles a fait l'objet de nombreux travaux. Les plus connues et les plus efficaces restent encore les méthodes graphiques : la méthode de Gantt, la plus rudimentaire, les méthodes dérivées des méthodes "à chemin critique" surtout (PERT, CPM) qui utilisent dates au plus tôt et au plus tard de chaque opération sous contraintes de capacités. Il manque à ces méthodes la souplesse qui les rendrait plus dynamiques dans l'environnement réel de l'atelier. Si le décideur peut agir sur l'évolution d'une solution optimisée statiquement comme au niveau MT, au niveau CT la meilleure tactique est la recherche non pas d'une solution optimale mais d'un sous-ensemble de solutions admissibles dont on connaît les caractéristiques laissant ainsi au fabricant un choix devant plusieurs stratégies. [17]

## CHAPITRE II

---

ÉLABORATION D'UN MODELE DE PLANIFICATION  
MOYEN TERME



## 2-1 - PRESENTATION DU PROBLEME

Nous avons tenté dans le premier chapitre de définir le cadre d'une étude. Bien que réduit à un domaine très restreint du programme "Automatisation Intégrée", le problème posé est très complexe. Notre objectif est la modélisation d'un système de production en vue d'apporter une aide à la décision informatisée efficace au planificateur moyen terme.

Le cadre "moyen terme" a donc été tracé au premier chapitre ; il se situe à un niveau assez proche des transformations journalières subies par les produits mais toutefois suffisamment distant d'elles pour pouvoir superviser l'ensemble de cette fabrication afin de la planifier sur un avenir prévisionnel ne dépassant pas quatre mois.

L'importance des modèles de gestion de systèmes complexes a été soulignée par J.L. Riggs : "Un modèle est une réplique ou une abstraction des caractéristiques essentielles d'un processus. Il montre les relations de cause à effet entre objectifs et contraintes. Les problèmes qui défient toute solution directe par leur taille, leur complexité ou leurs structures, sont souvent accessibles à travers des simulations sur un modèle  
.... " [8]

L'existence d'un modèle ne constitue cependant jamais une solution à un problème. C'est seulement un outil d'analyse, d'approche du système, permettant d'approfondir sa connaissance des différents paramètres et d'appréhender les problèmes réels avec le maximum d'efficacité. Là intervient l'intérêt du support industriel, sans lui le modèle construit est un cerveau sans corps.

Notre partenaire industriel, la Radiotechnique Compelec d'Evreux, nous a proposé l'étude d'un atelier qui semblait par sa structure et ses perspectives d'avenir constituer un champ d'action particulièrement favorable à la réflexion, la recherche et l'application. Notre désir permanent de conserver à l'étude toute sa généralité (une seconde application a été

tentée en un deuxième atelier, nous le verrons dans un chapitre suivant) n'a pu empêcher de limiter les applications possibles à un type de fabrication donné que nous allons définir ci-après avant d'explorer les caractéristiques globales du modèle mis au point.

## 2-2 - DELIMITATION DU CHAMP D'ACTION ET HYPOTHESES GENERALES RETENUES

### 2-2-1 - Généralités

Dans son ouvrage sur "la gestion intégrée de la production" M. Crolais [1] a étudié en détail les différents types de fabrication que l'on rencontre dans l'industrie et il a insisté sur l'influence importante de cette donnée de base sur le choix du modèle informatique de planification MT qu'il nomme "ordinancement". Nous résumons ci-dessous les différents caractères à analyser dans la définition d'un type de fabrication et nous verrons que bon nombre des hypothèses du modèle en découlent.

#### a) Fabrications répétitives et de série

Il s'agit là de production de masse concernant des produits catalogués au moment de l'établissement des gammes techniques.

#### b) Fabrications répétitives et à variantes

Les programmes de fabrication sont réguliers et l'agrégation des gammes-types s'obtient rapidement. Les niveaux inférieurs du système de planification sont toutefois plus complexes que pour le type a).

c) Fabrications non répétitives, unitaires et sur devis

Ces fabrications sont difficiles à maîtriser à tous les niveaux car elles sont généralement techniquement peu stabilisées et commercialement très fluctuantes. Avant de rechercher le rendement optimum de fabrication, le gestionnaire doit assurer une meilleure souplesse au système et minimiser le temps de réponse aux perturbations courantes.

d) Autres aspects

- d 1 : prototypes, maquettes
- d 2 : dépannages et sous-traitance
- d 3 : fabrications hétérogènes
- d 4 : fabrications techniquement évolutives
- d 5 : fabrications saisonnières

Nous allons nous inspirer de cet essai de classification pour cadrer le type de fabrication que nous avons étudié.

2-2-2 - Hypothèses retenues

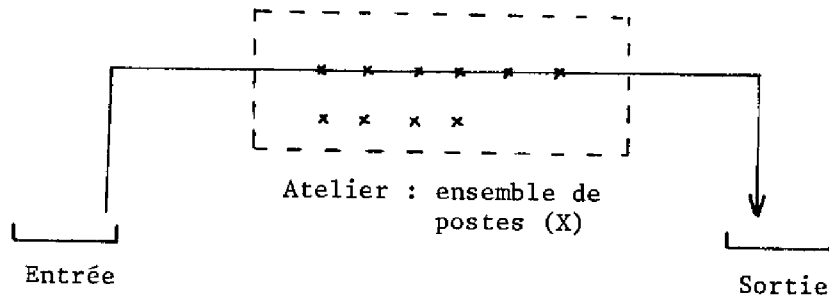
L'atelier que nous avons étudié en premier lieu est sans aucun doute du type c) défini par Crolais. En effet les commandes sont très variées, propres à un client particulier donc de durée de vie généralement courte et de faibles dimensions.

On doit ajouter la caractéristique d 4 puisqu'elle n'implique pas de conséquences directes sur les équations du modèle, elle est d'une grande importance et montre un caractère de plus en plus fréquent de l'industrie moderne: l'évolution de la technique et les énormes contraintes de marché, obligent les dirigeants à un effort permanent d'adaptation non seulement de la fabrication mais aussi de leur propre manière de réagir, donc un effort d'assouplissement du système de gestion.



En rapport avec le type d 3, nous devons rajouter que nous aurons à traiter une fabrication homogène, c'est-à-dire que les différents produits qui circulent dans l'atelier sont de même nature. L'hypothèse contraire nuit à la linéarité des temps opératoires, linéarité que nous aurons à exploiter tout au long de la modélisation.

Cette hypothèse de linéarité se retrouve d'ailleurs dans les hypothèses sur la structure de l'atelier. L'atelier se caractérise par une entrée et une sortie fixes entre lesquels chaque produit est affecté à une gamme et une seule.



Dans la gamme chaque opération s'effectue sur un poste et un seul, critique ou non, et la séquence de ces opérations est fixe.

### 2-2-3 - L'horizon de travail

L'horizon temporel de travail de l'outil de planification est un paramètre essentiel dont le choix dépend en grande partie des hypothèses posées ci-dessus.

Le niveau moyen terme travaille à la fois sur le carnet des commandes dites fermes, c'est-à-dire déjà engagées par le niveau commercial, et sur les prévisions de commandes futures, prévisions établies par le niveau long terme et soumises à son accord.

Dans une fabrication de type non répétitive et fluctuante, il doit de plus être capable de prendre en compte toute nouvelle commande considérée comme une perturbation majeure.

Ainsi la taille de l'horizon doit être supérieure au temps moyen de transit d'une commande type (unité de lancement ou "lot") dans l'atelier. On assure par là à toute commande urgente d'être planifiée de son lancement dans le stock d'entrée jusqu'à son arrivée dans le stock de sortie.

Le souci de réduire la masse des informations à prendre en compte impose de ne pas choisir un horizon très long. Le choix définitif de ce paramètre dépend bien sûr de l'atelier étudié et il doit être aisément modifiable.

## 2-3 - EQUATIONS GENERALES DU MODELE

### 2-3-1 - Discrétisation spatiale et temporelle

L'idée de base de la construction du modèle est la décomposition horizontale de l'atelier en sous-ateliers indépendants reliés entre eux par des stocks, véritables noeuds de la fabrication et facteurs de coordination de la gestion MT.

Partant de l'hypothèse de linéarité de l'atelier ("chaîne" de fabrication) nous remplaçons le suivi des produits opération après opération par un contrôle de stocks et une commande des lancements en fabrication dans les sous-ateliers (figure 2-1).

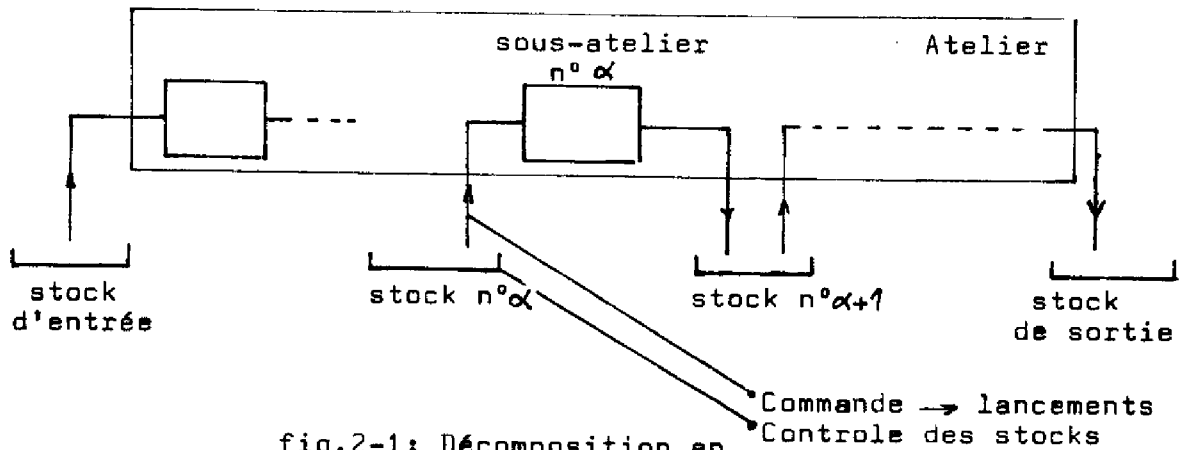


fig.2-1: Décomposition en sous-ateliers

•  $\alpha$  représente un stock et le sous-atelier qui est alimenté par ce stock

Le planificateur MT ne s'intéresse pas au détail des opérations subies par les produits à l'intérieur d'un sous-atelier . Seules des informations agrégées traduisent la disponibilité des postes constituant le sous-atelier et les rendements de fabrication affectant le transit des produits du stock  $\alpha$  au stock  $\alpha + 1$ .

Cette discrétisation spatiale induit une discrétisation temporelle de l'horizon de planification. En effet, pour effectuer un contrôle efficace des stocks  $\alpha$  , aucun ordre de lancement ne doit être pris entre le moment où des produits ont été lancés ou stockés et le moment où ils atteignent le stock  $\alpha + 1$ . Ce n'est pas le temps de transit d'un lot dans un sous-atelier qui détermine un intervalle de temps séparant les lancements, mais inversement le choix d'une période d'échantillonnage fixe représentant cet intervalle va fixer le temps de passage d'un lot d'un stock  $\alpha$  à un stock  $\alpha + 1$ . Cette hypothèse de discrétisation des variables lancements en fonction du temps impose donc une contrainte très importante pour la décomposition en sous-ateliers :

. Les temps de transit d'un produit à travers chacun des sous-ateliers sont les mêmes.

Donc les sous-ateliers sont de taille équivalente.

L'écoulement d'un produit peut se représenter sur un diagramme, dit diagramme espace-temps de la production

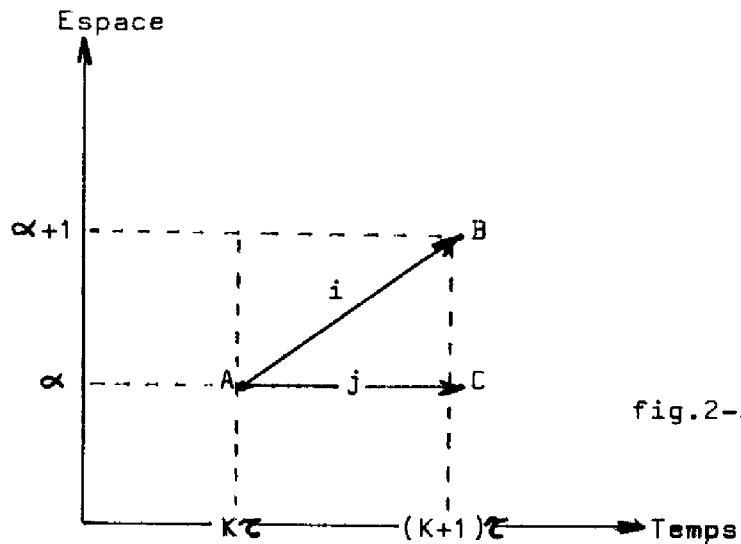


fig.2-2

Dans toutes les équations qui suivront, la période d'échantillonnage  $\tau$  est prise égale à 1.

A représente le stock  $\alpha$  à la date  $K\tau$ . Deux possibilités se présentent et seulement deux :

- Soit, la décision de lancer le produit  $i$  dans le sous-atelier  $\alpha$  est prise par le planificateur. Dans ce cas le produit  $i$  sera obligatoirement comptabilisé dans le stock  $\alpha + 1$  à la date  $(K + 1)\tau$  c'est-à-dire en B.

- Soit, le produit  $j$  n'est pas lancé en fabrication dans le sous-atelier  $\alpha$  et se retrouve dans le stock  $\alpha$  à la date  $(K + 1)\tau$ , c'est-à-dire en C (figure 2-2).

Il résulte de ces hypothèses que le temps de transit minimum d'un produit à travers un atelier décomposé en  $N\alpha$  sous-ateliers est de

$$T_{\min} = N\alpha \cdot \tau$$

De plus pour revenir à l'horizon de la planification MT, nous avons vu qu'il était borné inférieurement par le temps moyen de fabrication d'un lot. On a donc, si T est l'horizon,

$$T > N\alpha \cdot \tau$$

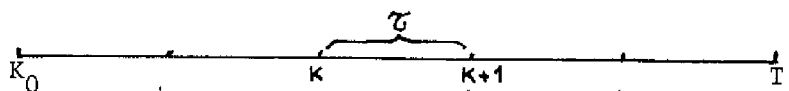
L'intérêt de cette discrétisation réside donc dans la décomposition du problème en sous-problèmes interconnectés. Le lien entre discrétisation spatiale et discrétisation temporelle est imposé par la synchronisation des décisions prises par le planificateur MT.

L'application à un cas réel ainsi que l'exposé des difficultés soulevées par cette méthode seront développés au chapitre III.

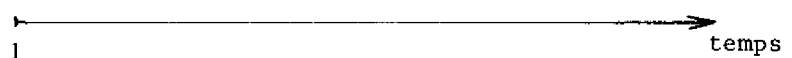
### 2-3-2 - Les variables du modèle

En plus des indices majeurs représentant le temps et l'espace K et  $\alpha$  déjà cités, nous devons maintenant introduire l'indice tout aussi fondamental représentant la gamme liée à un produit circulant dans l'atelier, soit i.

K  $\longrightarrow$  définit un instant de l'échelle de temps tel que  $K-1$  intervalles de durée fixe  $\tau$  le séparent de l'instant  $K_0 = 1$



Présent



T représente l'horizon. Soit  $NK$  le nombre de périodes  
 $T = (NK + 1) \cdot \tau$

$\alpha \longrightarrow$  définit le stock compris entre le sous-atelier ( $\alpha - 1$ ) et le sous-atelier  $\alpha$ .

Tous les produits appartenant au stock  $\alpha$  sont destinés à être lancés en fabrication dans le sous-atelier  $\alpha$ .

Le stock d'entrée est noté  $\alpha_0 = 1$

Le stock de sortie est noté  $\alpha_S = N\alpha + 1$



$i \longrightarrow$  définit une gamme, c'est-à-dire une succession d'opérations devant être effectuées entre  $\alpha_0$  et  $\alpha_S$ . Cette gamme  $i$  peut englober un certain nombre de gammes réelles ne différant entre elles que par des détails opératoires non pris en compte par le moyen terme. Nous reviendrons plus en détail sur ce processus d'agrégation des gammes réelles dans l'application au cas réel.

Chaque pièce circulant dans l'atelier entre l'instant  $K_0$  et l'instant  $T$  peut être représentée par le triplet  $(\alpha, i, K)$ .

. La taille des commandes et le volume des stocks doivent être comptés suivant une unité commune qui sera également l'unité propre aux variables du modèle. Le choix de cette unité dépend de la fabrication étudiée.

Les variables principales du modèle sont de deux types :

i) les variables d'état, représentent la quantité, pour chaque produit, à chaque date  $K$ , devant rester dans le stock  $\alpha$  jusqu'à la date  $K + 1$ , on la note :

$$\boxed{X(\alpha, i, K)} \text{ et on a } X(\alpha, i, K) \geq 0 \quad \forall \begin{matrix} \alpha \\ i \\ K \end{matrix}$$

(I)

ii) les variables de commande, représentent les décisions de lancements prises par le modèle MT à chaque instant  $K$ , dans chaque stock  $\alpha$ ,

liées à chaque produit  $i$ .

On la note  $Y(\alpha, i, K)$  et on a  $(I) Y(\alpha, i, K) \geq 0 \quad \forall \begin{matrix} i \\ K \end{matrix}^{\alpha}$

3 indices principaux créent la taille combinatoire du problème. Nous n'avons pas parlé de l'indice représentant les postes propres à chaque sous-atelier. Nous l'introduirons en même temps que les contraintes de capacité liées aux variables.

### 2-3-3 - Les contraintes

Les variables  $X$  et  $Y$  sont liées naturellement par l'écoulement des produits dans l'atelier. Cet écoulement est soumis à deux types de contraintes ; des contraintes conservatives exprimant le suivi des pièces d'un stock  $\alpha$  à un stock  $\alpha + 1$  et des contraintes limitatives exprimant les disponibilités allouées à chaque période  $K$  à la fabrication.

#### 2-3-3-1 - Equations de circulation

Pour exprimer la conservation des produits du stock  $\alpha$  au stock  $\alpha + 1$ , nous devons introduire un paramètre très important: le rendement de fabrication lié aux déchets résultant de l'usinage de chaque produit  $i$  dans le sous-atelier  $\alpha$ . On le note  $\rho(\alpha, i)$  avec  $0 \leq \rho(\alpha, i) \leq 1$ .

Ce paramètre a un caractère aléatoire et on le trouve généralement dans les fichiers gammes de l'usine sous forme de précalcul annuel.

REMARQUE : Le côté statistique du paramètre  $\rho(\alpha, i)$  lié à la qualité des produits fabriqués par le sous-atelier  $\alpha$ , en fait le principal élément de couplage du module planification avec le module "contrôle qualité" qui constitue comme nous l'avons vu un des objectifs essentiels du programme "automatisation intégrée".

Par conséquent, si  $Y(\alpha, i, K)$  représente la quantité de produit  $i$  usiné dans le sous-atelier  $\alpha$  pendant la même période, alors le stock  $\alpha + 1$  va recevoir une quantité  $\rho(\alpha, i) \cdot Y(\alpha, i, K)$  à la date  $K + 1$ .

L'équation d'état du stock  $\alpha$  s'écrit donc :

$$(II) \quad X(\alpha, i, K) = X(\alpha, i, K-1) + \rho(\alpha-1, i) Y(\alpha-1, i, K-1) - Y(\alpha, i, K)$$

. Que devient cette équation à l'instant initial ? Le terme  $X(\alpha, i, K-1) + Y(\alpha-1, i, K-1)$  qui représente l'avoir du stock  $\alpha$  est noté alors  $X_0(\alpha, i)$  et c'est, si l'on veut, l'état initial du stock  $\alpha$  par rapport au produit  $i$  ; on a alors :

$$\begin{cases} X(\alpha, i, 1) = X_0(\alpha, i) - Y(\alpha, i, 1) \\ X_0(\alpha, i) \geq 0 \end{cases} \quad (III)$$

On aura ensuite normalement,

$$X(\alpha, i, 2) = X(\alpha, i, 1) + \rho(\alpha-1, i) \cdot Y(\alpha-1, i, 1) - Y(\alpha, i, 2) \text{ etc...}$$

L'équation (III) peut s'écrire également :

$$0 \leq Y(\alpha, i, 1) \leq X_0(\alpha, i) \quad (IV)$$

équations plus explicites sous cette forme inégalité.

De même pour l'équation courante (V) qui devient :

$$(V) \quad 0 \leq Y(\alpha, i, K) \leq X_0(\alpha, i) + \rho(\alpha-1, i) \sum_{k=1}^{K-1} Y(\alpha-1, i, k) - \sum_{k=1}^{K-1} Y(\alpha, i, k)$$

$$\begin{cases} \alpha > \alpha_0 \\ K > 1 \end{cases}$$

. Qu'advient-il pour les stocks extrêmes de la chaîne de fabrication ?

- pour le stock d'entrée, on admet qu'il n'y a pas de remplissage au cours de la période MT. C'est-à-dire que toutes les commandes prises en compte par ce niveau de planification existent dès la date  $K_0$  dans le stock d'entrée. Considérons un produit  $i$  : supposons que le total des



pièces commandées pour ce produit pendant la période  $MT$  soit  $XC(i)$ .  
 $XO(\alpha, i)$  avec  $\alpha > \alpha_0$  représentent les quantités déjà lancées auparavant.  
 Calculons  $XO(\alpha_0, i)$ :

$XO(\alpha, i)$  compte-tenu des rendements des sous-ateliers  $\alpha, \alpha+1, \dots, \alpha_S-1$   
 représente une livraison de :  $XO(\alpha, i) \prod_{a=\alpha}^{\alpha_S-1} \rho(a, i)$

$$XC(i) = \sum_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha_S-1} (XO(\alpha, i) \prod_{a=\alpha}^{\alpha_S-1} \rho(a, i)) + XO(\alpha_S, i)$$

d'où on tire :

$$(VI) \quad XO(\alpha_0, i) = \frac{XC(i) - \sum_{\alpha=\alpha_0+1}^{\alpha_S-1} (XO(\alpha, i) \prod_{a=\alpha}^{\alpha_S-1} \rho(a, i)) - XO(\alpha_S, i)}{\prod_{a=\alpha_0}^{\alpha_S-1} \rho(a, i)}$$

REMARQUE :  $XO \text{ réel} = XO + \delta_{\rho} \delta_0$ , supplément dû à l'écart type sur  $\rho$ .  
 $XO(\alpha_0, i)$  est donc une donnée du système et cela permet d'écrire  
 la contrainte de circulation liée au premier stock :

$$(VII) \quad \sum_{k=1}^T Y(\alpha_0, i, k) \leq XO(\alpha_0, i)$$

- pour le stock de sortie : A l'instant  $K$ , la quantité de produit  $i$  déjà réalisée et prête à livrer vaut :

$$(VIII) \quad X(\alpha_S, i, K) = XO(\alpha_S, i) + \rho(\alpha_S-1, i) \sum_{k=1}^{K-1} Y(\alpha_S-1, i, k)$$

La commande prévue pour une date  $D$  (à ne pas confondre avec  $XC(I)$ )  
 quantité totale à fabriquer sur  $[K_0, T]$  est  $XC(i, D)$ . Créons  
 une variable nouvelle =  $\epsilon_S(i, D)$  écart entre  $X(\alpha_S, i, D)$  et  $XC(i, D)$

$$(IX) \quad X(\alpha_S, i, D) = XC(i, D) + \epsilon_S(i, D)$$

### 2-3-3-2 - Occupation des moyens

Nous devons maintenant modéliser la disponibilité de chaque

sous-atelier, donc introduire paramètre et variables représentant les postes de travail intérieurs à ces sous-atelier. Notre objectif principal reste la simplification du modèle informatique. Il nous faut faire en sorte de prendre en compte un maximum d'informations agrégées, donc l'existence de tous les postes utilisés par toutes les gammes ne peut être conservée à l'intérieur du modèle.

Parmi tous les postes desservis par un stock  $\alpha$ , certains ont une importance plus grande que les autres. Certains même, règlent à eux-seuls le débit d'un sous atelier entier. Nous nous efforcerons d'exprimer la disponibilité de chaque sous-atelier par l'intermédiaire d'un sous-ensemble de postes, appelés "postes critiques". Ce sous-ensemble noté  $M = \{m_p\}$  est caractérisé par les conditions suivantes :

i) capacité des postes critiques déterminante pour le débit du sous-atelier correspondant.

ii) ce sont des postes représentant un fort coût d'exploitation, d'où la nécessité d'une charge régulée.

\* cette dernière consigne a son importance car elle introduit l'essentiel de la politique MT, c'est-à-dire, la bonne régulation des charges programmées sur les postes critiques.

Cette définition du qualificatif critique reste cependant assez floue et elle conduit à une partition assez arbitraire du parc machine. Cette partition ne doit donc pas être figée et grâce aux simulations successives du modèle, elle doit être constamment remise en question par l'analyste en accord avec les principaux responsables de l'atelier.

Ce sous-ensemble critique mis en évidence, on alloue à chaque poste  $m_p$  une capacité maximale notée  $CAP(p, K)$ , disponibilité en heures du poste  $m_p$  pendant la  $K$ ème période (ce paramètre n'est pas forcément constant dans le temps.)

Pour chaque poste  $m_\beta$ , pour chaque période K, on écrit l'équation de limitation des lancements  $Y(\alpha, i, K)$ . Pour cela, on associe à chaque couple  $(i, \beta)$  un taux de charge  $F_{i\beta}$  tel que  $\sum_i F_{i\beta} Y(\alpha, i, K)$  représente la charge totale en heures programmées pour le poste  $m_\beta$  et pour la période K. D'où la contrainte de capacité :

$$(X) \quad \sum_i F_{i\beta} Y(\alpha, i, K) \leq \text{CAP}(\beta, K)$$

(pour  $m_\beta \in$  sous-atelier  $\alpha$ )

Cette équation appelle un certain nombre de remarques :

i) le paramètre  $F_{i\beta}$  dimensionné en heures/unité correspond à ce qu'on appelle généralement dans les gammes d'usine le temps opératoire, temps proportionnel à la quantité de produits du type  $i$  transitant sur le poste  $m_\beta$ . En réalité, le temps opératoire est rarement proportionnel à cette quantité comme nous le verrons dans l'application au cas réel. Aux non linéarités liées au mode de chargement du poste  $m_\beta$  (unitaire, par batchs...) s'ajoutent les non-linéarités liées au temps de réglage de la machine qui varient selon la séquence des produits  $i$  programmée pour la période K. Ainsi par exemple, si le modèle préconise le lancement à la date K de  $Y_1(\alpha, i, K)$  de produits  $i$  et  $Y_2(\alpha, j, K)$  de produit  $j$ , la charge résultante sur  $m$  sera  $F_{i\beta} Y_1 + F_{i\beta} Y_2$

Une autre solution équivalente pour l'équation (X) aurait pu donner les lancements :

$$Y'_1(\alpha, i, K) = Y_1 + \frac{F_{j\beta} Y_2}{F_{i\beta}}$$

$$Y'_2(\alpha, j, K) = 0$$

Si on introduit un temps de réglage  $t_{ij}(\beta)$  obligatoire pour passer de la fabrication de  $i$  à celle de  $j$ , on voit que la première solution est différente de la seconde de ce temps  $t_{ij}$ .

Donc sans informations sur la séquence réelle de travail (i,j,k...) des produits programmés sur la période K (séquence qui sera déterminée à un niveau inférieur), le décideur MT par le nombre de  $(Y(\alpha, i, K))$  non nuls qu'il décide pour cette même période, induit un temps de réglage global moyen proportionnel à ce nombre de i lancés.

Toutefois, la séquence réelle de passage des produits sur le poste  $m_p$  pendant la période K ne sera décidée définitivement que par le planificateur à très court terme qui doit lui inclure de manière impérative ces temps supplémentaires non linéaires  $t_{ij}(\beta)$ .

Un problème d'équilibre entre les tâches propres à chaque décideur se pose ici et pour garder au modèle son caractère linéaire nous avons choisi de ne pas inclure ces temps de réglage de manière automatique dans le calcul optimal, mais de les intégrer à l'intérieur des paramètres  $F_{i\beta}$ .

En résumé, les paramètres  $F_{i\beta}$  utilisés par la gestion MT ont un caractère flou qui entraîne une perte d'informations sur le processus réel mais qui permet d'obtenir des équations de charge linéaires simples.

ii) l'équation (X) s'applique à un poste appartenant à un sous-atelier bien déterminé. On a en effet supposé la linéarité de la chaîne de fabrication, créant ainsi une application biunivoque  $(\alpha \leftrightarrow \beta)$ . Cette restriction n'est pas nécessaire, car écrire cette équation pour un poste appartenant à plusieurs sous-ateliers ne la modifie que légèrement:

Soit  $m_p \in \alpha$  et  $\alpha'$  (certains produits peuvent même utiliser ce poste dans ces deux sous-ateliers. C'est un cas de bouclage et on aura dans  $\alpha$  le coefficient  $F_{i\beta}$  et dans  $\alpha'$  le coefficient  $F_{i\beta'}$ ).

L'équation devient :

$$(X') \quad \sum_i F_{i\beta} Y(\alpha, i, K) + \sum_i F_{i\beta'} Y(\alpha', i, K) \leq \text{CAP}(\beta, K)$$

Avec cette optique, le sous-atelier n'est plus une unité géographiquement indépendante. Cela nuit au découplage des sous-problèmes constitués par l'ordonnement du travail décidé par le "décideur" de chaque sous-atelier.

### 2-3-3-3 - Approvisionnement extérieur

Les variables  $Y(\alpha, i, K)$  sont liées à la gestion du magasin par une application simple :

A un couple  $(i, \alpha)$  représentant une unité de produit n°  $i$  devant être usinée dans le sous-atelier  $\alpha$  correspond un vecteur  $A_{(i, \alpha)}$  dont chaque composante  $a_{i\alpha}^j$  est la quantité de  $j$ , composant du magasin, nécessitée par la fabrication de  $i$ .

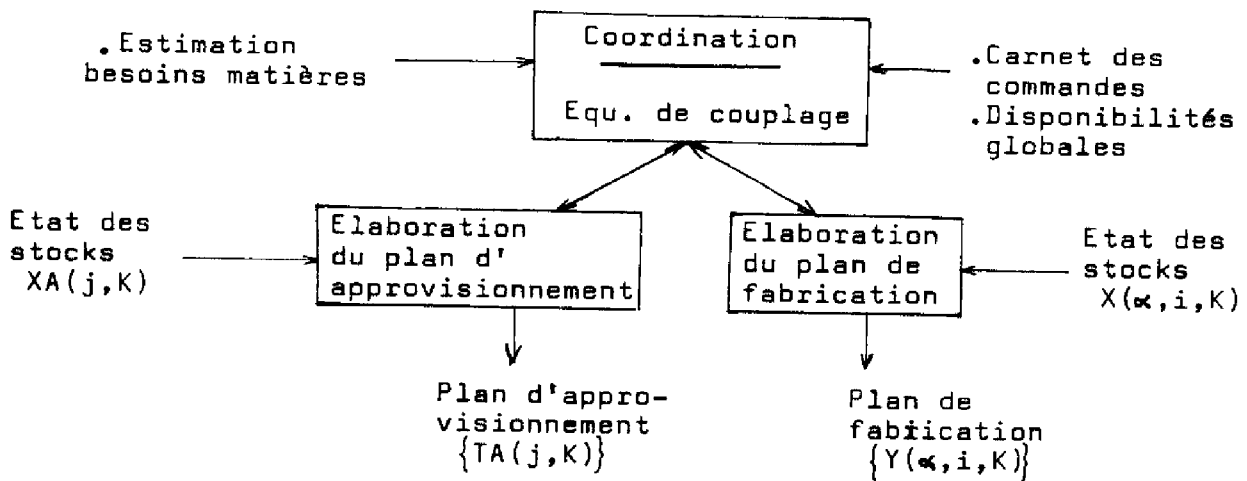
L'état du stock matière est caractérisé par les quantités  $XA(j, K)$  quantité de matière n°  $j$  restant en stock pendant la période  $K$ .

Soit  $TA(j, K)$  la quantité de matière n°  $j$  commandée par le magasin pour la date  $K$ . L'équation d'état du magasin s'écrit pour chaque produit-magasin n°  $j$  et pour chaque période  $K$  :

$$(XI) \quad XA(j, K) = XA(j, K-1) + TA(j, K) - \underbrace{\sum_{\alpha} \sum_i a_{i\alpha}^j Y(\alpha, i, K)}_{\text{couplage}}$$

La similitude de cette équation avec l'équation de circulation des produits en atelier (équ. II) montre le parallèle entre la gestion matière et la gestion de la fabrication. La difficulté reste toujours la coordination des deux plans.

D'après R. SOENEN [10], qui a étudié le "problème de commande à moyen terme d'un système de production", " la fonction de commande est qualifiée d'automatique seulement dans le cas du fonctionnement normal, c'est-à-dire lorsque le système de fabrication est capable de satisfaire les besoins commerciaux sur l'horizon restant à couvrir. On a alors recours à une procédure de coordination entre les politiques d'approvisionnement et de fabrication ...".



fig;2-3

On voit sur la fig. 2-3 comment se schématise cette coordination par rapport au modèle de planification.

Avec la gestion des stocks  $X_A(j,K)$  et de leur remplissage  $TA(j,K)$  on rejoint un problème classique de contrôle de stock (cf. à ce sujet [16] et [18]).

Considérant principalement le problème desancements en fabrication, nous considérons  $TA(j,K)$  comme un paramètre externe donc connu.

#### 2-3-4 - Les objectifs

L'évaluation du coût de fabrication s'établit généralement suivant un certain nombre de critères de caractères conflictuels que l'on peut regrouper sous trois volets principaux :

- i) la satisfaction du client, politique qui doit pousser à produire les produits commandés en quantité désirée et pour la date voulue.
  
- ii) la bonne utilisation des moyens de production qui optimise :
  - alimentation en travail des sections de production en volume global et en répartition dans le temps et l'espace ;
  - équilibre main d'oeuvre/volume de production (répartition de la main d'oeuvre, coûts d'heures supplémentaires, etc...) ;
  - coûts de manutention, coûts de réglage.
  
- iii) la politique des stocks qui concerne :
  - le niveau d'encours (coûts d'immobilisation de capital) ;
  - politique des stocks de sécurité et de roulement (coût de risques)
  - le niveau des stocks matières (coût de retard d'approvisionnement)

Reprenons ces trois volets et voyons quelles variables du modèle seront concernées et quelle sera la politique propre de notre modèle MT.

##### 2-3-4-1 - Satisfaction de la commande

L'équation (IX) définit l'écart  $\epsilon_g(i,D)$  entre la commande prévue pour une date D et la quantité de pièces fabriquées à cette date. Pour chaque gamme i, il y a un certain nombre de commandes ponctuelles  $(XC(i,D), D)$  telles que  $\sum_D XC(i,D) = XC(i)$  commande totale sur tout l'horizon.

La politique du modèle de gestion MT consistera à minimiser l'écart  $\epsilon_S(i,D)$  :

- .  $\epsilon_S < 0$  : signifie à proprement parler la non satisfaction des commandes d'indice (i,D)
- .  $\epsilon_S > 0$  : signifie que l'on a fabriqué trop de produits i. C'est au décideur de valuer le manque à gagner correspondant en fonction des autres commandes sous le même indice i et de la valeur du capital immobilisé.

2-3-4-2 - Non occupation des moyens

Notre deuxième objectif sera d'assurer une charge maximum sur chacun des postes  $m_p$  et cela à chaque instant K.

La capacité propre de chaque poste, CAP ( $\beta, K$ ) détermine à chaque période une borne supérieure du volume des lancements (équ . X).

Il est de première importance d'assurer du travail à tous les postes de travail, mais on peut le faire de différentes manières :

- généralement, les décideurs de la planification MT charge l'atelier au fur et à mesure que les commandes arrivent en construisant un courbe de charge en escalier (fig. 2-4)

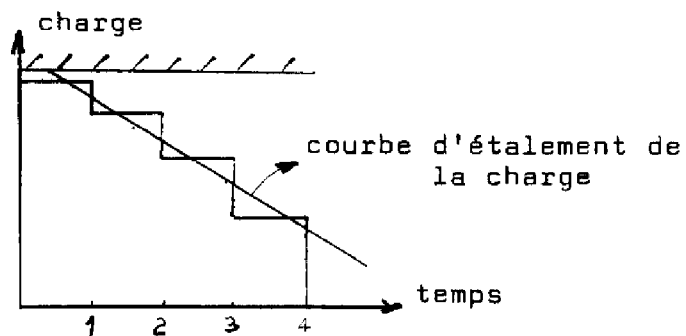


fig.2-4



Une courbe d'étalement de la charge théorique permet le report des charges prévisionnelles supplémentaires.

- Pour éviter donc au modèle de fabriquer les produits commandés au dernier moment, il nous faut donc pénaliser la variable d'écart de l'équation (X) suivant une courbe décroissante par rapport à K.

### 2-3-4-3 - Régulation des niveaux de stock

Chaque période K, le modèle suivant les objectifs 4.1 et 4.2 va avoir tendance à vider au maximum les stocks  $\alpha$  pour faire circuler les produits vers le stock final et pour charger les postes  $m_p$ .

Le but de ce troisième volet est le contrôle des niveaux de stock inter-sous-ateliers pour éviter ruptures de charge et variations brusques de cette charge dues aux perturbations quotidiennes.

Aux quantités  $X(\alpha, i, K)$ , niveau de stock en produit n° i, on peut associer des quantités en stock liées à chaque poste  $m_p$ . Soient  $X_M(\beta, K)$  ces quantités :

(XII)  $X_M(\beta, K) = \sum_i F_{i\beta} X(\alpha, i, K)$  représente la charge en heures non programmée (ou résiduelle) pour la semaine K. ( $X_M(\beta, K) \geq 0$ )

Ce sont ces quantités qui seront régulées autour de points de fonctionnement fixés au préalable, notés  $M(\beta, K)$  :

(XIII)  $X_M(\beta, K) = M(\beta, K) + \epsilon_M(\beta, K)$

La relation (XIII) exprime la variable d'écart  $\epsilon_M(\beta, K)$  qu'il faudra minimiser par un contrôle automatique.

Les quantités  $M(\beta, K)$  représentent les niveaux de stock idéaux assurant le minimum de risque au moindre coût à la marche de l'atelier

pendant la période K. Ces quantités sont sujettes naturellement à un ajustement permanent et dépendent des résultats enregistrés par le programme.

En effet, si par exemple un stock  $X_M(\beta)$  est toujours strictement positif malgré les variations réelles de la fabrication, on doit en conclure que le point de fonctionnement  $M(\beta, K)$  est trop élevé qu'il y a stockage inutile de denrées. On doit donc diminuer  $M(\beta)$ . Par contre si les ruptures de stock sont trop fréquentes et nuisent à la satisfaction des objectifs, alors on doit augmenter  $M(\beta, K)$ . Un équilibre doit donc être trouvé pour pouvoir réguler correctement  $X_M(\beta, K)$  en fonction des couts d'exploitation suivants :

.  $\mathcal{E}_M(\beta, K) > 0$  : il y a immobilisation de capital

.  $\mathcal{E}_M(\beta, K) < 0$  : il y a risque de rupture de stock

REMARQUE : En utilisant uniquement les variables de commande (équ. type V), l'équation (XIII) s'écrit :

$$(XIV) \quad \sum_i F_i \rho \left[ X_0(\alpha, i) + \sum_{k=1}^{K-1} \rho(\alpha-1, i) Y(\alpha-1, i, k) - \sum_{k=1}^K Y(\alpha, i, k) \right]$$
$$= M(\beta, K) + \mathcal{E}_M(\beta, K)$$

## 2-4 - LE MODELE INFORMATIQUE

### 2-4-1 - Présentation

Nous avons défini le cadre mathématique du modèle ainsi que les grandes lignes de la politique moyen terme qui le dirige.

Nous avons mis en place les paramètres, les données et les con-

traintes internes au système. Nous avons également défini les variables de commande  $Y(\alpha, i, K)$ . Sous quelle forme ces inconnues seront-elles fournies au décideur ? Quelle méthode allons nous choisir pour aider le décideur à trouver la meilleure politique ?

Le caractère linéaire des contraintes du modèle, la grande dimension du système (liée à la combinaison des indices  $\alpha, i, K$  et  $\beta$ ) nous ont fait pencher vers les méthodes de programmation linéaire.

Ces méthodes ont l'avantage d'accéder rapidement à une solution optimale pour des problèmes fortement contraints. Leur inconvénient principal est dans le fait qu'elles conduisent à un optimum statique. En effet généralement, une faible variation du domaine d'entrée entraîne une brusque variation de la solution optimale, celle-ci passant d'un sommet du polyèdre à un autre. Comment utiliser alors le modèle dans la réalité, c'est-à-dire dans un contexte essentiellement dynamique ? Nous justifierons le choix de cette technique d'optimisation petit à petit, au cours des réflexions qui suivront l'application à la réalité.

Nous allons tout d'abord décrire l'adaptation définitive du modèle à ce cadre "programmation linéaire" et tout d'abord décrire le choix du critère linéaire.

#### 2-4-2 Construction d'une fonction critère linéaire

Dans la fonction critère linéaire unique que nous allons construire, on peut extraire trois composantes additives qui correspondent aux trois volets de la fonction objectifs décrits précédemment. Reprenons ces trois volets :

##### 1 - Coût sur les délais

Nous avons vu qu'il peut y avoir plusieurs commandes ponctuelles concernant la même gamme  $i$ . Cela tient en partie à l'agrégation de produits-clients différents sous le même indice gamme  $i$ .

Pour chaque commande ponctuelle caractérisée par un couple  $(XC(i,D), D)$  on crée une variable d'écart  $\mathcal{E}_S(i,D)$  définie en (IX). Rappelons cette équation :

$$X(\alpha_S, i, D) = X_0(\alpha_S, i) + \rho(\alpha_S - 1, i) \sum_{k=1}^{K-1} Y(\alpha_S - 1, i, k) = XC(i, D) + \mathcal{E}_S(i, D)$$

Le coût sur  $\mathcal{E}_S$  n'est pas de même origine suivant son signe, d'où l'aspect du coût  $C_1$ , appelé coût sur les délais :

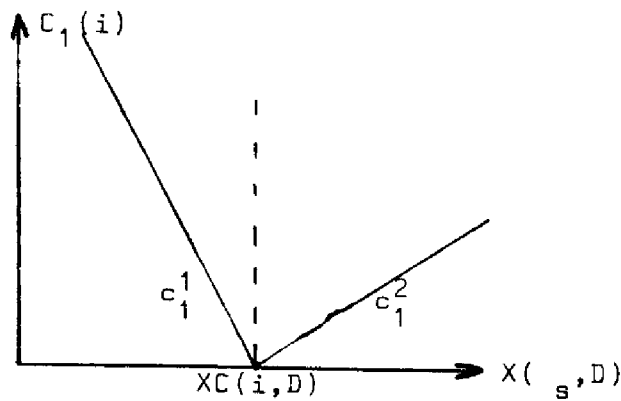


fig.2-5

$$(XV) C_1(i_D) = c_1^1 \mathcal{E}_S^1(i, D) + c_1^2 \mathcal{E}_S^2(i, D)$$

Minimiser  $C_1(i_D)$

On peut alors écrire :

$$\cdot \mathcal{E}_S > 0 \text{ (trop plein du stock de sortie)} \Rightarrow \mathcal{E}_S^2 = \mathcal{E}_S$$

Le coût est proportionnel  
à  $c_1^2$

$$\cdot \mathcal{E}_S < 0 \text{ (non satisfaction de la commande)} \Rightarrow \mathcal{E}_S^1 = |\mathcal{E}_S|$$

Le coût est proportionnel  
à  $c_1^1$

On écrit :

$$\mathcal{E}_S(i, D) = -\mathcal{E}_S^1(i, D) + \mathcal{E}_S^2(i, D)$$

$$X(\alpha_s, i, D) = XC(i, D) + \mathcal{E}_S^2(i, D) - \mathcal{E}_S^1(i, D)$$

Le produit  $\mathcal{E}_S^1 \cdot \mathcal{E}_S^2$  est toujours nul et la justification de la linéarisation de (XV) est donnée en annexe n° I.

$$\text{Le coût global s'écrit } C_1 = \sum_{i, D} C_1(i, D)$$

### 2 - Coût sur la saturation des moyens

La charge de chaque moyen  $m_\beta$  est assurée à chaque période par l'équation (X). la variable d'écart de cette inéquation traduit le temps où  $m_\beta$  est restée inoccupée pendant  $[K]$ .

Le modèle devra minimiser ce temps, donc :

$$(XVI) \quad \min_{\beta, K} \sum C_2(\beta, K) \left[ CAP(\beta, K) - \sum_i F_{i\beta} Y(\alpha, i, K) \right] = C_2$$

$C_2(\beta, K)$  représente un coefficient de coût lié à  $(\beta, K)$

### 3 - Coût sur les niveaux de stock

Le coût sur les niveaux de stock s'applique à la variable d'écart  $\mathcal{E}_M$  liée à l'équation (XIII) que nous rappelons :

$$XM(\beta, K) = M(\beta, K) + \mathcal{E}_M(\beta, K)$$

De même que pour les niveaux de stock de sortie (coût sur les délais) le coût change de signification suivant le signe de  $\mathcal{E}_M$ .

On écrit alors de la même manière :

$$\mathcal{E}_M(\beta, K) = \mathcal{E}_M^2(\beta, K) - \mathcal{E}_M^1(\beta, K)$$

avec si  $\varepsilon_M > 0 \Rightarrow \varepsilon_M = \varepsilon_M^2$   
 Coût  $C_3^2$  d'immobilisation de capital

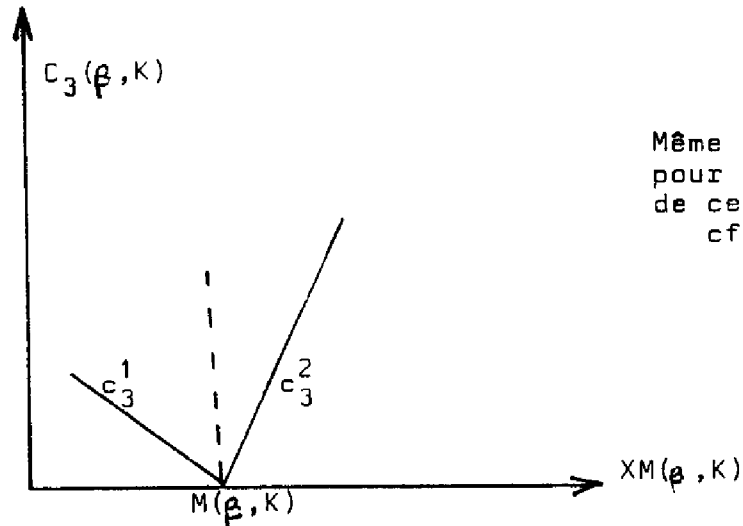
$\varepsilon_M < 0 \quad |\varepsilon_M| = \varepsilon_M^1$   
 Coût  $C_3^1$  de risque de rupture

l'équation (XVIII) devient dans la matrice linéaire :

$$(XVII) \quad XM(\beta, K) = M(\beta, K) + \varepsilon_M^2(\beta, K) - \varepsilon_M^1(\beta, K)$$

On doit minimiser  $\left[ C_3^1 \varepsilon_M^1(\beta, K) + C_3^2 \varepsilon_M^2(\beta, K) \right] = C_3$

Fig. 2-6



Même justification  
 pour la linéarisation  
 de ces coûts:  
 cf. Annexe n° I

En résumé la fonction critère linéaire unique du modèle peut s'écrire comme la somme  $C_1 + C_2 + C_3$  à minimiser, soit :

$$\min C = \sum_{i,D} \left[ C_1^1 \underline{\varepsilon}_S^1(i,D) + C_1^2 \underline{\varepsilon}_S^2(i,D) \right] + \sum_{\beta,K} C_2(\beta, K) \left[ CAP(\beta, K) - \right. \\ \left. \underline{\sum}_i F_i \beta_Y(d, i, k) \right] + \sum_{\beta,K} \left[ C_3^1 \underline{\varepsilon}_M^1(\beta, K) + C_3^2 \underline{\varepsilon}_M^2(\beta, K) \right]$$

(les variables du modèles sont soulignées)

2-4-3 - Construction de la matrice linéaire

La construction de la matrice des contraintes doit suivre l'objectif double suivant :

- réduire la taille globale autant que possible en éliminant les équations redondantes et les contraintes inactives
- respecter des consignes de symétrie et de présentation structurée qui faciliteront la génération automatique de la matrice à partir des données de l'atelier et qui permettront la mise en place de simplexes particuliers utilisant une structure linéaire décomposable.

1 - Les blocs produits

Les équations de circulation dépendent des trois indices  $i, \alpha$  et  $K$ . Les indices ont été rangés dans l'ordre suivant :  $i \rightarrow K \rightarrow \alpha$ . En effet, le couplage s'effectuant entre  $\alpha$  et  $\alpha+1$  et  $K$  et  $K+1$ , toutes les équations ayant le même indice  $i_1$  sont indépendantes des équations ayant le même indice  $i_2$ .

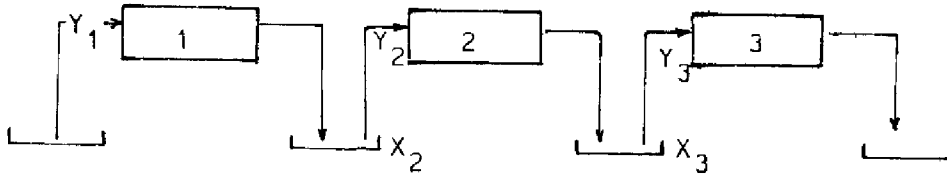
Deux représentations existent : les équations du type égalité (II) et les équations du type inégalité (V). Dans les secondes, toutes les variables de type  $X$  disparaissent et la matrice devient plus pleine. Les deux types de représentation sont détaillées fig. 2-7 pour  $N\alpha = 3$  et  $NK = 4$

$$\text{Type 1 : } \begin{cases} X(\alpha, i, 1) + Y(\alpha, i, 1) = X_0(\alpha, i) \\ X(\alpha, i, K) + Y(\alpha, i, K) - X(\alpha, i, K-1) - f(\alpha-1, i) Y(\alpha-1, i, K-1) = 0 \end{cases}$$

fig. 2-7

$$\text{Type 2 : } \begin{cases} Y(\alpha, i, 1) \leq X_0(\alpha, i) \\ \sum_{k=1}^K Y(\alpha, i, k) - f(\alpha-1, i) \sum_{k=1}^{K-1} Y(\alpha-1, i, k) \leq X_0(\alpha, i) \end{cases}$$

fig. 2-8



K=1					K=2					K=3					K=4				
$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$
	1	1																	
			1	1															
$-p_1$	-1				1	1													
		$-p_2$	-1				1	1											
				$-p_1$	-1				1	1									
					$-p_2$	-1					1	1							
								$-p_1$	-1				1	1					
										$-p_2$	-1				1	1			

$A_i(8,20)$

fig.2-7: Bloc-produit  $A_i$  du type 1

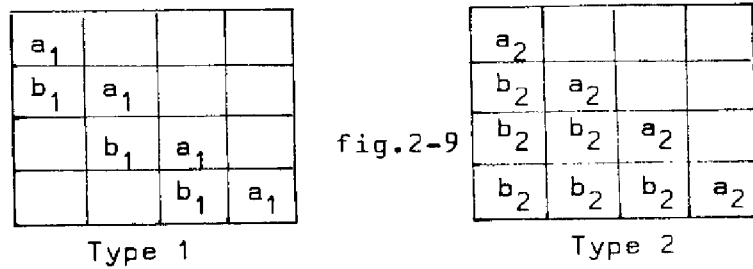
K=1			K=2			K=3			K=4		
$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
	1										
		1									
$-p_1$	1			1							
	$-p_2$	1			1						
$-p_1$	1		$-p_1$	1			1				
	$-p_2$	1		$-p_2$	1			1			
$-p_1$	1		$-p_1$	1		$-p_1$	1			1	
	$-p_2$	1		$-p_2$	1		$-p_2$	1			1

$A_i(8,12)$

fig.2-8: Bloc-produit du type 2



Chaque bloc-produit  $A_i$  est une matrice carrée dont les éléments sont des sous-matrices rectangulaires de deux types ; les sous-blocs diagonaux notés  $a$  et les sous-blocs sous-diagonaux notés simplement  $b$  (fig. 2-9)



Cette structure entraîne une génération des blocs  $A_i$  simplifiée en fonction de l'indice  $K$ .

On remarque que dans les deux cas, la colonne de la variable  $Y_1$  de  $K = 4$  est vide, ce qui signifie que cette variable qui puise dans le stock d'entrée n'est pas reliée à l'écoulement des produits sur l'horizon.

Cela nous amène à une réflexion sur l'influence des variables les unes par rapport aux autres. Revenons au diagramme temps-espace déjà décrit (§ 2.3.1)

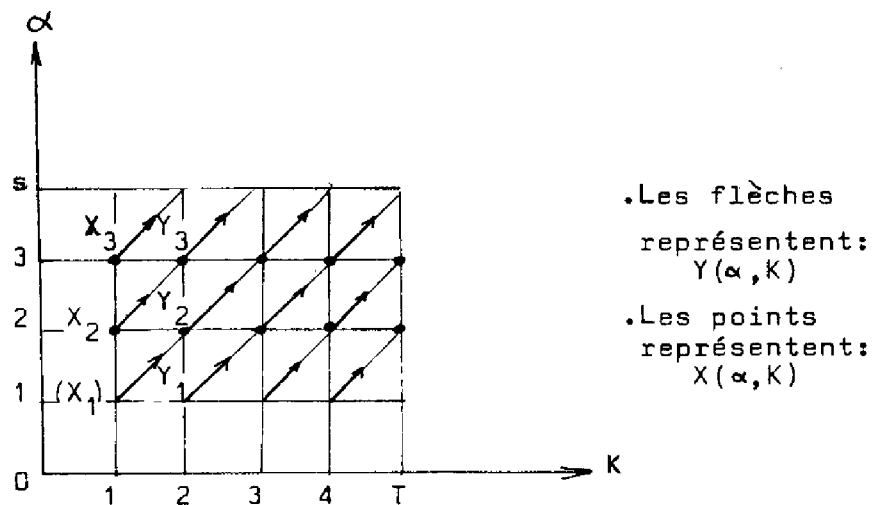
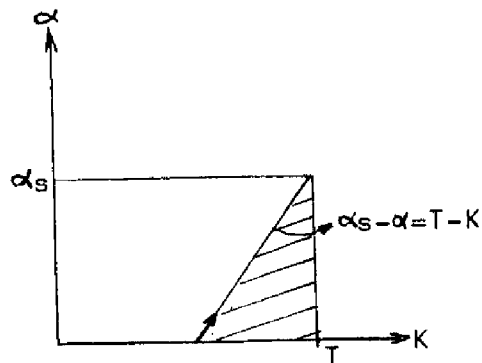


fig.2-10

Le diagramme permet de visualiser pratiquement la date d'arrivée au plus tôt d'un produit dans le stock  $\alpha_s$ . On voit donc sur la figure que tous les produits situés dans un stock de la partie hachurée ne peuvent être fabriqués avant la fin de l'horizon.

Fig. 2-11



La condition d'arrivée au plus tôt avant au moins la date T est  $\alpha_s - \alpha < T - K$

La perte d'information subie par la suppression des contraintes et variables concernant la zone hachurée n'entrave pas la livraison des commandes engagées sur l'horizon. Le gain informatique est par contre considérable. Le nombre de contraintes supprimées étant  $1 + 2 + \dots + (\alpha_s - 2) = \frac{(\alpha_s - 1)(\alpha_s - 2)}{2}$ , le gain vaut  $\frac{(\alpha_s - 1)(\alpha_s - 2)}{2 \alpha_s T}$ .

REMARQUE : Cette suppression des variables situées dans la partie hachurée ne se justifie que si ces variables ne sont pas liées à une contrainte restante. Dans le cas signalé de bouclages d'un poste d'un sous-atelier sur un autre, certaines variables ne peuvent être supprimées et la réduction du nombre de contraintes doit être menée plus prudemment.

Dans la suite, nous ne considérerons que des représentations du type 2, c'est-à-dire en supprimant les variables d'état  $X(\alpha, i, K)$ . Ce choix n'a pas été dicté par la suppression d'un grand nombre de variables, facteur qui influe peu sur les performances d'un programme linéaire, mais par le gain en clarté et en symétrie résultant dans la structure de la matrice des contraintes.

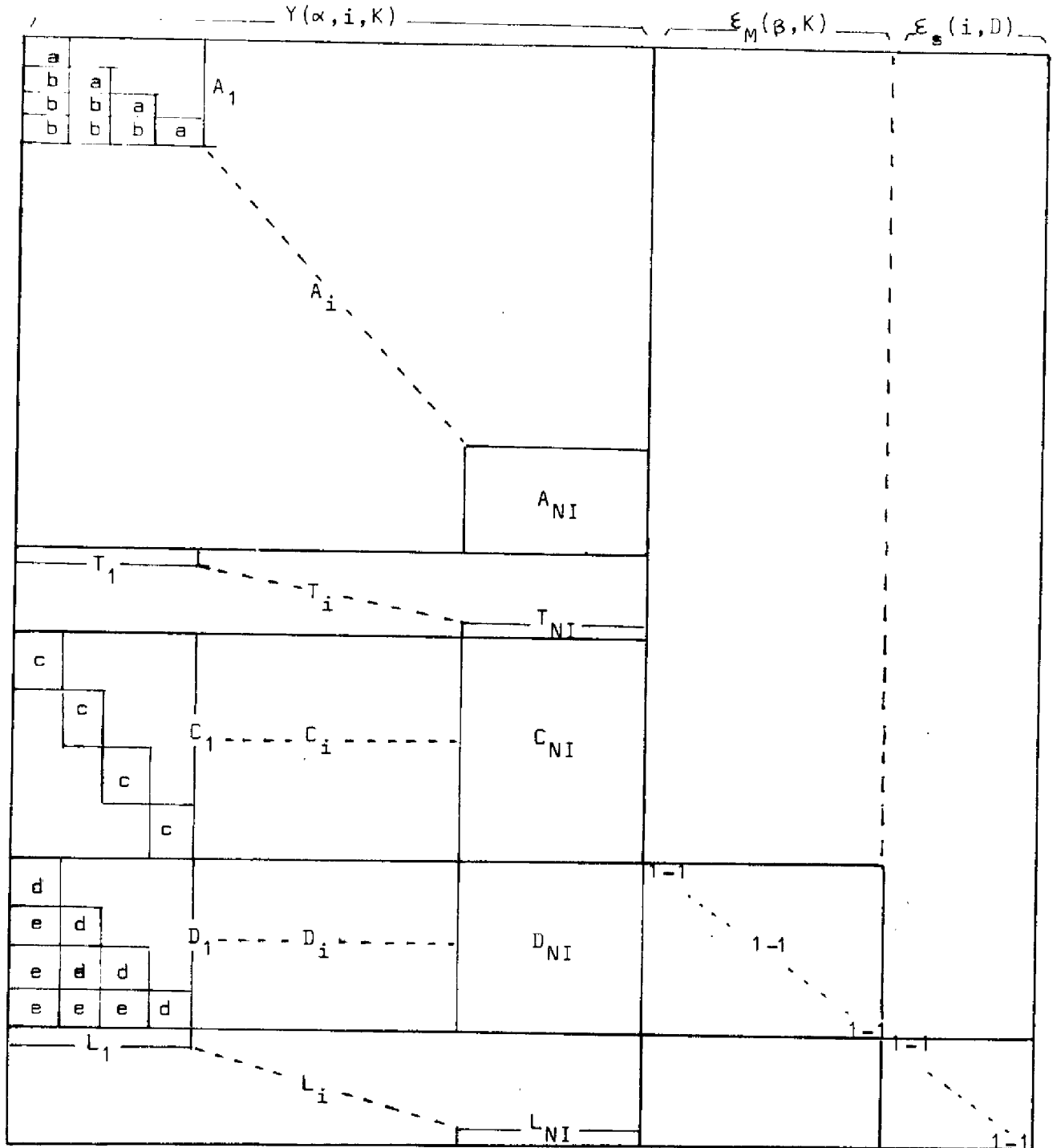
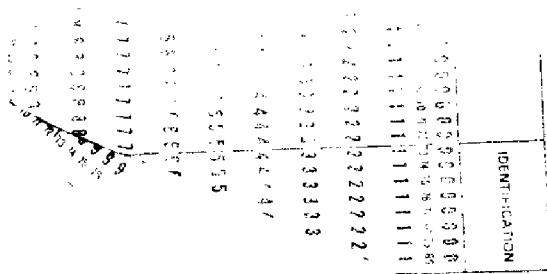


Fig. 2-12: La matrice des contraintes



2 - Aspect global de la matrice

La matrice est présentée schématiquement fig. 2-12

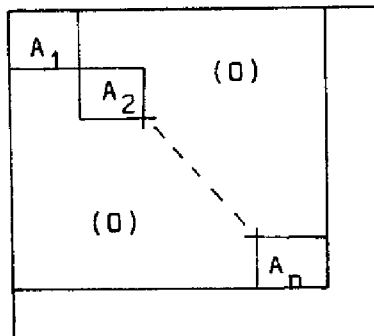
- Les variables :

Elles sont rangées comme suit :

- variables de commande par indices  $i \rightarrow K \rightarrow \alpha$
- variables d'écart  $\epsilon_{M_1}^1$  et  $\epsilon_{M_2}^2$  liées aux niveaux de stock
- variables d'écart  $\epsilon_{S_1}^1$  et  $\epsilon_{S_2}^2$  liées aux livraisons

- Les contraintes :

- les blocs produits  $(A_i)$  se présentent comme des éléments diagonaux :



$n=NI$  blocs identiques  
au bloc  $A_i$   
décrit plus haut.

- les contraintes du stock d'entrée (T) (équ. VII) bloc de dimension  $(NI, NI.NK.N\alpha)$  composé de NI blocs diagonaux

$$(Ti) : \sum_{K=1}^T Y(\alpha, i, K) \leq X_0(\alpha, i)$$

	K=1				K=2				K=3				K=4			
$T_i$	1	0	0	0	1				1				1			

- les contraintes de capacités :  $(C_i)$

$$\sum_i F_{i\beta} Y(\alpha, i, K) \leq CAP(\beta, K)$$

Le couplage entre les  $i$  apparaît sur le schéma. Chaque bloc  $C_i$  est composé de sous-blocs diagonaux  $C$  identiques (on suppose les  $F_{i\beta}$  indépendants de  $K$ ) ; chaque sous-bloc correspondant à une valeur de  $K$ .

	=1	2	3
$\beta = 1$	$F_{i1}$		
$\beta = 2$	$F_{i2}$		
$\beta = 3$		$F_{i3}$	
$\beta = 4$		$F_{i4}$	
$\beta = 5$			$F_{i5}$
$\beta = 6$			$F_{i6}$

On a supposé les 6 postes critiques équirépartis, 2 par sous-ateliers

Sous-bloc C

- Les contraintes de niveaux de stock : (équ. XIV)  $D_i$  Même structure que pour les blocs  $A_i$  (triangulaire). Les blocs  $(D_i)$  diffèrent des blocs  $C_i$ , car pour les postes appartenant au premier sous-atelier, il n'y a pas de stock à réguler (stock d'entrée). Dans le cas présent les lignes correspondant à  $F_{i1}$  et  $F_{i2}$  disparaissent.

soit  $N_{(\beta,1)}$  le nombre de postes inclus dans le premier sous atelier.

	$F_{i3}$	
	$F_{i4}$	
		$F_{i5}$
		$F_{i6}$

Sous-bloc d

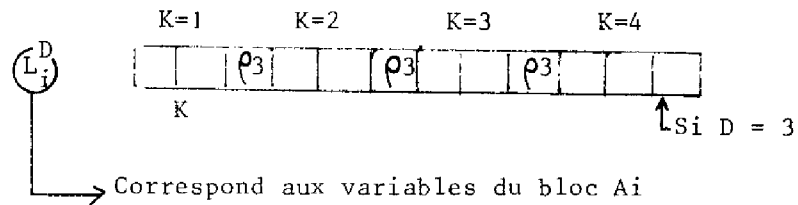
$-p_1 F_{i3}$	$F_{i3}$	
$-p_1 F_{i4}$	$F_{i4}$	
	$-p_2 F_{i5}$	$F_{i5}$
	$-p_2 F_{i6}$	$F_{i6}$

Sous-bloc e

A chaque contrainte correspondent 2 variables d'écart  $\mathcal{E}_M^1$  (-1) et  $\mathcal{E}_M^2$  (+1)

- les contraintes de livraison

A chaque sous commande (i,D) correspond une contrainte et deux variables d'écart  $\mathcal{E}_S^1$  et  $\mathcal{E}_S^2$



2-4-4 - Conclusion

En résumé, la matrice des contraintes que nous devons décrire a une structure particulière composée d'un grand nombre de sous-blocs diagonaux indépendants (ce sont les blocs  $A_i$  et  $T_i$ ) dépendants d'un et un seul indice  $i$  et d'un certain nombre de contraintes dites de couplage :

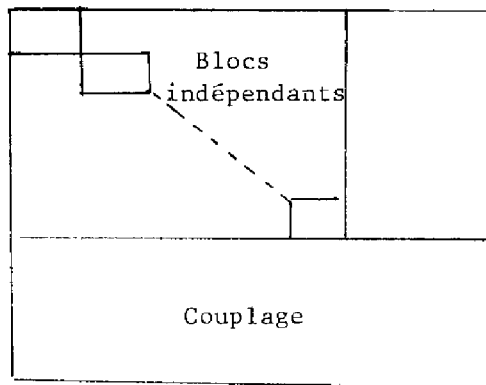


Fig. 2-13

Une seconde caractéristique de cette matrice est sa grande taille :

$N_\alpha$  : nombre de sous-ateliers,  $NK$  : nombre de périodes,  
 $N_i$  : nombre de produits,  $N\beta$  : nombre de postes

- blocs A<sub>i</sub> :  $(N_{\alpha}-1) \cdot NK \cdot Ni$  contraintes
- blocs T<sub>i</sub> :  $Ni$  contraintes
- blocs C<sub>i</sub> :  $N_{\beta} \cdot NK$  contraintes
- blocs D<sub>i</sub> :  $(N_{\beta} - N_{(p,1)}) \cdot NK$  contraintes
- blocs L<sub>i</sub> :  $Ni \rightarrow 3 Ni$  contraintes

En moyenne, pour  $N_{\alpha} = 3$   
 $NK = 4$   
 $Ni = 5$   
 $N_{\beta} = 6$  } 90 contraintes pour 100 variables

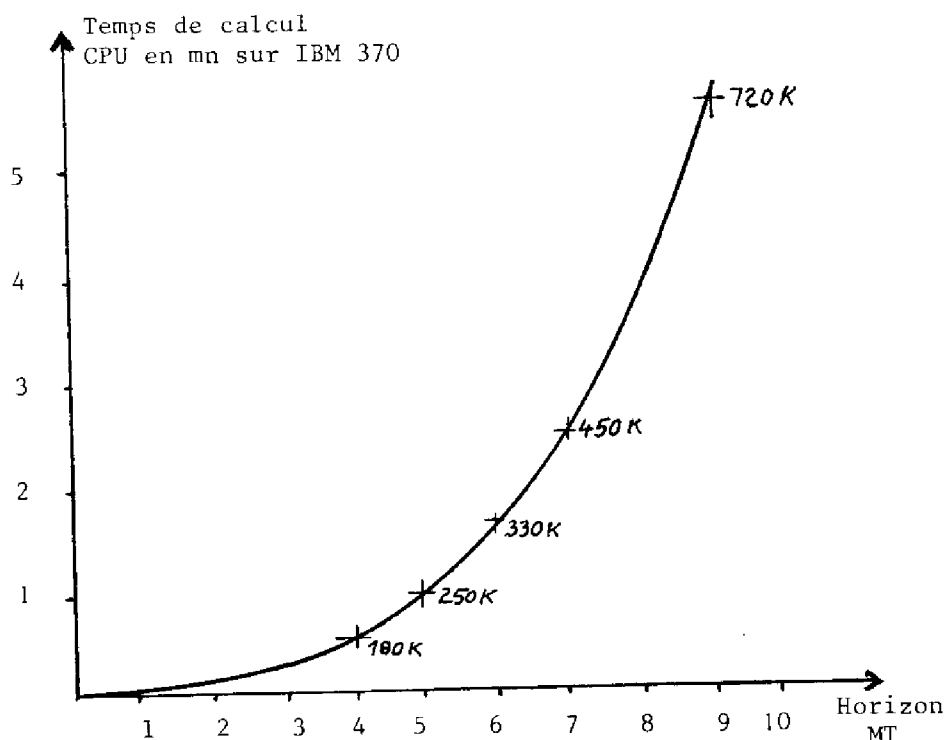
Dans un cas réel on peut estimer :

$N_{\alpha} = 5$   
 $NK = 7$   
 $Ni = 30$   
 $N_{\beta} = 12$  } 1080 contraintes pour 1300 variables

Plusieurs lignes de conduite ont été envisagées pour la mise au point informatique du modèle et son application à un cas réel. Nous en énumérerons trois ci-dessous :

- les possibilités de réduction du nombre de contraintes que nous avons déjà partiellement signalées, la taille de l'atelier que nous avons eu à confronter avec le modèle étant elle-même relativement faible, nous avons pensé profiter d'outils de programmation linéaire existant, en essayant d'exploiter au maximum la structure de la matrice. Nous avons tout d'abord utilisé un package de faible dimension (IMSL(ZX3LP)) disponible en accès direct, facilement implantable sur une machine de faible dimension. Ce simplexe est capable de traiter des matrices allant jusqu'à 800 contraintes maximum. S'il peut utiliser des ordinateurs de faible dimension, son coût d'exploitation reste élevé comme le montre la fig. 2-14 où sont tracées les courbes de temps de calcul et taille occupation mémoire en fonction d'un paramètre (ici NK)

Fig. 2-14  
Performances  
ZX3LP



Devant les basses performances de cet outil pour des problèmes de taille réelle, nous avons recherché un programme linéaire plus élaboré. Nous avons effectué l'essentiel de la mise au point, de l'étude des réactions du modèle sur données réelles, avec un package à haute performance construit par IBM et écrit dans un langage spécialisé dit MPS. Ce package MPSX/370 permet de traiter des matrices de très grande taille et son coût d'exploitation (temps CPU en particulier) est faible.

Nous donnons les principales caractéristiques de MPSX, son mode d'utilisation ainsi que le programme de génération de la matrice écrit en PLI



dans l'annexe n° II. A la différence de ZX3LP, cet outil coûte très cher à implanter dans l'industrie et demande des outils informatiques relativement gros (minimum 500 K disponibles en mémoire simultanée).

. La structure de la matrice linéaire s'adapte particulièrement bien aux méthodes de décomposition dites "méthode de Dantzig-Wolfe", méthodes qui décomposent généralement le programme linéaire en deux étapes la première traitant chaque bloc indépendant, la seconde dite maître programme réalisant le couplage de ces "sous-simplexes". Ces méthodes sont détaillées dans [11]. Une étude en cours parallèle à la notre a développé la recherche de modèles de gestion moyen terme dans ce sens. ([20])

. La construction d'un programme d'optimisation linéaire propre au modèle a été envisagée. L'avantage d'une telle démarche réside dans la possibilité d'exploiter certaines particularités du problème mieux que par la simple génération automatique de la matrice. Néanmoins, nous n'avons pu, faute de temps, réaliser cet objectif.

En conclusion, ce modèle que nous venons de décrire a résolument choisi d'exploiter le caractère linéaire de la fabrication d'un atelier du type "chaîne".

Contraintes, critère, solution optimale, le vocabulaire de la recherche opérationnelle a repris le dessus, contrariant quelque peu l'optique d'une aide informatique à une décision prise par un décideur humain que nous nous sommes fixés au départ. Il ne faut cependant pas oublier que si le modèle de gestion moyen terme recherche la solution optimale à un ensemble de contraintes établies sur un horizon prévisionnel, son existence même est remise en cause permanente : la politique choisie pour la première période est établie par rapport à un coût globalisé sur tout l'horizon. Coefficients de coût, paramètres du modèle ne sont pas fixes et immuables. Le décideur utilisateur du modèle linéaire a toute latitude pour les modifier et faire dériver la solution émise par le programme. C'est donc lui également qui exploite les données du programme en cas de perturbations

L'outil informatique en lui-même n'a pas de caractère dynamique, c'est un fait mais il est construit de sorte que la décision, elle, a un caractère dynamique. Ces affirmations devront être confirmées dans l'application à des données réelles.



## CHAPITRE III

APPLICATION DU MODELE À DEUX ATELIERS  
DE FABRICATION DE COMPOSANTS ELECTRONIQUES  
RÉSULTATS ET PERFORMANCES



### 3-1 - INTRODUCTION

Nous venons de donner les caractéristiques du modèle informatique de gestion moyen terme. Nous avons volontairement décrit le modèle théorique avant d'aborder l'étude du cas réel qui nous a été soumis. Dans la réalité, notre démarche fut inversée : partant du support industriel, nous avons tenté de construire un modèle adapté à ce genre de fabrication. C'est pour montrer l'extension du champ d'application à d'autres ateliers à laquelle nous pensons avoir abouti que nous avons présenté les travaux dans cet ordre.

Ci-après nous abordons la description détaillée du support industriel qui nous fut proposé, celui du département des Circuits Intégrés Hybrides (CIH) de l'usine de la Radiotechnique Compelec d'Evreux. Cet atelier par sa situation à la pointe des fabrications de l'entreprise d'Evreux, par sa taille modeste et malgré la présence de nombreux postes à commande automatique, constitue un champ de travail particulièrement favorable.

Sans revenir sur les équations du modèle, nous avons mis l'accent sur la description des difficultés rencontrées lors de la collecte des informations sur le site, problème général bien souvent ressenti par tout constructeur de modèles industriels. En parallèle, la description d'un second atelier est ensuite présentée ainsi que l'adaptation du modèle à ce nouveau cadre. Il s'agit là du Département des Circuits Imprimés Professionnels (CIP) qui nous fut proposé comme second cadre d'investigations.

Les réactions et performances du programme à des perturbations réelles sont ensuite montrées et sans atteindre l'intérêt de véritables essais on-line, ces simulations constituent un support utile à la justification du modèle.

### 3-2 - DESCRIPTION DE LA CHAÎNE DE FABRICATION CIH (Circuits Intégrés Hybrides)

Le département Circuits Intégrés Hybrides de la RTC Evreux

constitue un exemple intéressant en tant qu'objectif d'application et présente des caractéristiques très favorables en tant que support à la réflexion de la recherche. Ces caractéristiques sont décrites ci-dessous et sans vouloir entrer dans le détail des différentes technologies qui dirigent la fabrication nous pensons qu'il est bon de décrire la fabrication de manière précise donnant ainsi à la fonction "analyse" toute son importance.

### 3-2-1 - Le type de fabrication

Conformément aux types de fabrications dénombrés au §2-2-2, nous donnons ici les caractères principaux de la fabrication :

#### 1-1 - Utilisation de techniques de pointe

La fabrication de composants électroniques à haute intégration utilisant le report de composants discrets se situe à la pointe de la technologie électronique et elle nécessite une assistance technique autant humaine que numérique très évoluée.

#### 1-2 - Le produit-client

A l'opposé d'une production sur catalogue, chaque commande est spécifique d'un client qui fournit le dessin et les normes du circuit à fabriquer.

#### 1-3 - Petites et moyennes séries

La durée de vie des produits dans l'atelier est assez courte et il y a un renouvellement permanent des gammes en circulation.

#### 1-4 - Bonnes conditions d'implantation d'un système de gestion informatique

Sans être des caractéristiques de la fabrication ces remarques ont leur importance dans la délimitation du cadre d'application du modèle :

- présence de la plupart des fonctions de l'entreprise en un même lieu.

- Organisation informatique relativement évoluée et supportée par un ordinateur de capacité moyenne (Philips P 1000// P1170)

- Intérêt de la direction pour l'étude théorique engagée, et désir de voir aboutir rapidement la mise au point "in situ" d'un système moderne de gestion de la production.

#### 1-5 - Automatisation des postes

L'automatisation progressive des principaux postes de l'atelier constitue un des objectifs principaux des fabricants.

Telles ont été, en gros, les conditions d'application de modèle de gestion MT étudié.

#### 3-2-2 - L'atelier des CIH

L'atelier des CIH renferme une cinquantaine de postes différents, certains comme le laser ou l'évaporateur étant des machines à commande automatique ou semi-automatique d'une très grande valeur brute.

#### 2-1 - Les filières technologiques

L'atelier fabrique donc des circuits intégrés hybrides à partir de substrats de verre amorphe en utilisant la technique de la sublimation du Nichrome.

En fonction de la nature des composants rapportés, du type d'encapsulation, deux principales filières technologiques sont suivies, caractérisées par la nature de la couche conductrice.

- La filière "étamés" utilisant une couche de Ni-SnPb

- la filière "dorés" utilisant une couche de Ni-Au permettant le report direct des cristaux discrets (Wafers).



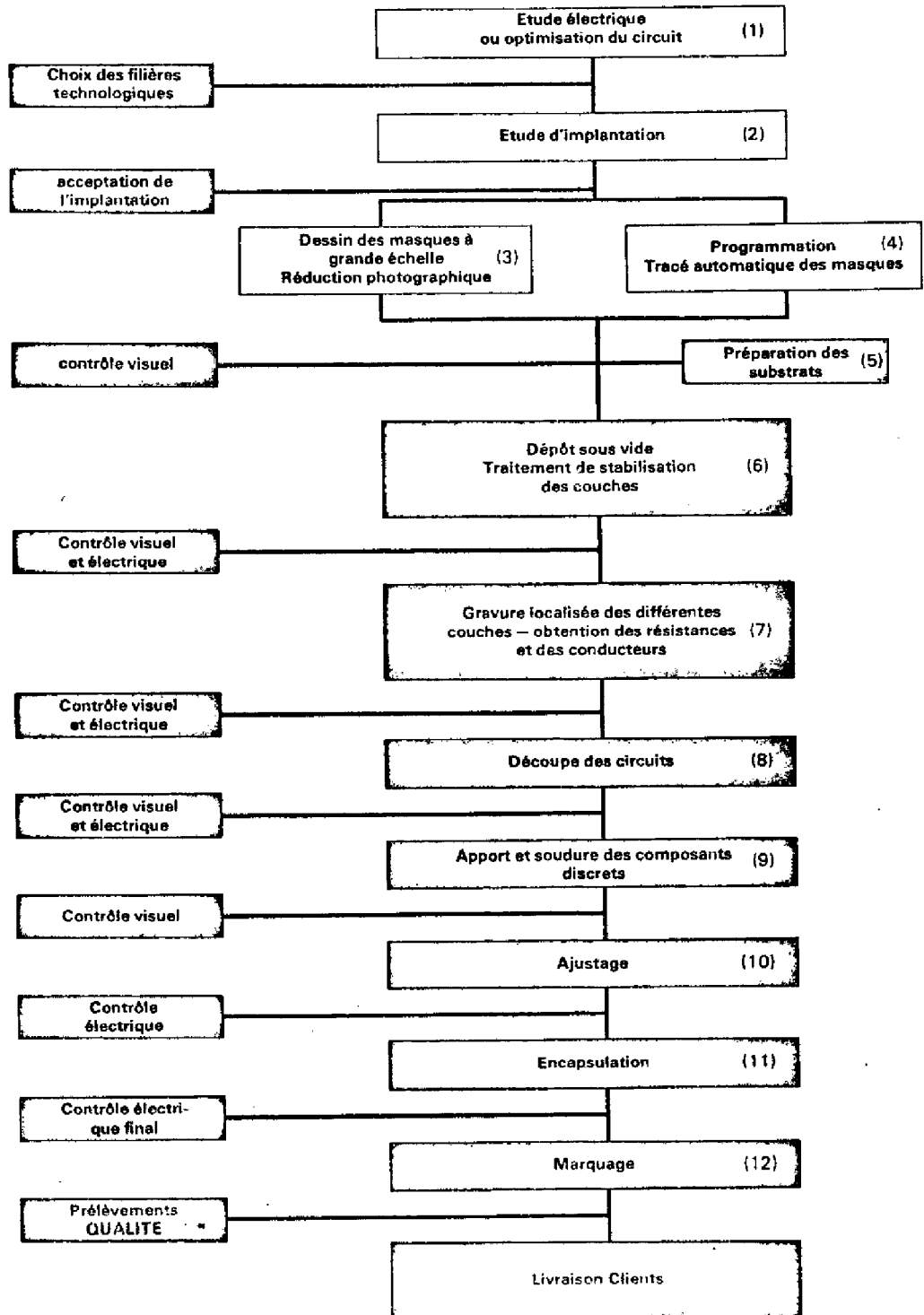


Figure 3-1 - Organigramme fabrication

L'organigramme de la fabrication est décrit fig. 3-1. Ce schéma global traduit l'aspect séquentiel du travail et montre l'importance des nombreux contrôles en cours de fabrication. Pour mieux mettre en évidence les deux filières technologiques, nous avons détaillé cet organigramme entre les étapes (5) et (12), c'est-à-dire là où s'effectuera la gestion des produits (Fig. 3-2).

## 2-2 - la préparation des substrats

Les grandes plaques de verre époxy qui constituent le support du CIH sont préalablement sciées et lavées pour subir l'évaporation de nichromé + Ni.

L'évaporateur est un bâti cylindrique accueillant simultanément 3 lots de 24 plaques disposées sur la surface intérieure du cylindre dont l'axe central est la source du métal à sublimer.

La durée moyenne d'un "run" est de 6 heures et la régulation du processus d'évaporation reste actuellement un des facteurs déterminants de la bonne marche de l'atelier et le souci majeur du service technique du département.

Une étude sur la recherche d'informations statistiques devant conduire à une modélisation du processus en vue d'une commande adaptative a été menée à Evreux dans le cadre d'un projet d'études E.N.S.A.E. (rapport SZYMANSKI [12] ).

La matrice complète de l'évaporateur reste encore aujourd'hui à l'étude et nous n'avons pu naturellement l'intégrer à notre modèle de gestion.

Néanmoins le stock de plaques évaporées approvisionné par l'évaporateur constitue une entrée valable de la chaîne à contrôler, et ce pour deux raisons :

- c'est seulement à ce niveau que chaque plaque sera affectée

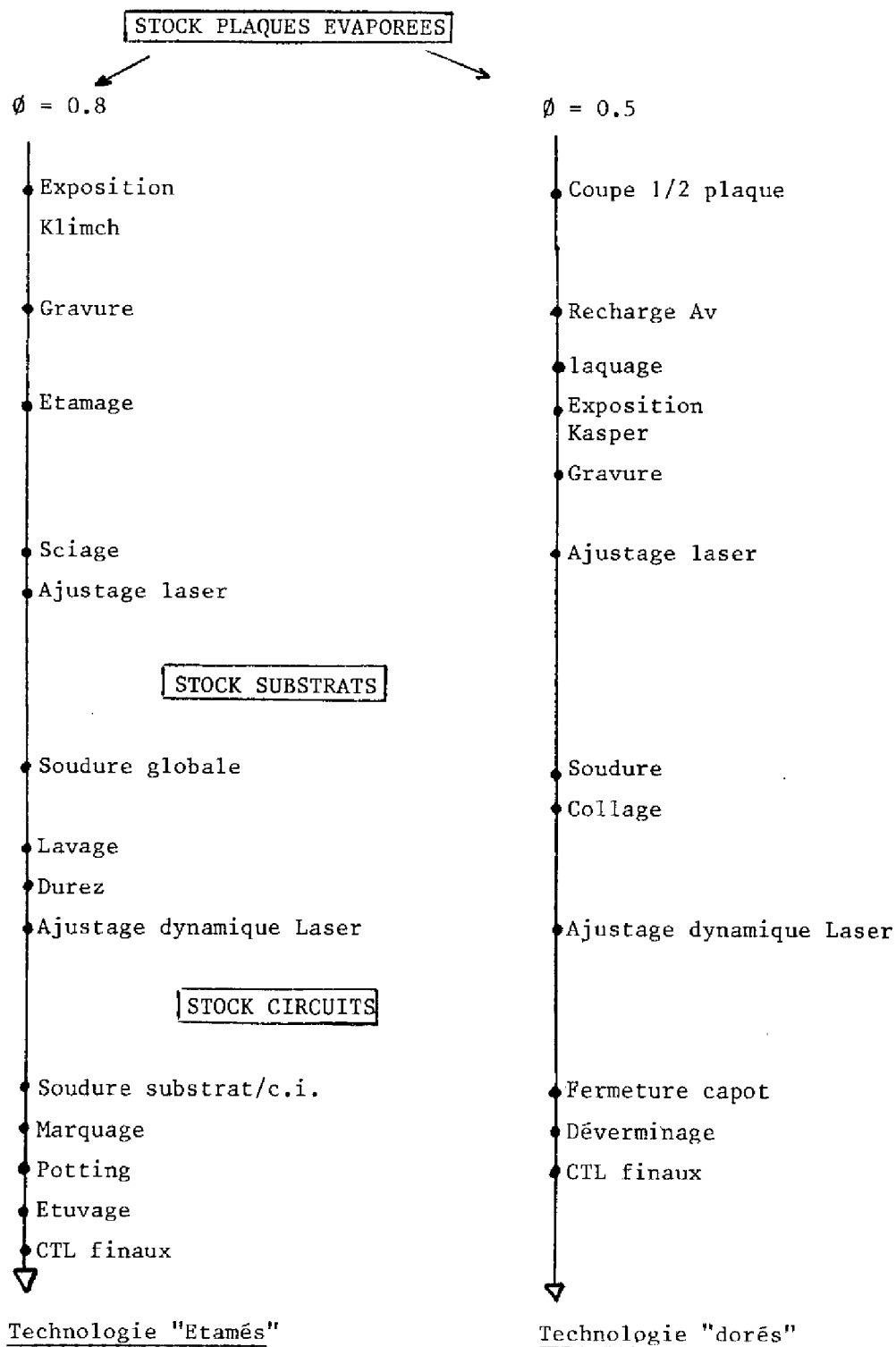


Figure 3-2 - Détail de gammes-types

à une commande-client précise.

- le stock de plaques évaporées est suffisamment important par rapport au débit de l'atelier pour représenter le stock d'entrée  $\alpha_0$  de la gestion MT.

### 2-3 - Un poste particulier : le laser

Les deux filières technologiques restent parfaitement disjointes par rapport aux postes utilisés, à l'exception d'un poste : l'ajustage des résistances au laser automatique. Ce poste charnière effectue l'ajustage des résistances, soit en statique avant le montage des composants, soit en dynamique, après les opérations de montage. Tous les substrats ne subissent pas cet ajustage numérique. Il y a également des postes manuels ajustant les produits de qualité inférieure. D'autres par contre subissent à la fois le traitement en statique puis en dynamique. C'est donc un cas de bouclage certain sur lequel nous reviendrons dans la décomposition de l'atelier. On peut présager sans analyse plus poussée du caractère "critique" au sens du modèle de ce poste.

### 2-4 - Le montage et l'approvisionnement des composants discrets

C'est au niveau du montage des composants sur les substrats gravés qu'apparaît le plus vivement le couplage de la gestion du magasin avec la fabrication. Pour la filière des étamés, les composants proviennent tous directement du stock magasin et ils sont montés par soudure, tandis que sur les substrats dorés, on a la possibilité de coller directement des cristaux, dits Wafers, qui sont fabriqués dans l'atelier même sur des postes spéciaux. Le report des Wafers est effectué par une machine automatique de commande numérique et une autre machine de montage dite "chaîne de montage automatique" est en cours d'installation pour traiter tous les substrats étamés.

## 3-3 - MODELISATION DU PROCESSUS REEL ET EXTRACTION DES DONNEES

### 3-3-1 - Introduction

L'adaptation du modèle informatique décrit au chapitre 2 constitue la phase à la fois la plus ambitieuse et la plus instructive de notre

travail. Nous venons de décrire sommairement l'atelier de fabrication. Nous avons montré (§ 2-4) l'acuité du problème de la taille informatique du système. C'est donc dans l'optique d'une réduction de cette taille du problème que nous avons entrepris la collecte des informations. Ces informations sont disponibles à l'usine sous différentes formes que nous décrivons dans une première partie ; puis avant de résumer le modèle informatique final, nous détaillerons les difficultés rencontrées dans la recherche de ces données que nous avons classées en cinq points :

- A - Décomposition de l'atelier en sous-ateliers  $\rightarrow \{\alpha\}$
- B - Réduction du nombre de gammes  $\rightarrow \{i\}$
- C - Recherche des machines critiques et calcul des taux de charge  $\rightarrow \{F_{i\beta}\}$
- D - Calcul des rendements de fabrication pour chaque sous-atelier  $\rightarrow \{P_{i\alpha}\}$
- E - Evaluation comparative des en-cours et recherche des coûts de fabrication  $\rightarrow \{C\}$

### 3-3-2 - Organisation informatique actuelle de l'atelier

Le nombre d'informations qui sont fournies chaque jour à l'ordinateur central de l'usine est relativement élevé par rapport à la taille modeste de l'atelier. L'implantation d'un système de suivi de pièces s'effectue progressivement, le bureau des méthodes fournissant les gammes opératoires de chaque produit-type.

. Les gammes opératoires : elles préétablissent toutes les opérations successives devant être effectuées sur un produit donné ainsi que leurs temps opératoires (précalculés/temps homme) et leurs spécifications techniques.

Sur ces gammes figurent également les rendements de fabrication, également précalculés pour l'année. Ces rendements sont à l'origine du calcul des quantités de lots à lancer. Mais il nous faut tout d'abord

décrire le suivi des pièces.

. Le suivi : le suivi de la fabrication est assuré par des bons de jalonnement qui comptabilisent les pièces fabriquées. Seules les principales opérations sont jalonnées. Parmi ces points de jalonnement, d'une grande importance pour la décomposition de l'atelier en sous-ateliers, des stocks fictifs nommés "banques" ont été créés aux véritables noeuds de la chaîne de fabrication. Ils représentent les transitions essentielles de la pièce au cours de sa vie dans l'atelier. On trouve la banque des plaques évaporées, la banque des substrats unitaires, la banque des circuits montés.

. Précalcul des quantités à lancer

A la sortie de l'évaporateur, les plaques sont regroupées en lots de 24 qui correspondent à un même "étage" du bâti. Toutes les plaques d'un même lot sont affectées à une même commande et ceci pour des raisons de stabilité en résistance et en température. Cette première contrainte est importante car elle fixe l'unité de transit dans tout l'atelier.

1 lot = 24 plaques évaporées =  $24 \times n_i$  substrats bruts associés à commande n° i

$n_i$  : nombre de pièces/plaques

Si  $\rho_i$  est le rendement global précalculé associé à la gamme n° i,  $\rho_i = \prod \rho_{i\alpha}$ , on peut prévoir qu'un lot lancé fournira  $24 \times n_i \times \rho_i$  pièces bonnes livrables.

Inversement, connaissant une quantité  $XC(i)$  de produits i à livrer, on doit prévoir de lancer la quantité  $\frac{XC(i)}{\rho_i}$  pièces en début de chaîne, donc en arrondissant  $\frac{XC(i)}{24 \times n_i \times \rho_i}$  à l'entier supérieur, on obtient le nombre de lots à lancer pour satisfaire la commande.

REMARQUE : Regroupement en modules : de nombreux circuits sont regroupés au niveau de la banque des circuits et montés en modules uniques. Les opérations qui suivent ce regroupement sont donc simultanées aux différentes gammes qui composent le module. Nous reviendrons sur cette contrainte

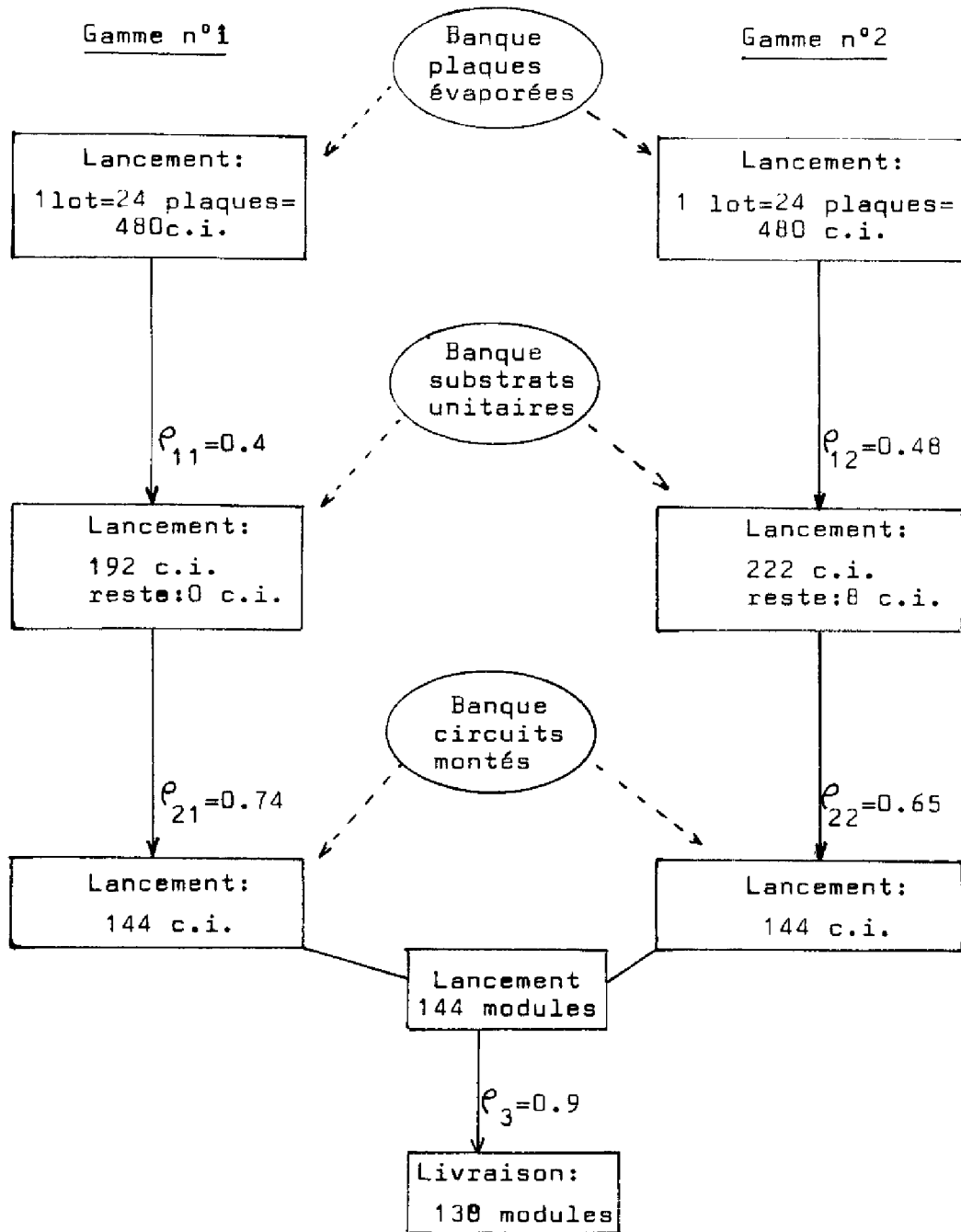


figure 3-3 : Exemple de précalcul des quantités à lancer dans le cas d'un module composé de 2 circuits de gamme n°1 et n°2, pour une commande de 130 modules.

dans la modélisation. La fig. 3-3 résume le précalcul des quantités à lancer à partir des banques dans le cas d'un module.

### 3-3-3 - Décomposition en sous-ateliers

Le découpage de l'atelier constitue une phase essentielle de la modélisation.

Reprenons les étapes du problème décrit § 2-3

#### 3-1 - Choix d'une unité de discrétisation

Le temps de transit moyen d'un lot dans l'atelier est de un mois. Nous avons choisi de discrétiser l'horizon de travail à la semaine. Cela implique qu'un sous-atelier ne pourra être traversé en moins d'une semaine.

Nombre de sous-ateliers choisi :  $4 \Rightarrow N\alpha = 4$

Ces lancements à la semaine correspondent à une réalité de gestion et facilitent les simulations postérieures.

#### 3-2 - Positionnement des stocks interateliers

Nous avons respecté le souci de construire un découpage proche du découpage réel fonctionnel de l'atelier en tenant compte de la position des noeuds de la fabrication (banques, jalonnement). Le découpage retenu est représenté fig. 3-4.

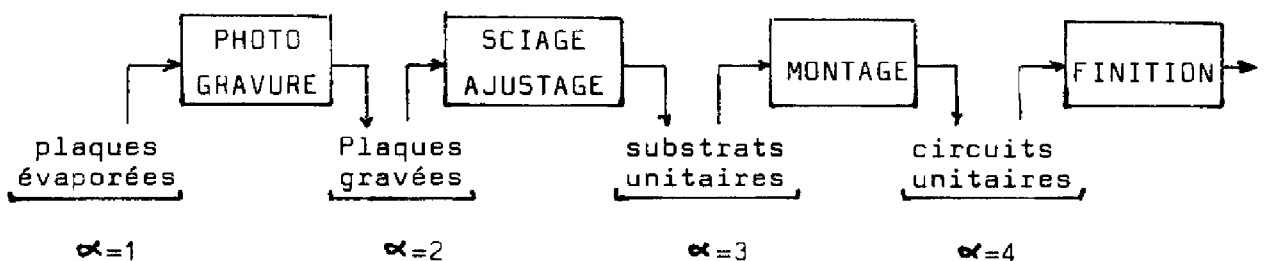


figure 3-4



3-3 - Problèmes particuliers

Si les trois premiers sous-ateliers rentrent bien dans le cadre des hypothèses du § 2-3, le sous-atelier "FINITION" est plus difficile à maîtriser pour les raisons suivantes :

- regroupement en modules de certains circuits, déjà signalé au § 3-2. Dans le but de la symétrie de la matrice globale des contraintes (§ 2-4), nous avons conservé des variables différentes pour chaque élément d'un module tout en assurant la simultanéité des lancements par des contraintes égalités supplémentaires du type :

$$Y(4, i_1, K) = \dots = Y(4, i_l, K) = \dots = Y(4, i_L, K)$$

avec  $i_1, \dots, i_l, \dots, i_L$  représentant les gammes des différents éléments d'un module.

- il est apparu que certains ateliers ne vérifiaient pas l'hypothèse de "synchronisation" des lancements, c'est-à-dire, l'hypothèse du § 2-3-1 (p. 32) qui suppose que le transit à travers un sous-atelier prend un temps constant égal à la période de discrétisation de l'horizon, ici, une semaine. En effet, en particulier, pour l'atelier 4 (finition), des temps d'attente de une semaine à deux semaines sont fréquents. Ces temps sont dus à des opérations spéciales comme le déverminage ou certains étuvages qui ne constituent pas des postes critiques. On est amené à rajouter ces temps d'attente comme des retards purs dans les équations de circulation (fig. 3-5)

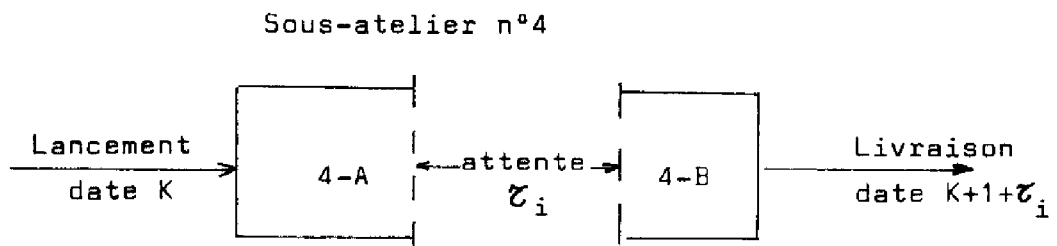


figure 3-5

Pour les produits  $i$  subissant ces retards l'équation de circulation devient :

$$X(\alpha+1, i, K) = X(\alpha+1, i, K-1) + \rho_{\alpha, i} Y(\alpha, i, K-1-\tau_1) - Y(\alpha+1, i, K)$$

REMARQUE : Les équations de capacités changent également mais uniquement pour les postes se trouvant en aval de ces retards (partie 4-B)

soit  $\beta_2$  ces postes

$i$  les produits sans retard

$j$  les produits avec retard  $\tau_j$

$$\sum_i F_i \beta_2 Y(\alpha, i, K) + \sum_j F_j \beta_2 Y(\alpha, j, K-\tau_j) \leq \text{CAP}(\beta_2, K)$$

Pour les CIH, ces retards n'interviennent qu'en fin de fabrication et nous n'avons pas placés de postes critiques dans 4-B.

#### 3-3-4 - Réduction du nombre de gammes

Cette étape se situe dans l'optique de la réduction du nombre total de variables, c'est-à-dire dans la ligne de conduite du niveau moyen terme qui n'a pas pour rôle de prendre en compte tous les détails de la fabrication. Si le fichier gammes de l'atelier des CIH ne comportait qu'une quarantaine de gammes différentes (susceptibles de coexister dans l'atelier), l'application du modèle à un autre atelier, celui des circuits imprimés, nous a montré que ce chiffre peut atteindre plusieurs centaines.

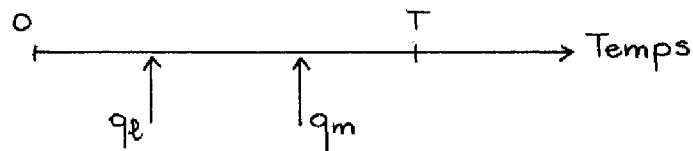
Une gamme agrégée représente un certain nombre de gammes réelles présentant les caractéristiques suivantes :

- l'enchaînement des opérations est le même à l'exception de quelques postes particuliers non critiques.

- les temps opératoires aux 100 pièces correspondant aux postes critiques sont identiques avec une tolérance de 5%.

On emploiera indistinctement les termes "famille" ou "gammes agrégées". On peut remarquer que ces gammes peuvent ne pas provenir de la même commande client. En particulier, deux gammes agrégeables peuvent très bien correspondre à deux dates de livraison distinctes. Ce sera au niveau inférieur de gestion d'organiser l'ordre de passage des lots en fonction de leurs urgences respectives.

Exemple : Soit deux lots de gammes distinctes mais très proches,  $i_\ell$  et  $i_m$ . La commande spécifie  $q_\ell$  pièces de la gamme  $i_\ell$  livrables à la date  $K_\ell$  et  $q_m$  de la gamme  $i_m$  livrables à la date  $K_m$ . Soit  $i$  la gamme (ou lots) agrégeant les 2 informations  $\ell$  et  $m$ .



Le programme MT qui travaille avec les gammes-types  $i$ , va pousser la livraison de  $q_\ell$  pièces à la date  $K_\ell$  et de  $q_m$  pièces à la date  $K_m$ .

D'après les hypothèses d'agrégation, les gammes  $i_\ell$  et  $i_m$  sont très voisines et les critères de priorité de lancement en fabrication dans un sous atelier  $\alpha$  seront basés sur les dates de livraison.

Considérons un stock  $\alpha$  et la quantité  $Y(\alpha, i, K)$  calculée par le programme d'optimisation linéaire. La transformation de cette quantité en quantité  $Y(\alpha, i_\ell, K)$  et  $Y(\alpha, i_m, K)$  est liée aux contraintes suivantes dites contraintes de désagrégation :

$$1 : X(\alpha, i_\ell, K) = X(\alpha, i_\ell, K-1) + \rho(i, \alpha-1) Y(\alpha-1, i_\ell, K-1) - Y(\alpha, i_\ell, K)$$

$$2 : X(\alpha, i_m, K) = X(\alpha, i_m, K-1) + \rho(i, \alpha-1) Y(\alpha-1, i_m, K-1) - Y(\alpha, i_m, K)$$

$$3 : X(\alpha, i_\ell, K) + X(\alpha, i_m, K) = X(\alpha, i, K)$$

$$4 : Y(\alpha, i_\ell, K) + Y(\alpha, i_m, K) = Y(\alpha, i, K)$$

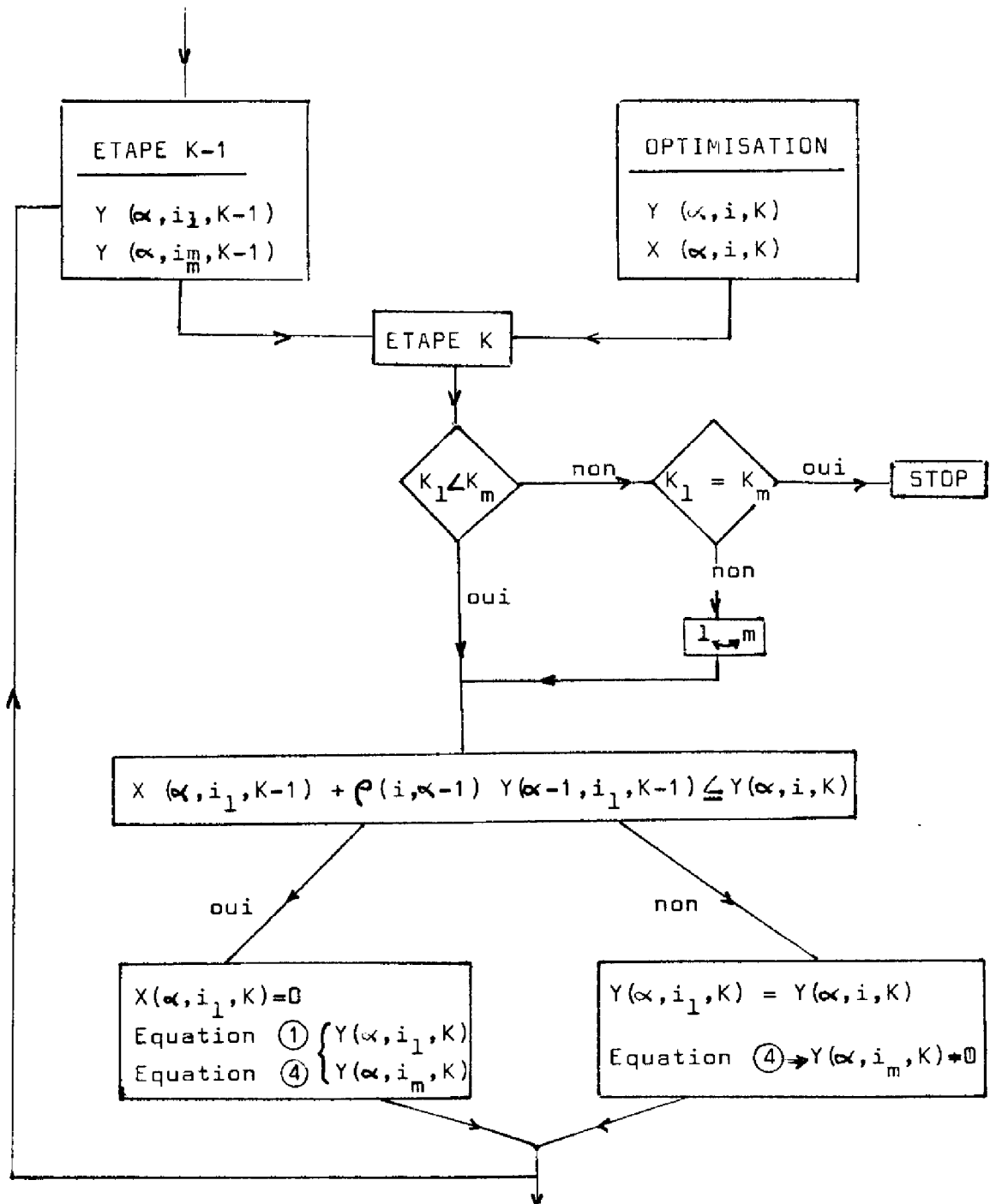


Figure 3-6 : Organigramme d'une itération de la désagrégation d'une gamme  $i$  en deux produits réels  $i_1$  et  $i_m$ .

$$K_e < K_m \Rightarrow \text{Si } X(\alpha, i_e, K-1) + \rho(i, \alpha-1) Y(\alpha-1, i_e, K-1) \leq Y(\alpha, i, K)$$

$$\text{alors } X(\alpha, i_e, K) = 0$$

$$\text{donc } Y(\alpha, i_m, K) = Y(\alpha, i, K) - Y(\alpha, i_e, K)$$

$$\text{Si } X(\alpha, i_e, K-1) + \rho(i, \alpha-1) Y(\alpha-1, i_e, K-1) > Y(\alpha, i, K)$$

$$\text{alors } X(\alpha, i_e, K) > 0$$

$$\text{donc } Y(\alpha, i_m, K) = 0$$

Cette phase de désagrégation est représentée sur un organigramme fig. 3-6. Le calcul des quantités  $Y(\alpha, i_e, K)$  et  $Y(\alpha, i_m, K)$  s'effectue de manière itérative sur l'horizon  $[1, T]$

### 3-3-5 - Recherche des machines critiques

- Le choix des postes critiques étant assez arbitraire, il nous faut agir avec prudence et partir d'un sous-ensemble de départ suffisamment grand. Les postes non-critiques seront éliminés peu à peu.

L'ensemble des postes est caractérisé par la présence de nombreux postes manuels et de postes très particuliers affectés à une série très précise. Les essais sur ordinateur ont pour premier but l'élimination des postes redondants et non critiques en même temps que la mise au point des paramètres principaux.

- L'estimation des temps d'occupation des postes par chaque produit fait également partie de l'analyse de la chaîne de fabrication. Temps élémentaires, temps normaux, temps standards, temps synthétiques, temps précalculés, temps statistiques, ..., autant de méthodes et d'approximations qui ponctuent la recherche des temps de transit. D'une manière générale, on peut décomposer les temps de fabrication en les temps suivants :

$t_1$  - temps opératoire : ces temps précalculés figurent dans les gammes dans le but de la gestion comptable.

$t_2$  - Temps de transport : il peut arriver qu'un transport ait lieu d'un poste à un autre.

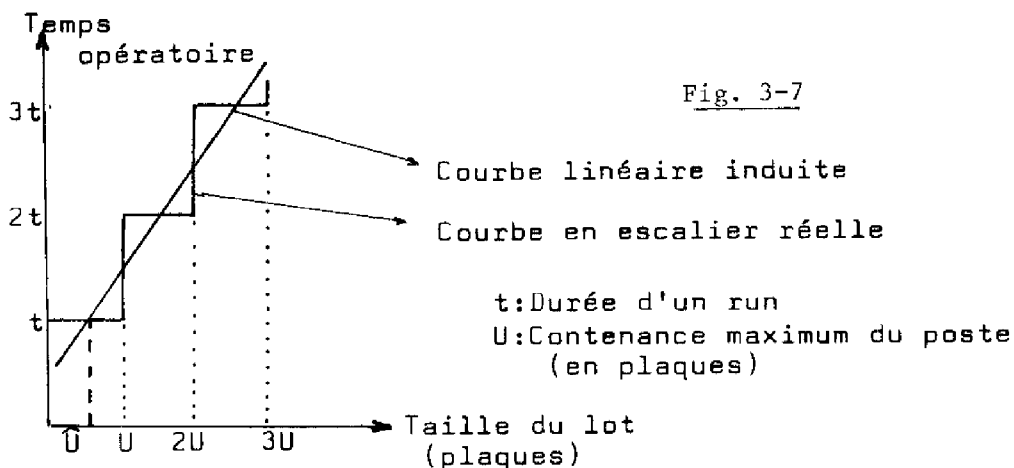
$t_3$  - Temps d'inspection : un examen de la qualité et de la quantité est parfois nécessaire à la suite d'une opération élémentaire

$t_4$  - Temps de réglage : un travail préparatoire sur le poste est souvent nécessaire quand on change de produit à usiner.

$t_5$  - Temps de stockage : Retard dû à un contrôle ou à une interruption.

Ces temps peuvent être combinés par simultanéité et on peut également en définir d'autres [13] (cf. F & L Gilbreth)

Le temps  $t_1$  se déduit généralement automatiquement du temps unitaire (ou aux 100 pièces) fourni dans les gammes par proportionnalité. Certains postes ne possèdent pas malheureusement cette propriété de linéarité. Par exemple un poste de cuisson des substrats unitaires a une contenance donnée et les temps unitaires précalculés tiennent compte du pourcentage moyen d'occupation d'un four, donc dépendent de la taille moyenne des lots en transit (fig. 3-7). Le calcul de la taille idéale du lot en transit dans un atelier est un problème annexe à la planification mais d'une grande importance à l'intérieur d'un système de gestion intégrée.



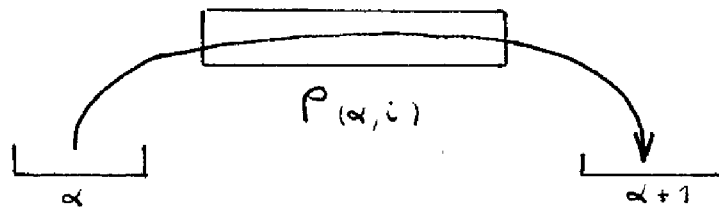
REMARQUE :

Ce problème de recherche d'une taille de lot idéale est lié au problème du lot optimal ("Batch size optimization", Gavett), problème qui ne s'est pas posé avec acuité aux CIH.

Les quantités  $F_{i\beta}$  définies dans le modèle dépendent donc d'un grand nombre de paramètres et on doit garder à l'esprit l'aspect stochastique de leur évaluation aspect qui les lie à un éventuel contrôle statistique des moyens de production.

Quant aux quantités  $CAP(\beta, K)$ , elles se déduisent de l'activité maximum d'un poste sur une période en multipliant cette activité par un taux représentant l'activité réelle moyenne du poste. Ce taux sert à amortir perturbations et aléas de fabrication.

3-3-6 - Calcul des rendements de fabrication



La technologie de fabrication des CIH étant assez poussée, les normes de qualités montrant une grande sévérité de la part des clients, les déchets de fabrication sont par conséquent assez importants. L'évaluation de ces déchets dépend également d'un grand nombre de paramètres, allant de la bonne vue de l'opératrice à la qualité du verre époxy de base. Le fichier  $P_{i\alpha}$  est donc un fichier statistique qui doit être surveillé en permanence (cf. § 1-3-2)

Si des moyennes précalculées annuellement existent dans les fichiers gammes, aucune évaluation des écarts-types de ces paramètres n'est disponible à l'usine et le vu des suivis de pièces montre que ces écarts sont généralement élevés d'où la grande perte d'informations perçues dans cette donnée.

### 3-3-7 - Coûts de fabrication

Parmi l'ensemble des coûts liés à la production, il nous faut extraire ceux qui sont significatifs pour le MT.

On distingue généralement coûts "comptables" et coûts "opérationnels". Les coûts comptables sont calculés à partir des principes de comptabilité qui sont le fruit de longues années d'expérience et sont, de plus, fortement influencés par la tradition. Au cours de ces dernières années, les comptables ont eu tendance à faire des coûts des éléments de contrôle des décisions de production sans se soucier trop d'adapter la définition et le calcul de ces coûts à l'évolution du système à contrôler. En effet, si le précalcul des coûts directs et indirects associés à des tâches précises ne dépend pas du fonctionnement de l'usine, la répartition des frais généraux est par contre liée au contrôle global de la production donc à la planification.

Les coûts opérationnels varient eux d'une époque à l'autre et ils peuvent reposer sur un critère du type : les coûts représenteront les sorties effectives d'argent, c'est-à-dire l'argent frais réellement déboursé ou les manques à gagner.

Les coûts liés à la gestion MT peuvent grossièrement se résumer d'après le § 2-5 aux coûts suivants :

- C<sub>I</sub> - coûts de vente: liés à la valeur intrinsèque de chaque produit type et à l'importance relative de la satisfaction de chaque client.
  
- C<sub>II</sub> - coûts d'immobilisation du capital : immobilisation dans les stocks, manque à gagner lié à une mauvaise utilisation du capital.
  
- C<sub>III</sub> - coûts de production directs : coûts d'embauche et de débauche de personnel, amortissement des machines critiques, réglage des machines.



L'évaluation de ces différents coûts reste très imprécise. Certains comme les coûts d'en-cours sont relativement simples à chiffrer. Pour chaque couple  $(i, \alpha)$ , on peut raisonnablement évaluer une valeur  $v(i, \alpha)$  de la pièce correspondant à la gamme  $i$  au niveau du stock  $\alpha$ . D'autres comme les coûts de risque de rupture de stock ( $C_2^1$ ) sont liés à la politique même choisie par le planificateur moyen terme et peuvent donc faire l'objet d'un ajustement à l'intérieur du programme linéaire. De plus amples détails sur ces problèmes d'ajustement des coefficients de la fonction coût seront donnés au § 3-5-2.

### 3-3-8 - Modèle informatique général

Reprenons les principaux paramètres de la matrice des contraintes :

$N\alpha$ = nombre de sous-ateliers	$N\alpha = 4$
$NI$ = nombre de produits	$NI = 20$
$NK$ = nombre de périodes	$NK = 8$
$N\beta$ = nombre de postes critiques	$N\beta = 12$

Nous aboutissons à une matrice de taille (716,880) répartie comme suit : 596 inégalités et 120 égalités (fig. 3-8)

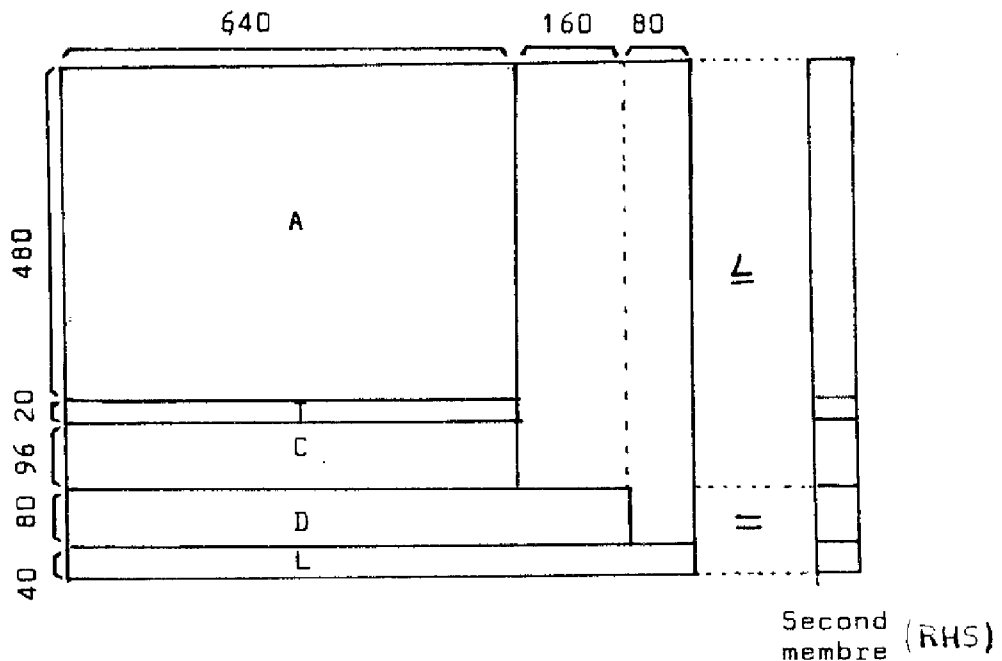


Fig. 3-8

Nous donnons en annexe le programme PL1 de génération automatique de cette matrice permettant sa manipulation et son traitement par programmation linéaire.

Les entrées principales du problème sont :

- le carnet de commandes  $\{(XC(i,D), D)\}$  ensemble des couples déterminant une sous-commande interne à une gamme  $i$ .
- l'état initial de l'atelier,  $\{XO(\alpha, i)\} \forall i$  qui sera difficile à prendre en compte vu le caractère à priori fictif des stocks interateliers . (La structure de l'atelier doit s'adapter au modèle en conséquence)
- les taux de charge  $F_{i\beta}$  rentrés sous forme d'une matrice (20,12) et les capacités maxi CAP  $(\beta, K)$ . (Ces derniers seront fixes pour tout  $K$  au départ et feront l'objet de modifications)
- les rendements  $P_{i\alpha}$  rentrés sous forme d'une matrice (20,4) également modifiables.
- les coefficients de coût, paramètres essentiellement actifs.
- les niveaux de stock de référence  $M(\beta, K)$  entrés dans le second membre RHS (D)

Les sorties du programme sont les variables et activités des variables d'écart des inégalités dans l'état optimal.

### 3-3- 9 - Sorties du programme

Les résultats de l'optimisation linéaire sur un exemple réel sont montrés en partie sur le tableau 3-9. Exemple réel, car constitué des paramètres réels de l'atelier et d'entrées décrivant un cas de

APSX/370 V143

MPSGE EXECUTION

PLANS DE CHARGE

SEMAINE	KASPE	KLINC	LASER	SODDI	SODDI	DOREZ
1	.24	.75	1.00	.51	.33	1.00
2	.20	.02	1.00	1.00	.09	.47
3	.14	.03	1.00	1.00	.10	.47
4	.17	.01	1.00	1.00	.16	.56
5	.30	.14	1.00	1.00	.07	.64
6	.45	.01	1.00	1.00	.	.51
7	.52	.29	1.00	1.00	.	.75
8	.75	.87	1.00	1.00	.51	.64

LIVRAISONS MENSUELLES

PRODUIT	SEMAINE 4	SEMAINE 8	DEMANDE (* 100 pièces)
SNIAS1	5.7	7.7	7.8
SNIAS2	4.8	6.4	6.4
SNIAS3	4.0	4.0	4.0
SNIAS4	2.8	2.8	2.8
SFENA1	3.7	4.0	4.0
SFENA2	7.3	10.0	10.0
SOREME	1.0	2.0	2.0
LCT001	2.5	4.0	4.0
LCT002	2.8	4.0	4.0
LCT003	2.0	4.0	4.0
LCT004	2.0	4.0	4.0
LCT005	2.0	4.0	4.0
FAS001	2.0	2.0	2.0
FAS002	2.0	2.0	2.0
SERE01	.5	.5	.5
SERE02	.5	.5	.5
SERE03	.5	.5	.5
AOIP01	2.0	.5	.5
AOIP02	1.6	10.0	10.0
BULLT9	100.0	1.6	10.0
		200.0	200.0

Tableau 3-9

fabrication, carnet de commandes état initial de l'atelier, données que nous avons collectées sur place avec l'aide des responsables de la fabrication.

Grâce au modèle, on peut donc visualiser facilement à l'optimum :

- 1 - l'ensemble des variables lancements  $Y(\alpha, i, K)$ . Il est possible d'isoler le plan de fabrication de la première semaine :  $Y(\alpha, i, 1)$
- 2 - le plan de charge de chaque poste  $m_p$  chaque semaine, de la manière suivante :

SEMAINE K

Poste :  $m_p$

famille n° i  $\rightarrow$   $q_i K(\beta) = F_{i,p} \cdot Y(\alpha, i, K)$   
(cf. annexe)

Le tableau 3-9 montre les sorties de MPSX traduites en plan de charge pour les semaines 1 à 8 en considérant les pourcentages d'occupation de chaque poste pendant chaque période.

- 3 - l'état du stock final montre quelles commandes sont satisfaites et à quelle date. ("LIVRAISONS MENSUELLES").

Les premiers résultats apparents à l'étude des valeurs sorties par le programme concernant le plan de charge de l'atelier : certains postes comme le laser ou la soudure Tosokhu sont saturés sur l'ensemble de l'horizon alors que certains comme la soudure globale des circuits étamés ne sont jamais chargés à plus de 35 % de leur capacité maximale. Une première réaction consiste donc à vérifier dans la réalité les goulots d'étranglement constitués par les postes saturés.

On remarque également que toutes les livraisons sont satisfaites la semaine 8 à l'exception de l'avant-dernier produit.

Pour de plus amples détails sur les résultats obtenus en cours d'étude, nous renvoyons le lecteur aux 3-5 ainsi qu'en annexe n° II.

### 3-4 - APPLICATION A D'AUTRES ATELIERS

Les hypothèses restreignant le champ d'application du modèle permettent néanmoins d'envisager des solutions proches pour des ateliers divers.

Nous avons eu la chance de pouvoir profiter d'un autre cadre d'application industrielle à l'intérieur de l'usine RTC Evreux, (la volonté de la Direction d'améliorer la planification ne se limitant pas aux seuls circuits hybrides)

L'atelier de fabrication des circuits imprimés professionnels d'Evreux qui nous a été proposé comme deuxième support d'application, montre de nombreuses similitudes avec le précédent :

- fabrication du même type
- produits fragiles et coûteux
- postes automatisés partiellement

Nous allons exposer rapidement les caractéristiques originales de l'atelier ainsi que les difficultés rencontrées dans le processus d'adaptation du modèle.

#### 3-4-1 - Description de la fabrication des c.i.

L'éclatement des plaques de verre en circuits imprimés clients se fait à partir des caractères suivants dans l'ordre chronologique de fabrication :

- surface des plaques vierges (formats). On trouve 16 types de formats différents ;
  
- découpe des formats en circuits : chaque format ou ébauche est découpé selon une loi propre au circuit commandé.  
Exemple : 002 A004 signifie 4 x 2 circuits découpés dans un format de type A.
  
- métallisation des trous : réalisée (TM) ou non réalisée (TNM)
  
- 3 types de circuits : SF : simple face  
DF : double face  
MUL : multicouche
  
- 2 types d'exposition : Photo-riston  
Sérigraphie
  
- 3 types de métaux conducteurs utilisés :  
Sn Pb  
Au  
Cu
  
- le schéma lui-même du circuit

La combinaison de toutes ces options successives conduit à un nombre de classes très grand. Dans la réalité, plus de 500 circuits différents circulent simultanément dans l'atelier. Ces circuits peuvent être regroupés de différentes manières suivant la précision que l'on désire garder sur les paramètres du modèle. La fig. 3-10 montre l'importance relative moyenne de chacune des familles, pour reprendre le vocabulaire du § 3-3-4.

Une particularité de cette fabrication reste la petite taille des commandes. Le service des lancements s'organise de la manière suivante pour lancer les nouvelles commandes en atelier :

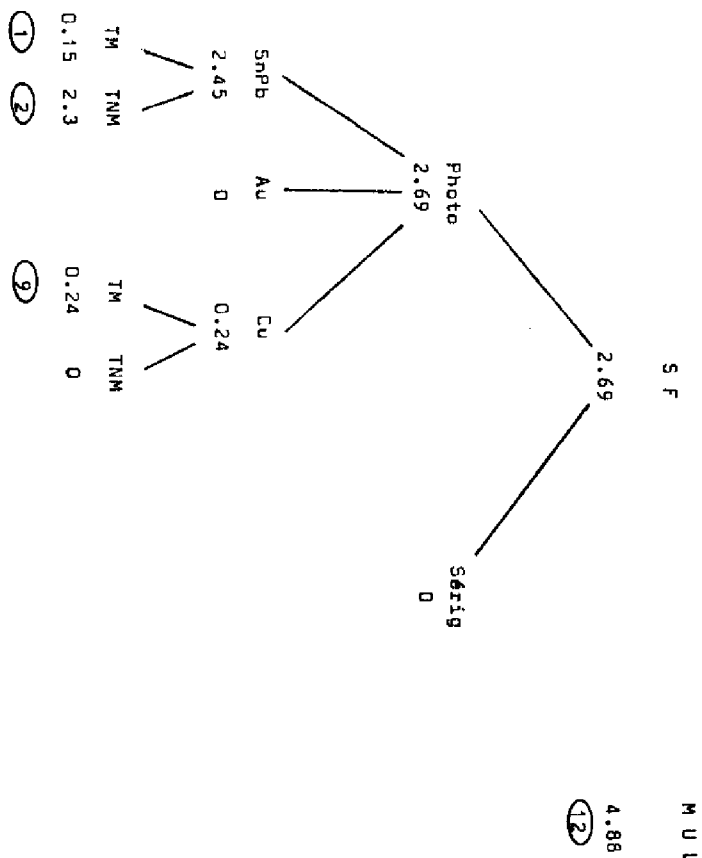
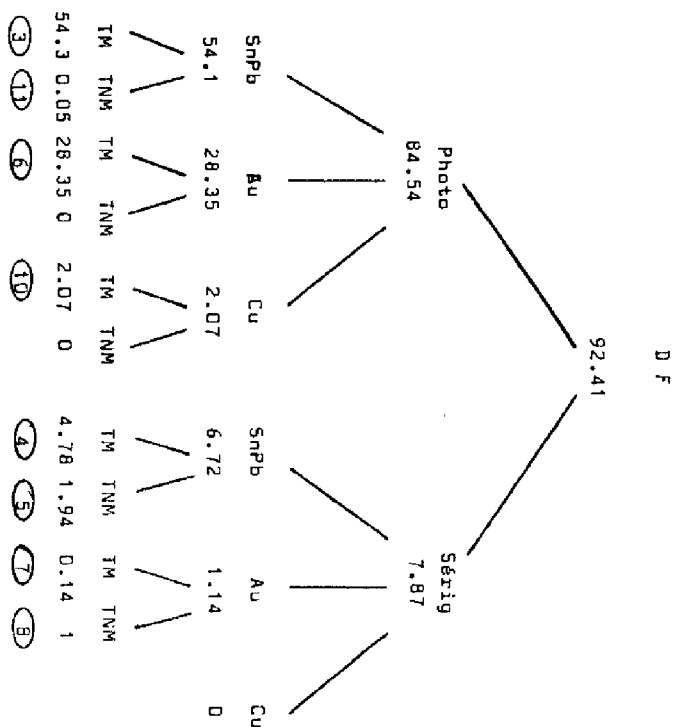


Fig. 3-10

Volume des différentes fabrications en pourcentage.  
Définition des familles.



- Soit  $XC(i)$  le nombre de circuits  $i$  commandés. On considère un rendement moyen de 85 % déterminant le nombre de circuits à lancer  $XC'(i) = \frac{XC(i)}{0,85}$ .  
A  $i$  correspond un type  $xFy$  de format  $\frac{XC(i)}{0,85} \times \frac{1}{x.y}$  donne une borne inférieure du nombre entier minimum de formats  $F$  à lancer. Ces formats sont regroupés en lots comportant au plus 200 unités. Souvent la commande est telle que le nombre de formats à lancer n'atteint pas 200 ou un entier multiple de 200. Il s'ensuit que la plupart des lots ont des tailles très variables. D'où l'impossibilité de prendre le lot comme unité de transit.

Que choisir alors ? Trois types d'unité sont apparentes et nous en montrons ici les avantages et inconvénients :

- le circuit imprimé lui-même : pour de nombreux postes, il constitue l'unité idéale car adaptée à des temps linéaires par rapport à la pièce. Certains postes travaillent par batches, c'est-à-dire par quantité fixe de pièces ou même de formats. C'est le cas de la perceuse automatique et des chaînes automatiques de métallisation.

- le format : mêmes remarques que précédemment sur les temps de transit non linéaires.

- le  $dm^2$  : cette unité de surface de circuit est couramment utilisée aux c.i. pour effectuer des statistiques. Les non-linéarités apparaissent surtout pour les postes d'usinage et de sciage, car les temps dépendent là de la forme du circuit et non de sa surface.

Un exemple de statistiques comparées pour 5 lots différents appartenant à une même famille (types de fabrication vus plus haut qui nous servirons à constituer le fichier "gammes agrégées") montre bien la dispersion non linéaire du chargement de certains postes, ici le bain AUTO-1 entièrement automatisé. Les temps statistiques en  $h/dm^2$  accusent par conséquent une dispersion fâcheuse directement rapportée sur le calcul des  $F_{iq}$  (tableau 3-11).



Lots	1	2	3	4	5
Surface circuit (dm <sup>2</sup> )	3.45	2.56	2.56	2.56	6.05
Nb. circuits/ébauche	3	9	4	3	2
Nb. ébauches/lot	180	36	80	79	200
Nb. ébauches/bain	20	8	12	20	16
Nb. bains/Lot	9	5	7	4	13
Temps en h/m <sup>2</sup>	0.08	0.089	0.135	0.107	0.086

Tableau 3-11 : Comparaison des temps/dm<sup>2</sup> pour un poste non linéaire : le bain automatique (Auto-1)  
Le temps opératoire fixe est de 0.16h/bain.

### 3-4-2 - Adaptation du modèle

Comme nous venons de le voir, l'adaptation de ce nouvel atelier au modèle de planification moyen terme construit sur la base de l'atelier des CIH se heurte à deux importantes difficultés :

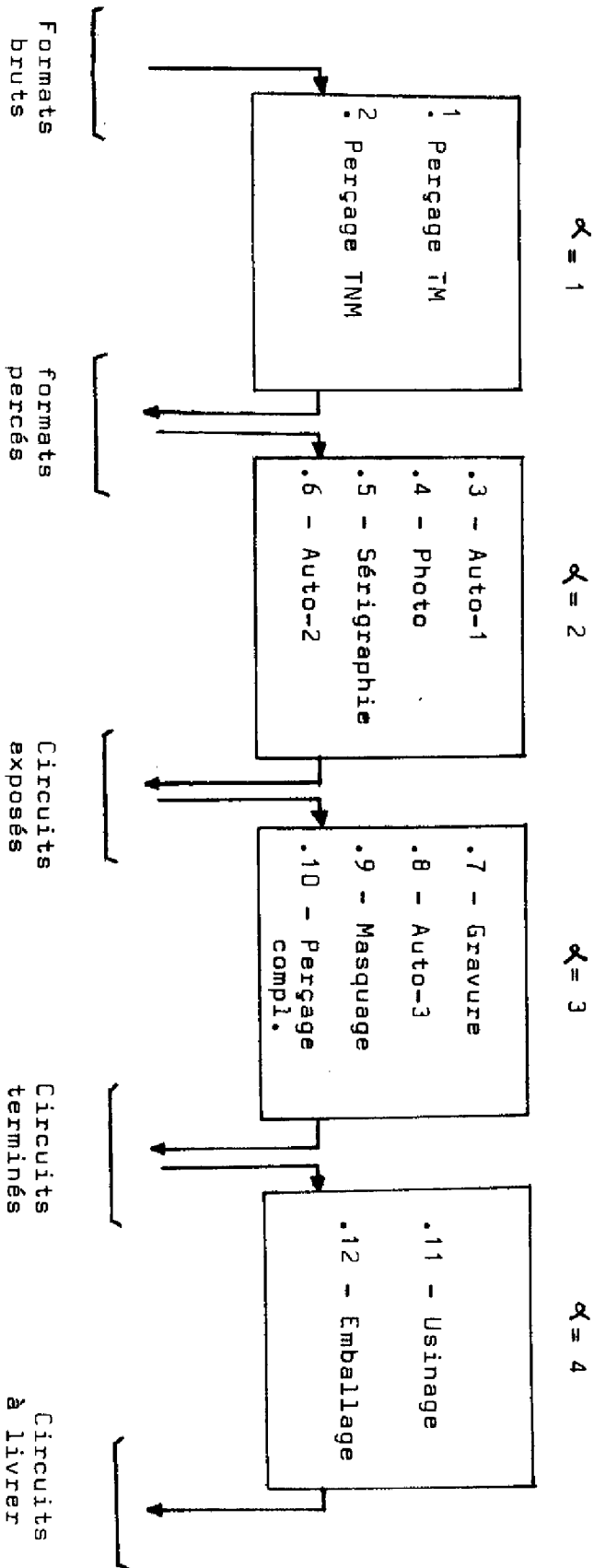
- le très grand nombre de circuits différents circulant simultanément dans l'atelier (plus de 500) rend la phase "agrégation des gammes" impérative. La possibilité de décrire la fabrication par une combinatoire de différentes caractéristiques (fig. 3-10) nous a permis de définir un certain nombre de familles à l'intérieur desquelles les gammes réelles de fabrication sont très semblables. Ce fichier "familles", qui deviennent les gammes du modèle, est détaillé en annexe II.

Les pourcentages indiqués sur la figure 3-10 montrent des écarts relatifs très grands entre l'importance de ces familles. Une famille caractérisée par "DF. Photo. SnPb. TM" regroupe 54 % de la fabrication, donc à priori un grand nombre de clients différents, alors que par exemple, celle notée "DF. Sérigraphie. Au. TM" ne représente que 0.14% du volume total de la fabrication.

Cette agrégation de 500 produits en 12 familles augmente considérablement la perte d'informations subie au niveau moyen terme et rend du même coup la phase "désagrégation" des familles en gammes beaucoup plus lourde que dans le cas de l'atelier des circuits hybrides de taille plus modeste. Malgré tout, l'existence de données agrégées statistiques fixant des temps opératoires et des rendements de fabrication propres à ces familles nous a incités à modéliser la fabrication de cette manière.

- le problème de la cohérence des unités s'est également posé avec plus d'acuité que dans l'étude précédente. Les statistiques disponibles concernant les familles de produits sont chiffrées en heures/dm<sup>2</sup>. Conserver cette unité impose d'utiliser comme unité de transit du modèle le dm<sup>2</sup> de

Figure 3-12 : Décomposition de l'atelier des circuits imprimés



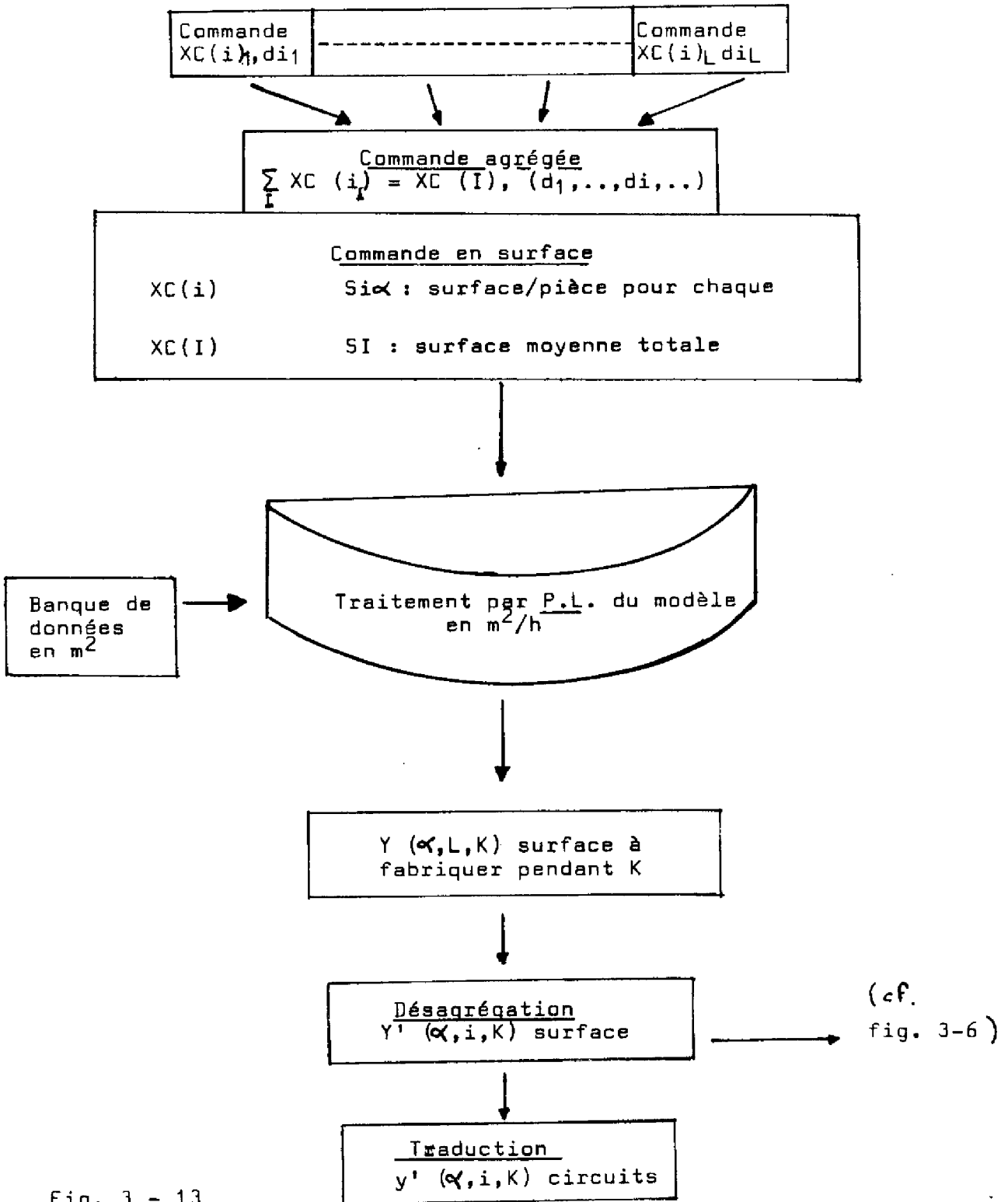


Fig. 3 - 13

circuit dont nous avons décrit les inconvénients au paragraphe précédent. Cette unité doit rester une unité de calcul donc interne au programme. Pour conserver au modèle son but pratique, il faut rajouter en entrée et en sortie du programme linéaire des phases de traduction du carnet de commandes et des ordres deancements  $Y(\alpha, i, K)$  par rapport à une unité pratique, c'est-à-dire, la pièce ou le lot. Ce processus de traduction des unités se rajoute au processus de désagrégation comme nous le montrons sur l'organigramme de la fig. 3-13.

En conclusion, nous avons abouti à une structure de 4 sous-ateliers en série et nous avons conservé 12 postes critiques, chaque poste critique étant propre à un seul sous-atelier (pas de bouclage). Le modèle de l'atelier est présenté sur la figure 3-12.

La période d'échantillonnage des ordres deancements est d'une semaine, ce qui conduit à un horizon d'optimisation de 6 à 8 semaines.

### 3-4-3 - Sorties du programme linéaire

La taille informatique de ce second exemple est plus faible que la première :

NI : 12	}	446 contraintes/520 variables
N $\alpha$ : 4		
NK : 8		
N $\beta$ : 12		

Des premiers essais ont été effectués en utilisant un carnet de commandes passées comptabilisées sur 6 mois. Des données statistiques en heures/m<sup>2</sup> disponibles ont été utilisées. Les fichiers gammes, postes critiques et taux de charge sont détaillés en annexe n° II.

Le tableau 3-14 décrit le plan de charge et le suivi des livraisons sur un essai type. De la même façon que pour les circuits hybrides,

MPSX/370 V113

MPSX EXECUTION

PLANS DE CHARGE

SEMAINE	PERC1	PHOTO	AUTO3	PERC3	USIOW	EMBAL
1	1.00	.69	.28	.94	.75	.95
2	1.00	1.00	.33	1.00	.60	.91
3	.86	1.00	.05	1.00	.57	.77
4	.87	1.00	.04	1.00	.71	.94
5	.83	1.00	.60	1.00	.75	1.00
6	.83	1.00	1.00	1.00	.55	.85
7	1.00	1.00	1.00	1.00	.61	.87
8	.57	1.00	.19	1.00	.62	.66

LIVRAISONS

PRODUIT	SEMAINE 4	6	8	DEMANDE
SN1FTMP	1.0	1.0	1.5	3.2
SN1FTMP	18.6	16.0	26.9	54.0
SN2FTMP	585.0	951.0	1170.0	1170.0
SN2FTMS	52.0	104.0	104.0	104.0
SN2FTNS	42.0	42.0	42.0	42.0
AU2FTMP	156.7	207.4	400.0	400.0
AU2FTMS	.	4.0	4.0	4.0
AU2FTNS	10.2	19.4	21.0	21.0
CU1FTMP	2.6	5.2	5.2	5.2
CU2FTMP	15.0	15.0	20.9	45.0

Tableau 3-14

des postes plus chargés que d'autres apparaissent comme la "photo" ou le "perc 3" (perçage complémentaire). le carnet de commande semble plus exigeant car sur les 10 commandes types suivies, 3 ne sont pas satisfaites à la semaine 8. Listings et résultats complets relatifs à cet atelier seront donnés en annexe. L'interprétation globale et les conclusions seront exposées au paragraphe suivant.

### 3-5 - RESULTATS ET CONCLUSIONS GENERALES

Les démarches de mise au point du programme linéaire, les résultats particuliers à la méthode (adaptation du coût et des paramètres dynamiques) et les conclusions relatives aux différents essais effectués sur données réelles seront exposés ci-dessous, conjointement pour les deux ateliers étudiés, donc nous avons vérifié la proche structure. Les listings PL1, données MPSX, fichiers propres des ateliers sont fournis en annexe n° II.

#### 3-5-1 - Mise au point du programme

L'utilisation de packages de programmation linéaire ne se fait pas de manière aveugle car le traitement de matrices de grande dimension impose une prudence toute particulière quand on a pour objectif la réduction du coût global d'exploitation d'un outil informatique.

Cette taille des matrices pouvant se limiter à moins de 1000 contraintes grâce aux différentes agrégations de paramètres et de facteurs et aux réductions successives du nombre de contraintes significatives, études déjà signalées précédemment, l'emploi de packages bruts tels que ZX3LP ou MPSX s'avère justifié.

Comment évaluer le coût d'exploitation du programme de gestion ? Différents facteurs sont à l'origine de ce coût : le temps de calcul total du traitement ainsi que la place mémoire totale utilisée par la manipulation des fichiers et les entrées-sorties du programme. En coût investi, il

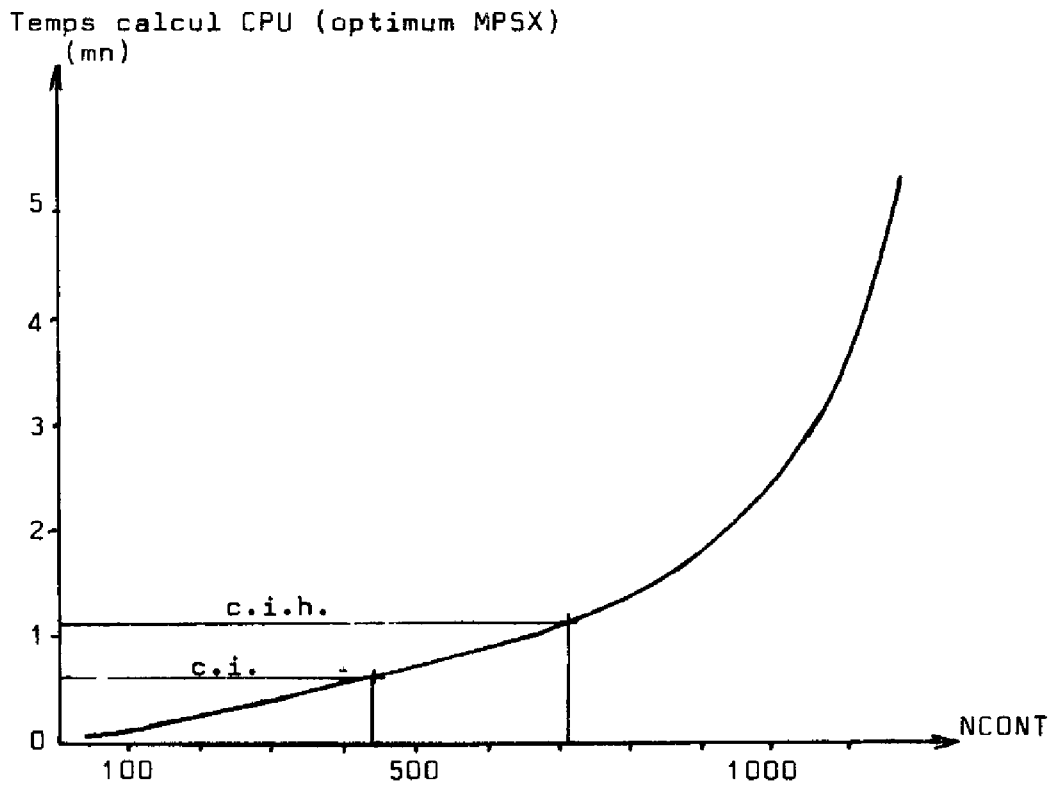


figure 3-15 : Evolution du temps de calcul  
en fonction du nombre de  
contraintes NCONT  
$$NCONT = NK((N\alpha - 1)NI + 2N\beta - N(\beta, 1)) + 3NI$$

REMARQUE : Ces temps de calcul correspondent à des fonctions  
coûts du même type (cf ci-après §3-5-2-1)



faut évaluer le coût de mise au point d'un tel outil ainsi que l'implantation d'un package volumineux (tel que MPSX) en permanence sur l'ordinateur de l'entreprise.

Ces coûts peuvent s'exprimer en fonction de la taille moyenne de l'atelier (en fonction de  $N$  ou de  $T$ ).

Tous nos essais ont été effectués sur (IBM 370/368 et les estimations que nous allons fournir doivent être transposées et extrapolées au type d'ordinateur disponible dans l'entreprise.

Sur la figure 3-15 nous montrons la variation du temps de calcul sur IBM 370 en fonction du nombre de contraintes de la matrice. La courbe est quasi linéaire pour  $NCONT \leq 1000$  puis elle prend une allure exponentielle. On voit que pour des ateliers tels que ceux étudiés à Evreux, le temps de calcul ne dépasse par 1 minute 30 secondes. La place mémoire totale utilisée par le traitement du programme par MPSX est relativement faible ( 300K pour  $NCONT \leq 1000$ ). De plus amples détails sont fournis en annexe n°II sur ces données caractéristiques de MPSX.

### 3-5-2 - Adaptation dynamique des données du modèle

Quand nous avons défini la politique de gestion propre au niveau moyen terme, nous avons fait apparaître deux phases dans le processus d'aide à la décision. Une phase d'adaptation dynamique et une phase d'optimisation statique. Ces deux phases sont en réalité simultanées car si le modèle linéaire conduit à optimiser les ordres de lancement sur un horizon fixe, les paramètres de ce modèle sont liés au processus réel et le planificateur doit connaître les réactions du programme devant les variations de ces données. Nous avons étudié certains cas particuliers d'adaptation de paramètres du modèle et nous exposons ci-dessous, les résultats positifs et négatifs obtenus.

3-5-2-1 - Les coefficients de coût

Ce sont les éléments du vecteur C,  $Z = C X$  représentant le critère du programme linéaire à maximiser.

Il est intéressant d'étudier les performances du programme aux variations apportées à la partie de ce vecteur C qui s'applique aux variables  $Y(\alpha, i, K)$  :

Ces coefficients sont liés aux équations définies § 2-4-2-2 où sont introduits les coefficients  $C_2(\beta, K)$ . D'après l'équation (XVI) :

$$C [Y(\alpha, i, K)] = \sum_{\substack{\beta \\ \text{m} \in \text{atelier } \alpha}} C_2(\beta, K) \cdot F_{i\beta}$$

Pour simplifier, nous séparons cette expression en le produit de deux expressions indépendantes :

$$C [Y(\alpha, i, K)] = w(K) \sum_{\beta} C(\beta) \cdot F_{i\beta}$$

Nous avons cherché à comparer les réactions du programme pour différentes valeurs de  $w(K)$ . Il semble tout d'abord logique que la fonction  $w(K)$  ait une allure décroissante ; il est en effet plus important de charger les machines pendant les premières semaines pour garder de la charge résiduelle destinée à répondre à d'éventuelles nouvelles commandes en fin d'horizon.

Nous avons testé les trois fonctions simples suivantes :

$$\begin{aligned} w_1(K) &= \Omega = c^k \\ w_2(K) &= \rho (9-K) \\ w_3(K) &= \nu (9-K)^2 \end{aligned}$$

Un certain nombre de remarques peuvent être faites quant au choix de la fonction  $w(K)$  :

- plus l'allure générale de la fonction coût est plate, c'est-à-dire, moins les variations des coefficients sont fortes, et plus le nombre d'itérations est grand ; donc c'est la fonction  $w_3(K) = \gamma (9-K)^2$  qui donne le temps de calcul le plus faible.

w(K)	Itérations	temps en secondes
$\Omega = 10$	1338	64
$2\gamma(9-K)$	1085	50
$\frac{(9-K)^2}{2}$	915	41

Résultats comparés sur l'atelier des c.i.

- pour garder la cohérence de la politique MT intacte, il nous faut également introduire le facteur w(K) dans les coefficients sur  $\mathcal{E}_M(\vartheta, K)$

### 3-5-2-2 - Les capacités des postes critiques

Comme nous l'avons vu, un taux d'aléa précalculé permet à la capacité d'un poste critique de varier entre deux bornes qui sont par exemple 90 % et 100 % de sa capacité maximale. Cela signifie que le décideur MT devant une commande trop exigeante ou une perturbation quelconque, peut moduler les données CAP( $\vartheta, K$ ) tout en restant compatible avec les directives du niveau LT.

Les paramètres CAP ( $\vartheta, K$ ) se retrouvent dans le second membre associé au bloc C de la matrice linéaire. La variation d'un ou plusieurs de ces paramètres agit directement sur la livraison des produits dans le stock  $\alpha_S$ , les niveaux de stock restant à peu près les mêmes.

Exemple : dans l'atelier des circuits imprimés professionnels

le poste de perçage complémentaire a une disponibilité de 40 heures par semaines. Dans la réalité du court terme, les perçage de trous métallisés, non métallisés, complémentaire s'effectuent sur les mêmes perceuses, le chef d'atelier répartissant le travail de telle façon que les disponibilités moyennes des différents postes soient :

1 - perçage TM	= 200 heures	} (au total 7 postes- hommes pour 4 ma- chines)
2 - perçage TNM	= 36 heures	
3 - perçage complémentaire	= 40 heures	

Il arrive donc fréquemment que ces capacités utilisées par le planificateur MT puissent varier. Nous montrons ci-après 2 tableaux de 2 sorties du programme, l'une effectuée avec CAP (PERC 3) = 32 heures, l'autre avec CAP(PERC 3) = 40 heures. Les variables colonnes 481 à 520 sont explicitées à l'optimum ; ce sont les variables  $E_S(i,D)$ , donc les manques à la livraison. Pour tous les produits, nous avons supposé une livraison à la semaine 4 et une livraison à la semaine 8 ( $D_1 = 4$ ,  $D_2 = 8$ ) (tableau 3-16)

### 3-5-2-3 - variation de la commande

Nous avons également étudié les réactions du programme à une forte variation du carnet de commande.

Tout d'abord, nous avons effectué un traitement avec une commande mensuelle, à livrer donc en semaine 4 et rien en semaine 8, puis un autre traitement avec la même commande en semaine 4 mais renouvelée pour le deuxième mois de l'horizon. On remarque sur le tableau 3 - 17 que les livraisons à la semaine 4 sont identiques, mais que la charge des postes est très différente. Comme on pouvait le prévoir, il n'y a pas de continuité d'un plan de charge à l'autre.

### 3-5-3 - Conclusions

Nous sommes dès lors assurés que, pour des ateliers de structure

MPSX/3770 V1.3 MPSCL EXECUTION

NUMBER	CONDITIONS	ACTIVITY	INPUT COST
928	C481	BS	50.00000-
929	C482	LL	20.00000-
930	C483	BS	50.00000-
931	C484	LL	100.00000-
932	C485	BS	50.00000-
933	C486	LL	20.00000-
934	C487	BS	50.00000-
935	C488	LL	100.00000-
936	C489	BS	50.00000-
937	C490	LL	20.00000-
938	C491	BS	50.00000-
939	C492	LL	100.00000-
940	C493	BS	50.00000-
941	C494	LL	20.00000-
942	C495	BS	50.00000-
943	C496	LL	100.00000-
944	C497	BS	50.00000-
945	C498	LL	20.00000-
946	C499	BS	50.00000-
947	C500	LL	100.00000-
948	C501	BS	50.00000-
949	C502	LL	20.00000-
950	C503	BS	50.00000-
951	C504	LL	100.00000-
952	C505	BS	50.00000-
953	C506	LL	20.00000-
954	C507	BS	50.00000-
955	C508	LL	100.00000-
956	C509	BS	50.00000-
957	C510	LL	20.00000-
958	C511	BS	50.00000-
959	C512	LL	100.00000-
960	C513	BS	50.00000-
961	C514	LL	20.00000-
962	C515	BS	50.00000-
963	C516	LL	100.00000-
964	C517	BS	50.00000-
965	C518	LL	20.00000-
966	C519	BS	50.00000-
967	C520	LL	100.00000-

CAP(10) = 40h

CAP(10) = 32h

Tableau 3-16

MPSX/370 V1M3

MPSCL EXECUTION

OCCUPATION DES POSTES

SEMAINE	PERC1	PHOTO	AUTO3	PERC3	USINA	EMBAL
1	1.00	.88	.28	.94	.64	.88
2	1.00	1.00	.32	1.00	.61	.80
3	.84	1.00	.12	1.00	.70	.80
4	.89	1.00	.	1.00	.59	.94
5	.90	1.00	.58	1.00	.83	.97
6	.93	1.00	1.00	1.00	.63	.94
7	.81	1.00	1.00	1.00	.56	.88
8	.39	1.00	1.00	1.00	.61	.90

LIVRAISONS

FAMILLE	SEMAINE 4	6	8	DEMANDE
1: SN1FTMP	1.0	1.0	1.0	3.2
2: SN1FTMP	18.8	23.4	27.4	54.0
3: SN2FTMP	585.0	937.1	1170.0	1170.0
4: SN2FTMS	52.0	104.0	104.0	104.0
5: SN2FTNS	21.0	42.0	42.0	42.0
6: AU2FTMP	160.0	214.6	400.0	400.0
7: AU2FTMS	2.0	2.0	4.0	4.0
8: AU2FTNS	10.5	12.9	21.0	21.0
9: CU1FTMP	.	1.5	5.2	5.2
P: CU2FTMP	15.0	19.7	20.9	45.0



Livraisons semaine 4 + semaine 8 

Tableau 3-17

Livraisons semaine 4 

1	.99	.86	.28	.91	.64	.86
2	.94	1.00	.32	1.00	.54	.75
3	.78	1.00	.12	1.00	.64	.81
4	.90	1.00	.82	.59	.74	1.00
5	.90	1.00	.	.	.26	.26
6	.94	1.00	1.00	.93	.	.
7	1.00	1.00	1.00	1.00	.	.
8	.30	1.00	1.00	1.00	.	.

LIVRAISONS

PRODUIT	SEMAINE 4	6	8	DEMANDE
SN1FTMP	1.0	1.0	1.0	1.0
SN1FTMP	19.8	27.0	27.0	27.0
SN2FTMP	585.0	585.0	585.0	585.0
SN2FTMS	52.0	52.0	52.0	52.0
SN2FTNS	21.0	21.0	21.0	21.0
AU2FTMP	160.0	200.0	200.0	200.0
AU2FTMS	2.0	2.0	2.0	2.0
AU2FTNS	10.5	10.5	10.5	10.5
CU1FTMP	.	2.6	2.6	2.6
CU2FTMP	15.0	22.5	22.5	22.5

et de taille équivalentes à celles des deux cas réels étudiés, l'utilisation d'une optimisation linéaire des lancements à moyen terme de la fabrication est pratique et relativement peu coûteuse. L'étude de faisabilité a été dépassée dans le sens où nous avons travaillé dans un contexte très concret visant l'implantation prochaine d'un tel outil. Les paramètres significatifs du modèle ont été mis en évidence et leur caractère dynamique exploité dans la mesure où doivent se greffer autour du module planification moyen terme les fonctions de contrôle de la qualité, d'ordonnancement très court terme de la fabrication et de gestion des besoins matières.

L'utilisation pratique des résultats du programme s'est heurtée aux problèmes suivants :

- la réactualisation du planning en cas de dérive des prévisions. L'utilisation en bouclé fermée d'un tel outil ne peut se faire que par l'intermédiaire du niveau inférieur qui suit la fabrication on line, le moyen terme ne faisant que fixer des consignes optimales statiquement.

- La transformation des valeurs brutes du programme exprimées dans une unité continue en des ordres de lancement concrets, c'est-à-dire, tel lot de tel produit doit être fabriqué ou non cette semaine dans tel sous atelier. La quantité  $Y(\alpha, i, K)$  en effet ne signifie rien pour le chef d'atelier, a fortiori si elle est exprimée en  $m^2$  comme dans le cas des circuits imprimés. La nécessité d'un programme de transformation et d'adaptation pratique des résultats couplé du programme de désagrégation (§ 3-3-4) des games-types alourdit le niveau moyen terme.

On peut néanmoins comparer rapidement le plan de charge programmé par notre modèle devant un carnet de commandes et un état initial des en-cours réels avec un plan de charge moyen terme actuel sur ces mêmes données. Cela est possible au département des circuits imprimés où un planning moyen

terme sur 2 mois est calculé chaque semaine et répartit les charges sur chaque poste globalisées par famille (type 2F, Au, photo., etc... cf § 3-4-1)

La comparaison des deux planning est montrée sur le tableau 3-18.



MPSX/570 V143

MPSCL EXECUTION

OCCUPATION DES POSTES

SEMAINE	PÉREI	PHOTO	AUTO3	PENC3	USINA	EDBAL
1	1.00	.76	.22	.94	.56	.94
2	1.00	1.00	.25	1.00	.54	.89
3	1.00	1.00	.42	1.00	.62	.87
4	.92	1.00	1.00	1.00	.57	.94
5	.80	1.00	.99	1.00	.68	1.00
6	.93	1.00	.	1.00	.68	1.00
7	.36	1.00	.10	1.00	.47	1.00
8	.	.45	1.00	1.00	.39	.64

LIVRAISONS

FAMILLE	SEMAINE 4	6	8	DEMANDE
1: SN1FTMP	1.5	1.5	3.2	3.2
2: SN1FTMP	24.1	25.4	42.6	54.0
3: SN2FTMP	500.0	665.8	1000.0	1000.0
4: SN2FTMS	52.0	101.0	104.0	104.0
5: SN2FTNS	21.0	42.0	42.0	42.0
6: AU2FTMP	200.0	400.0	400.0	400.0
7: AU2FTMS	.	.	4.0	4.0
8: AU2FTNS	10.5	10.5	21.0	21.0
9: CU1FTMP	2.6	2.6	5.2	5.2
10: CU2FTMP	22.5	22.5	45.0	45.0

POSTE:PHOTO

Tableau 3-18

CAPACITE= 240.0 H

a

SEMAINE 1

FAMILLE	CHARGE	POURCENTAGE
1	.5	.0
2	12.2	.1
3	130.	.7
6	30.0	.2
10	7.1	.0

SEMAINE 2

FAMILLE	CHARGE	POURCENTAGE
3	136.	.6
6	56.5	.2
9	6.6	.0
10	40.9	.2

SEMAINE 3

FAMILLE	CHARGE	POURCENTAGE
3	103.	.4
6	121.	.5
10	15.9	.1

SEMAINE 4

FAMILLE	CHARGE	POURCENTAGE
2	.7	.0
3	119.	.5
6	120.	.5

POSTE NO: 72 01 04 ) LIBELLE: PHOTO

PERIODE	DISPONIBILITE	FAMILLE		CHARGE EN HEURES	POURCENTAGE
		NO	LIBELLE		
SEMAINE NO: 36		211	TNM 1F SNPB	7,37	3,0 %
		221	TM 1F SNPB	0,41	0,1 %
		222	TM 2F SNPB	237,60	99,0 %
		TOTAL SEMAINE		240,00	
SEMAINE NO: 37		211	TNM 1F SNPB	4,61	1,9 %
		221	TM 1F SNPB	2,39	0,9 %
		222	TM 2F SNPB	229,19	95,4 %
		224	TM SNPB TABS AU 2F	3,86	1,6 %
		TOTAL SEMAINE		240,00	
SEMAINE NO: 38		211	TNM 1F SNPB	2,43	1,0 %
		222	TM 2F SNPB	145,99	60,8 %
		224	TM SNPB TABS AU 2F	100,40	41,8 %
		TOTAL SEMAINE		240,00	
SEMAINE NO: 39		211	TNM 1F SNPB	5,15	2,1 %
		222	TM 2F SNPB	60,77	25,3 %
		224	TM SNPB TABS AU 2F	182,70	76,1 %
		TOTAL SEMAINE		240,00	

3-18

b

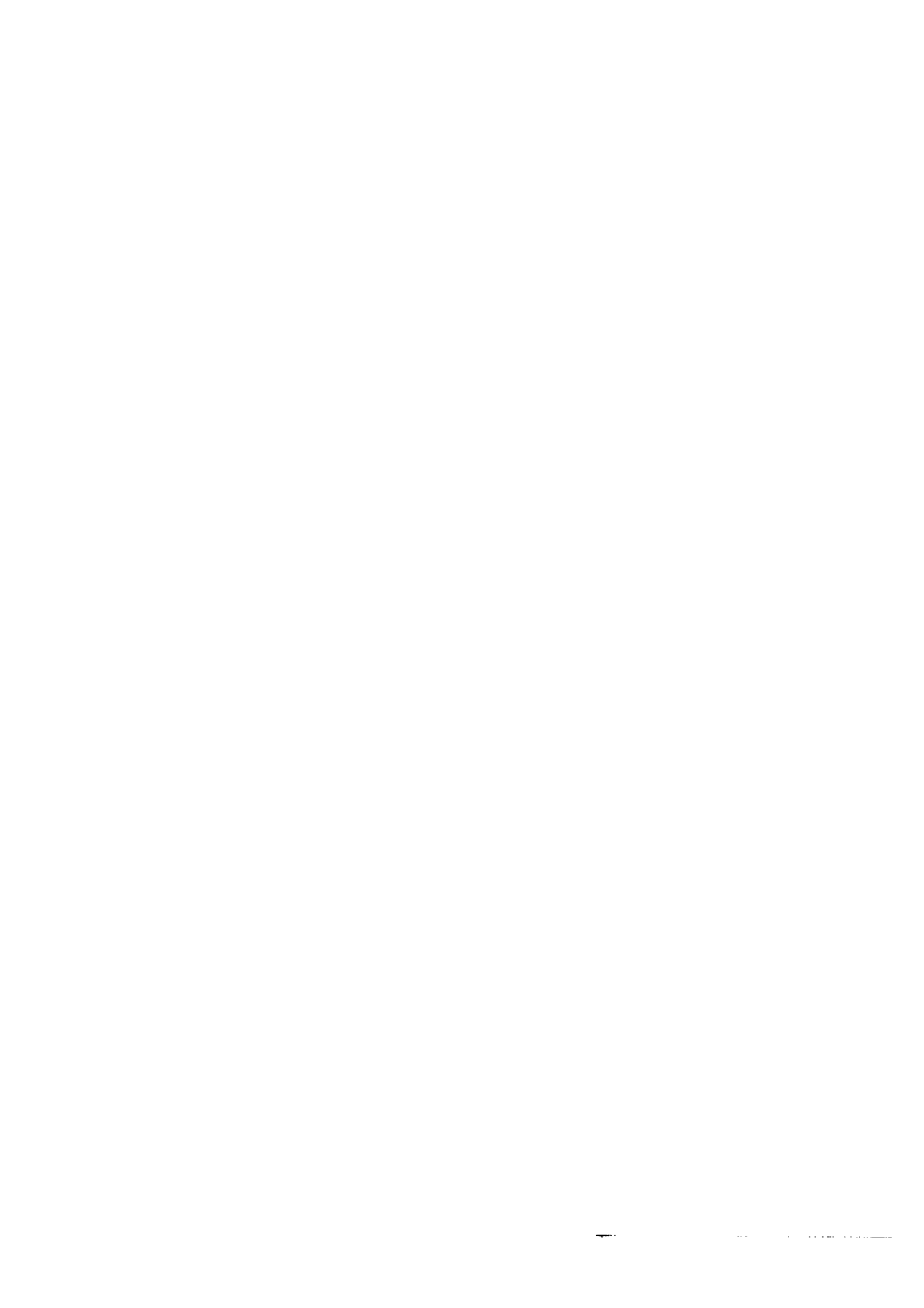
Comparaison des plans de charge :

- a - calculé par le modèle MT
- b - calculé à l'usine



## CONCLUSION

----



Comme nous l'avons montré au long de ce rapport, notre contribution ne constitue qu'une faible part dans le programme de recherche "automatisation intégrée". L'importance d'un cadre de recherche bien délimité, aux objectifs bien définis, est nécessaire de façon à assurer la coordination de chaque problème étudié séparément.

L'analyse du processus décisionnel hiérarchisé qui règle la vie d'un système de production a été entreprise dans l'optique "aide à la décision" à tous les niveaux et nous avons montré comment la qualité de l'information circulant d'un niveau à l'autre interagit sur le degré d'automatisation acceptable de l'outil de gestion correspondant.

La planification de la production sur un horizon moyen terme reste à notre avis l'élément le plus déterminant et le plus caractéristique du système global de gestion, car c'est à ce niveau que se définit une certaine politique propre à l'atelier et à son mode d'approvisionnement, un politique qui, par sa situation intermédiaire entre les objectifs généraux de l'entreprise et les perturbations journalières de l'atelier de fabrication, constitue un véritable tampon régulateur de la production.

En conséquence une analyse précise de la structure de l'atelier, du flux d'informations et des contraintes socio-économiques internes à l'entreprise est indispensable pour construire un modèle de cette politique adapté à la réalité.

C'est dans cette optique que nous avons tenté la modélisation d'un atelier réel en recherchant sur place avec le concours et l'expérience des différents responsables de la fabrication les données caractéristiques de cet atelier. Nous pensons avoir abouti à une structure simple contenant des informations agrégées adaptées à une planification à moyen terme, dont la politique a été basée sur une régulation de la charge des postes critiques de la fabrication. Ces postes critiques sont contrôlés à partir de stocks d'en-cours découpant l'atelier en un certain nombre de sous-ateliers indépendants. A cette décomposition spatiale correspond une discrétisation de l'horizon

de travail moyen terme. Cette schématisation de l'écoulement de la fabrication dans le parc machine devrait conduire à une amélioration du système de suivi des produits tout en donnant à l'industriel les moyens de planifier la production de manière efficace et peu coûteuse. Nous pensons que la réussite de ce projet demande un investissement dans la centralisation informatique de l'entreprise et le programme linéaire que nous avons mis au point pour optimiser cette planification moyen terme garde, malgré les nombreuses simplifications qui ont pu être faites sur deux cas d'étude particuliers, une dimension assez grande, donc un coût d'exploitation non négligeable.

L'importance, dans ces conditions, de la coopération de l'industrie à de telles recherches est mise en avant et cela, non seulement en ce qui concerne l'aboutissement de notre travail propre, c'est-à-dire l'implantation in situ d'un outil de planification moyen terme assisté par ordinateur, mais aussi pour la poursuite de tous les travaux parallèles visant l'intégration de la gestion dans la vie de l'entreprise. Nous pensons plus particulièrement au contrôle de la fabrication. Des outils de contrôle stochastique de la qualité d'une fabrication doivent être mis en place et seront connectés au modèle de planification par l'intermédiaire de paramètres définis comme des paramètres adaptatifs dynamiquement tels que les rendements de fabrication par exemple.

Un autre problème crucial directement lié à l'outil de gestion moyen terme est l'élaboration du plan de fabrication quotidien (ordonnancement d'atelier), c'est-à-dire la liaison avec le niveau inférieur.

Contrôle qualité et ordonnancement à très court terme de la fabrication sont donc à notre avis les deux objectifs les plus pressants du programme de recherche et sans leur existence, notre contribution ne peut prendre toute sa signification.

ANNEXE N° I

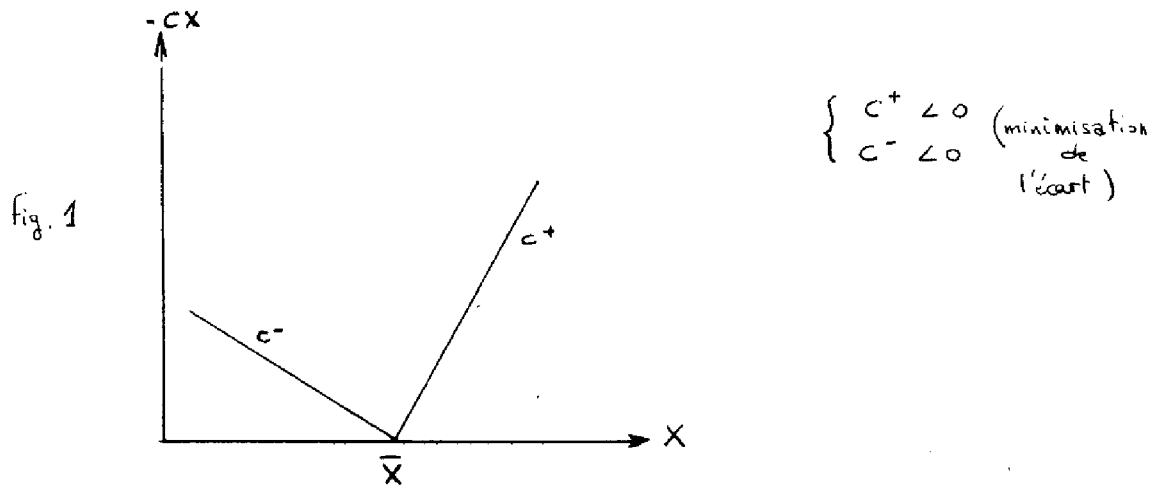




ANNEXE n° I

LINEARISATION DES COÛTS SUR LES ECARTS  
PAR RAPPORT A UNE VALEUR DE CONSIGNE :

Ce problème est lié à l'existence de coûts différents suivant qu'une variable n'atteint pas ou dépasse une valeur de consigne pour laquelle le coût associé est nul (fig. 1)



$\bar{X}$  est la valeur de consigne de fonctionnement de la variable X  
(cf. § 2-3-4-3).

$$(1) \begin{cases} X > \bar{X} \Rightarrow C(X) = c^+ (X - \bar{X}) \\ X < \bar{X} \Rightarrow C(X) = c^- (\bar{X} - X) \end{cases}$$

Posons :

$$X \geq \bar{X} \Rightarrow X - \bar{X} = X^+ \geq 0$$

$$X \leq \bar{X} \Rightarrow \bar{X} - X = X^- \geq 0$$

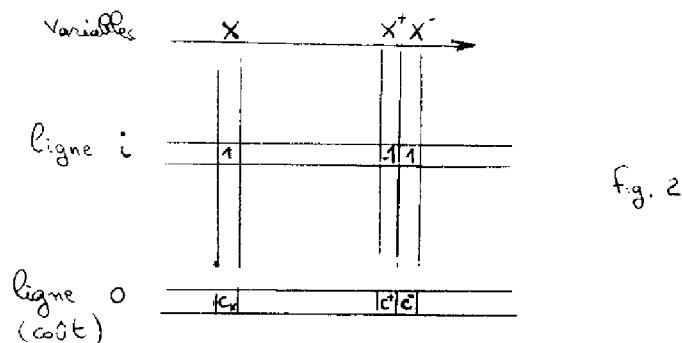
On doit alors rajouter une contrainte du type :

$$(2) X = \bar{X} + X^+ - X^-$$

Qui s'écrit dans la matrice des contraintes linéaires :

$$X - X^+ + X^- = \bar{X}$$

Soit  $i$  le rang de la ligne de la matrice correspondant à cette contrainte. La ligne  $i$  apparaît comme :



Proposition à démontrer

(A) Montrons que  $X^+$  et  $X^-$  qui n'appartiennent qu'à la contrainte n°  $i$ , ne peuvent se trouver simultanément dans une base optimale générée par le simplexe.

Démonstration :

Rappelons quelques résultats propres à la programmation linéaire :

Tout problème d'optimisation linéaire peut s'écrire :

$$(P) \begin{cases} AX = b & x \geq 0 \\ CX = z \text{ (max)} & \text{(cas d'un coût à maximiser)} \end{cases}$$

A matrice de dimension  $(NI, NC)$

Soit  $I$  une base réalisable de ce problème, c'est-à-dire en sous ensemble d'indices des vecteurs  $A_k = [A^I \mid A^J]$  tel que  $\{X_I, X_J = 0\}$  représente une solution admissible dans le domaine des contraintes.

On définit alors (cf [19]) un coût marginal relatif à la base  $I$  :

$(0 ; C_J - \pi A_J)$ , étant un multiplicateur associé à la base I et défini par :

$$(3) \pi A^I = C^I$$

On écrit alors le problème (P') équivalent au problème (P) :

$$(P') \begin{cases} X_I + (A^I)^{-1} A^J X_J = (A^I)^{-1} b \\ (C^J - \pi A^J) X_J = Z - \pi b \text{ (max)} \end{cases}$$

Proposition

L'optimalité de la base I est acquise quand tous les coûts marginaux relatifs à la base I,  $(C^J - \pi A^J)$ , sont non positifs.

Ces résultats classiques de la programmation linéaire sont amplement détaillés et démontrés dans les ouvrages spécialisés et notre but n'est pas de reprendre la théorie générale du simplexe mais de l'utiliser pour démontrer la proposition A.

- Supposons que  $X^+$  appartienne à la base réalisable I.

Montrons que  $X^-$  ne peut rentrer dans cette base.

La condition d'appartenance de  $X^+$  à la base I est fournie par (3) :

$$(4) C^+ + \pi_i = 0 \text{ . Le coût marginal relatif à } X^- \text{ est :}$$

$$C^- - \pi_i = C^- + C^+$$

D'après la figure (1)  $(C^- + C^+)$  est toujours négatif car  $C^+ < 0$  et  $C^- < 0$ .

Donc  $X^-$  ne peut rentrer dans la base I si son coût marginal est négatif. Le raisonnement s'effectue de manière identique si  $X^-$  est dans une base réalisable.  $X^+$  ne peut alors y rentrer car son coût marginal est strictement négatif.

REMARQUE : cette démonstration s'applique même si les coefficients  $a_1^+$  et  $a_1^-$  relatifs à  $X^+$  et  $X^-$  dans la matrice des contraintes sont différents en valeur absolue.

On peut énoncer alors le résultat :

- ① - Si deux variables positives ou nulles (convexité) n'appartenant qu'à une et une seule contrainte avec des coefficients de signes opposés sont telles que leurs coefficients de coût vérifient  $C^+ + C^- < 0$ , elles ne peuvent exister simultanément dans toute base réalisable d'un programme linéaire de maximisation.

• L'écriture  $X = \bar{X} + X^+ - X^-$  relative au coût non linéaire décrit fig. 1 est donc justifiée.

ANNEXE N° II



PROGRAMME DE GENERATION DE LA MATRICE  
DONNEES MPSX ET FICHIERS REELS

II-1 - GENERATION AUTOMATIQUE DE LA MATRICE LINEAIRE

La génération de la matrice et son rangement sur un fichier conforme à l'utilisation de MPSX est liée à la structure et au rangement des contraintes décrites au § 2-4-3 (fig. 2-12).

La figure I-1 rappelle la structure choisie :

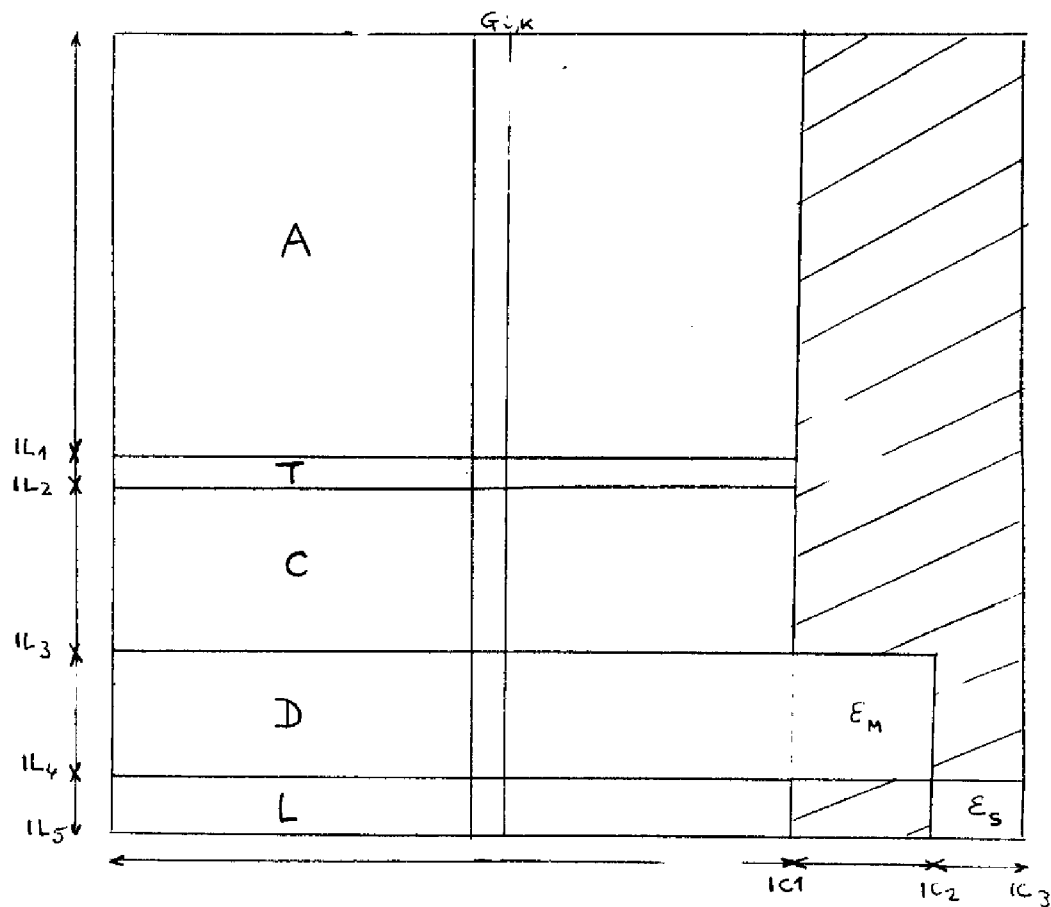


Fig. II-1 : IL : indice ligne  
IC : indice colonne



La structure d'entrée de MPSX est une structure par colonnes rangées suivant IC. Chaque élément de la matrice est alors repéré par son numéro de ligne IL et son numéro de colonne IC.

- Pour  $IC \in [0, ICI]$ , chaque colonne représente une variable de lancement  $Y(\alpha, i, K)$ , les indices sont rangés suivant :  $i \rightarrow K \rightarrow \alpha$ .

Etant donnée la structure par blocs répétitifs suivant  $i$  puis diagonaux suivant  $K$  (cf. fig. 2-12), on ne générera qu'une pseudo colonne  $G_{i,K}$  comprenant  $N\alpha$  colonnes et  $IL_5$  lignes. L'indice ligne IL est une fonction de  $i$  et de  $K$ . Chaque bloc A, T, C, D et L tels que décrits au § 2-4 est généré à l'intérieur d'une double boucle où  $i$  varie de 1 à  $N_i$  et  $K$  de 1 à  $NK$ .

- pour IC ( $IC_1, IC_2$ ) et ( $IC_2, IC_3$ ), la génération des sous-blocs  $\mathcal{E}_M$  et  $\mathcal{E}_S$  composés de diagonales  $[1, -1]$  ne pose aucune difficulté.

Chaque élément de la matrice est rangé selon les normes suivantes :

"C"	→ numéro de colonne	COL(5)
"L"	→ numéro de ligne	COL(15)
(IL, IC)		COL(25)

FORMAT (COL(5), A(i), P'999', COL(15), A, P'999', COL(25), F(11,3))

Le programme PL1 de génération de la matrice des contraintes est détaillé tableau A-1, la matrice est chargée sur un fichier "SORTIE" lui-même défini dans les cartes de contrôle par un fichier " MPS2" dont nous donnons les caractéristiques :

```
// GO.SORTIE DD DSN= MPS2, DISP =(NEW,PASS), UNIT = SYSDA,  
// SPACE = (TRK, (200,50) RLSE), NCB = (LRECL = 80,RECFM=FB,BLKSIZE =  
1680)
```

C'est là qu'apparaît le défaut principal de MPSX. Un grand nombre de fichiers de travail propres (PROBFILE, MATRIX, ETAm, SCRATCH...) permettent un traitement particulier souple et performant des problèmes de grande dimension. Ainsi, pour une matrice de 500 contraintes, les temps de calcul totaux ne dépassent pas un minute CPU et la place mémoire utilisée est de l'ordre de 250 K. Cependant, les fichiers temporaires créés soit pour utilisateur, soit pour usage interne coûtent en allocation sur cylindre par leur taille.

L'occupation de mémoire virtuelle liée à l'exécution du programme provient de trois origines distinctes :

- 1 - l'exécution du programme PL1 qui ne dépasse pas 30K
- 2 - La place occupée par le système MPSX/370 et les procédures
- 3 - Le problème lui-même, qui utilise une place liée à la taille de la matrice des contraintes, pour optimiser la place mémoire nécessaire à allouer au système MPSEEXEC, on peut utiliser la formule fournie par IBM dans "IBM Mathematical Programming System Extended /370 (MPSX.370)"

$$\left\{ \begin{array}{l} 145 M + N + 20 e \frac{M}{M+N} + 10\ 000 + \text{Max} (16\ 000, \text{Min} (64\ 000, 9M + 9N + 2e)) \\ = \text{région minimum} \\ 181 M + 37 N + 8e + 10\ 000 + 30e \frac{M}{M+N} = \text{région maximum} \end{array} \right.$$

avec M : nombre de lignes ; N : nombre de colonnes ; e : nombre d'éléments.

Pour les deux exemples étudiés, CIH et CIP, les temps de calcul et l'espace mémoire minimum sont exposés sur le tableau II-2

	Lignes	Colonnes	Eléments	D min en K octets	temps en minutes
CIH	716	880	12 500	266 K	1' 05"
CIP	446	520	8 400	178 K	48"

Tableau II-2

Présentation des tableaux et listings illustrant les traitements effectués avec le produit MPSX ainsi que les fichiers de données correspondant aux deux ateliers étudiés :

A -

1 - Programme de génération automatique de la matrice des contraintes et de chargement du fichier "SORTIE" lisible par MPSX.

2 - Programme REPORT en langage scientifique MPSRG destiné à transformer la solution optimale brute. Ce programme est compilé par l'ordre ANALYZE lu dans les cartes d'exécution de MPSX et il est initialisé et exécuté par les ordres SETREP et REPORT.

B - Cartes de contrôle nécessitées par le traitement du produit MPSX

C - Extrait de la solution globale du programme linéaire, solution qui se décompose en plusieurs étapes :

- CONVERT : description du fichier PROBFIL qui contient la matrice
- SOLUTION : comprend le détail des itérations ainsi que la description détaillée de la solution optimale : activité des lignes, activité des colonnes, coûts, coûts réduits.

Nous montrons la solution entre  $IL_3$  et  $IL_4$  pour les lignes et entre  $IC_1$  et  $IC_2$  pour les colonnes, c'est-à-dire les contraintes liées aux niveaux de stock de référence  $M(\beta, K)$  ainsi que les variables d'écart associées. (L 348 à L 367 et C 321 à C 360)

D -

1. détail des paramètres calculés pour l'atelier des CIH.  
Fichier gammes et fichier postes.

2. détail des paramètres calculés pour l'atelier des CI.  
Fichier gammes et fichier postes.

PL/I OPTIMIZING COMPILER

SIMUL :PROC OPTIONS(MAIN);

SOURCE LISTING

STMT LEV NT

```

1      0      SIMUL :PROC OPTIONS(MAIN);
2      1  0      DCL SORTIE STREAM OUTPUT;
3      1  0      DCL C CHAR(2);
4      1  0      DCL NOM CHAR(4);
5      1  0      DCL G(446,4),COUT(320),RHS1(446);
6      1  0      DCL F(10,12);
7      1  0      DCL BB R11;
8      1  0      PUT FILE(SORTIE) EDIT('NAME', 'ORDD')(A,COL(15),A);
9      1  0      PUT FILE(SORTIE) EDIT('ROWS')(COL(1),A,SKIP);
10     1  0      C=' L';
11     1  0      PUT FILE(SORTIE) EDIT(' N', 'LO01')(COL(1),A,COL(5),A);
12     1  0      DO I=1 TO 446;
13     1  1      K=I+1;
14     1  1      PUT FILE(SORTIE) EDIT(C, 'L',K)(COL(1),A,COL(5),A,P'999');
15     1  1      IF I=346 THEN C=' E';
16     1  1      END;
17     1  0      PUT FILE(SORTIE) EDIT('COLUMNS')(COL(1),A,SKIP);
18     1  0      GET(F);
19     1  0      FMPSX:FORMAT(COL(5),A(1),P'999',COL(15),A,P'999',COL(25),
20     1  0      F(11,3));
21     1  0      NI=10;
22     1  0      NK=8;
23     1  1      DO M=1 TO 320;
24     1  1      COUT(M)=0;
25     1  0      END;
26     1  1      DO I=1 TO NI;
27     1  1      DO K=1 TO NK;
28     1  2      G=0;
29     1  2      IL=(I-1)*NK+3+(K-1)*3;
30     1  2      /*A*/
31     1  3      DO J=1 TO 3;
32     1  3      G(IL+J,J+1)=1;
33     1  3      END;
34     1  2      /*B*/
35     1  2      DO ID=K+1 TO NK WHILE(K<NK);
36     1  3      IL=IL+3;
37     1  3      DO J=1 TO 3;
38     1  4      G(IL+J,J)=-1;
39     1  4      G(IL+J,J+1)=1;
40     1  4      END;
41     1  3      END;
42     1  2      /*T*/
43     1  2      IL=I +3*NI+NK;
44     1  2      G(IL,1)=1;
45     1  2      /*C*/
46     1  2      IL=NI*(3*NK+1)+12*(K-1);
47     1  2      DO IC=1 TO 12;
48     1  3      IF IC<3 THEN G(IL+IC,1)=F(I,IC);
49     1  3      ELSE IF IC<7 THEN G(IL+IC,2)=F(I,IC);
50     1  3      ELSE IF IC<11 THEN G(IL+IC,3)=F(I,IC);
51     1  3      ELSE G(IL+IC,4)=F(I,IC);
52     1  3      END;
53     1  2      /*D*/
54     1  2      IL=3*NI+NK+ NI+12*NK+10*(K-1);
55     1  2      DO ID=1 TO 10;
56     1  3      IF ID<5 THEN G(IL+ID,2)=F(I,ID+2);
57     1  3      ELSE IF ID<9 THEN G(IL+ID,3)=F(I,ID+2);
58     1  3      ELSE G(IL+ID,4)=F(I,ID+2);
59     1  3      END;
60     1  2      /*E*/
61     1  2      DO IE=K+1 TO NK WHILE(K<NK);
62     1  3      IL=IL+10;
63     1  3      DO IB=1 TO 10;
64     1  4      IF IB<5 THEN IC=1;
65     1  4      ELSE IF IB<9 THEN IC=2;
66     1  4      ELSE IC=3;
67     1  4      G(IL+IB,IC)=-F(I,IB+2);
68     1  4      G(IL+IB,IC+1)=F(I,IB+2);
69     1  4      END;
70     1  3      END;
71     1  2      /*LIV*/
72     1  2      IL=426+2*(I-1)+1;
73     1  2      G(IL+1,4)=1;
74     1  2      IF K<5 THEN G(IL,4)=1;

```

A 1

```
/*MPSX*/
67 1 2 DO J=1 TO 4;
68 1 3 IC=J+(I-1)*4*NK+(K-1)*4;
69 1 3 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC,'L',1,COU(IC))(R(FMPSX));
70 1 3 BB='1';
71 1 3 DO L=1 TO 446;
72 1 4 IF B(L,J)≠0 THEN DO;
73 1 5 IF BB THEN PUT FILE(SORTIE) EDIT('L',L+1,G(L,J))
(COL(40),A,P'999',COL(50),F(11,3));
ELSE PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC,'L',L+1,G(L,J))(R(FMPSX));
74 1 5 BB='BB';
75 1 5 END;
76 1 5 END;
77 1 4 END;
78 1 3 END;
79 1 2 END;
80 1 1 END;
81 1 0 DO J=1 TO 10*NK;
82 1 1 IC=4*NI*NK+2*(J-1)+1;
83 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC,'L',1,-10)(R(FMPSX));
84 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC,'L',J+347,1)(R(FMPSX));
85 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC+1,'L',1,-5)(R(FMPSX));
86 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC+1,'L',J+347,-1)(R(FMPSX));
87 1 1 END;
88 1 0 DO L=1 TO NI;
89 1 1 IC=480+4*(L-1)+1;
90 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC,'L',1,-50)(R(FMPSX));
91 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC,'L',2*(L-1)+428,1)(R(FMPSX));
92 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC+1,'L',1,-20)(R(FMPSX));
93 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC+1,'L',2*(L-1)+428,-1)(R(FMPSX));
94 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC+2,'L',1,-50)(R(FMPSX));
95 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC+2,'L',2*(L-1)+429,1)(R(FMPSX));
96 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC+3,'L',1,-100)(R(FMPSX));
97 1 1 PUT FILE(SORTIE) EDIT('C',IC+3,'L',2*(L-1)+429,-1)(R(FMPSX));
98 1 1 END;
99 1 0 GET(RHS1);
100 1 0 PUT FILE(SORTIE) EDIT('RHS')(COL(1),A,SKIP);
101 1 0 NUM='RHS1';
102 1 0 DO I=1 TO 446;
103 1 1 K=I+1;
104 1 1 IF RHS1(I)≠0 THEN
PUT FILE(SORTIE) EDIT(NOM,'L',K,RHS1(I))(SKIP,X(4),A,COL(15),A,
P'999',COL(25),F(8,2));
105 1 1 END;
106 1 0 PUT FILE(SORTIE) EDIT('ENDATA')(COL(1),A,SKIP);
107 1 0 END SIMUL;
```

SPSK7370 VING APSCL EXECUTION

ANALYZE ORDU

TIME = 0,05

FILE = TOTU

```

N 0,SEMEF,0 0000020
N 0,APPE,0 0000021
IM OCCUPATION DES POSTES 0000030
PH SEMAINE PERCI PHOTO AUTO3 PERC3 USINA ENRAL 0000040
R 0000050
R1 0000060
EP 1,L252 X 2,L255 X 3,L259 X 4,L261 X 5,L262 X 6,L263 0000070
EP 1,L264 X 2,L267 X 3,L273 X 4,L275 X 5,L274 X 6,L275 0000080
EP 1,L276 X 2,L279 X 3,L285 X 4,L285 X 5,L286 X 6,L287 0000090
EP 1,L288 X 2,L291 X 3,L295 X 4,L297 X 5,L298 X 6,L299 0000100
EP 1,L300 X 2,L303 X 3,L307 X 4,L309 X 5,L310 X 6,L311 0000110
EP 1,L312 X 2,L315 X 3,L319 X 4,L321 X 5,L322 X 6,L323 0000120
EP 1,L324 X 2,L327 X 3,L331 X 4,L333 X 5,L334 X 6,L335 0000130
EP 1,L336 X 2,L339 X 3,L343 X 4,L345 X 5,L346 X 6,L347 0000140
M1 0000150
M2 0000160
N 0,SEMEF,SEPF,1 0000170
R * * ** * ** * ** * ** * ** 0000180
I 0,SEF 0000190
I V15555/T15555 0000200
I V25555/T25555 0000210
I V35555/T35555 0000220
I V45555/T45555 0000230
I V55555/T55555 0000240
I V65555/T65555 0000241
M2 0000250
F1 0000260
4M LIVRAISONS 0000261
2R FAMILLE SEMAINE 4 6 8 DEMANDE 0000262
R 0000263
R3 0000264
F4 1,S1FTMP X 2,C004 X 3,C008 X 4,C012 X 5,C016 X 6,C020 X 0000265
C 7,C024 X 8,C028 X 9,C032 X 0,L029 0000275
F4 1,S1FTMP X 2,C036 X 3,C040 X 4,C044 X 5,C048 X 6,C052 X 0000285
C 7,C056 X 8,C060 X 9,C064 X 0,L431 0000295
F4 1,S2FTMP X 2,C068 X 3,C072 X 4,C076 X 5,C080 X 6,C084 X 0000305
C 7,C088 X 8,C092 X 9,C096 X 0,L435 0000315
EP 1,S2FTMS X 2,C100 X 3,C104 X 4,C108 X 5,C112 X 6,C116 X 0000325
C 7,C120 X 8,C124 X 9,C128 X 0,L435 0000335
EP 1,S2FTMS X 2,C132 X 3,C136 X 4,C140 X 5,C144 X 6,C148 X 0000345
C 7,C152 X 8,C156 X 9,C160 X 0,L437 0000355
EP 1,A02FTMP X 2,C164 X 3,C168 X 4,C172 X 5,C176 X 6,C180 X 0000365
C 7,C184 X 8,C188 X 9,C192 X 0,L449 0000375
EP 1,A02FTMS X 2,C196 X 3,C200 X 4,C204 X 5,C208 X 6,C212 X 0000385
C 7,C216 X 8,C220 X 9,C224 X 0,L441 0000395
EP 1,A02FTMS X 2,C228 X 3,C232 X 4,C236 X 5,C240 X 6,C244 X 0000405
C 7,C248 X 8,C252 X 9,C256 X 0,L443 0000415
EP 1,C01FTMP X 2,C260 X 3,C264 X 4,C268 X 5,C272 X 6,C276 X 0000425
C 7,C280 X 8,C284 X 9,C288 X 0,L445 0000435
EP 1,C02FTMP X 2,C292 X 3,C296 X 4,C300 X 5,C304 X 6,C308 X 0000445
C 7,C312 X 8,C316 X 9,C320 X 0,L447 0000455
R3 0000465
R4 0000475
R * 1555555 ***** 0000485
N 0,APPE,APPE,1 0000486
I 0,AP 0000487
I N,N1=X25555+X35555+X45555+X55555 0000495
I 0,02FN,N1+X65555+X75555 0000505
I N,N3=N2+X85555+X95555 0000515
I 105555 0000525
R4 0000535
E3 0000545
N 0,APPE,0 0000555
4M POSTE:PHOTO 0000565
2R CAPACITE= **,* H 0000575
I T,L255 0000585
4M SEMAINE 1 0000586
2R FAMILLE CHARGE POURCENTAGE 0000595
R 0000596
R5 0000605
EP 1,C002 0000615
EP 1,C034 0000625
EP 1,C066 0000635
EP 1,C098 0000645
EP 1,C130 0000655
EP 1,C162 0000665
EP 1,C194 0000675
EP 1,C226 0000685
EP 1,C258 0000695
EP 1,C290 0000705
R5 0000715
R6 0000725
R5 ** *** ** 0000735
N 0,APPE,APPE,1 0000745
I 0,AP 0000755
IZ N,NCH=X15555*(J15555 & I,L255) 0000765
I 0,0POURC=N,NCH/V,L255 0000775
R6 0000785
R5 0000795

```

A<sub>2</sub>

```
// EXEC PL1X,REGION=250K
//PL1.SYSIN DD *
/*
//GO.SORTIE DD DSN=&MPS2,DISP=(NEW,PASS),UNIT=SYSDA,
// SPACE=(TRK,(200,50),RLSE),DCB=(LRECL=80,RECFM=FB,BLKSIZE=1680)
//GO.SYSIN DD *
/*
//MPSCOMP EXEC PGM=OPSCOMP,
// REGION=500K
//STEPLIB DD DSN=CIR2500.BIB.MPSX370,DISP=SHR
//SCRATCH1 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//SCRATCH2 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//SCRATCH3 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//SCRATCH4 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//SYSMLCP DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2)),DISP=(NEW,PASS)
//SYSPRINT DD SYSOUT=A,DCB=(RECFM=FB,A,LRECL=133,BLKSIZE=1330)
//SYSIN DD *
```

```
0001 PROGRAM
0002 INITIALZ
0201 MOVE(XDATA,'URDO')
0202 MOVE(XPBNAME,'URDO')
0203 CONVERT('SUMMARY')
0204 ANALYZE('FILE','TOTO')
0205 SETUP('MAX')
0206 SFTREP
0207 MOVE(XOBJ,'L001')
0208 MOVE(XRHS,'RHS1')
0209 OPTIMIZE
0388 SOLUTION
0389 REPORT
0390 SAVE
0391 EXIT
0392 PEND
```

B

```
//MPSEXEC EXEC PGM=OPLEXEC,PARM=TASK,CURD=(0,RE,MPSCOMP),
// REGION=500K
//STEPLIB DD DSN=CIR2500.BIB.MPSX370,DISP=SHR
//ETA1 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//ETA2 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//MATRIX1 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//PROBFILE DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//REVIFTLF DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))

//SCRATCH1 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//SCRATCH2 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//REPROFILE DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//REPPUNK DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(5,2))
//TOTO DD DSN=AAS1329.001.REPORT,DISP=SHR
//SYSMLCP DD DSNNAME=*.MPSCOMP.SYSMLCP,DISP=(OLD,DELETE)
//SYSPRINT DD SYSOUT=A,DCB=(RECFM=FB,A,LRECL=133,BLKSIZE=1330)
//SYSPUNCH DD DUMMY
//SYSIN DD DSN=&MPS2,DISP=(OLD,DELETE)
/*
```

C

MPSX/370 V1M3                      MPSCLE EXECUTION

NUMBER	..ROW..	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	..LOWER LIMIT.	..UPPER LIMIT.	..DUAL ACTIVITY
348	L348	EQ	18,00000	.	18,00000	18,00000	5,00000-
349	L349	EQ	162,00000	.	162,00000	162,00000	5,00000-
350	L350	EQ	3,00000	.	3,00000	3,00000	5,00000-
351	L351	EQ	18,00000	.	18,00000	18,00000	5,00000-
352	L352	EQ	10,00000	.	10,00000	10,00000	5,00000-
353	L353	EQ	5,00000	.	5,00000	5,00000	5,00000-
354	L354	EQ	12,00000	.	12,00000	12,00000	5,00000-
355	L355	EQ	32,00000	.	32,00000	32,00000	5,00000-
356	L356	EQ	90,00000	.	90,00000	90,00000	5,00000-
357	L357	EQ	60,00000	.	60,00000	60,00000	5,00000-
358	L358	EQ	18,00000	.	18,00000	18,00000	5,00000-
359	L359	EQ	162,00000	.	162,00000	162,00000	10,00000-
360	L360	EQ	3,00000	.	3,00000	3,00000	5,00000-
361	L361	EQ	18,00000	.	18,00000	18,00000	5,00000-
362	L362	EQ	10,00000	.	10,00000	10,00000	5,00000-
363	L363	EQ	5,00000	.	5,00000	5,00000	5,00000-
364	L364	EQ	12,00000	.	12,00000	12,00000	5,00000-
365	L365	EQ	32,00000	.	32,00000	32,00000	10,00000-
366	L366	EQ	90,00000	.	90,00000	90,00000	5,00000-
367	L367	EQ	60,00000	.	60,00000	60,00000	5,00000-

MPSX/370 V1M3                      MPSCLE EXECUTION                      PAGE

NUMBER	.COLUMNS	AT	...ACTIVITY...	..INPUT COST..	..LOWER LIMIT.	..UPPER LIMIT.	..REDUCED COST.
744	C321	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
769	C322	BS	3,55000	5,00000-	.	NONE	.
770	C323	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
771	C324	BS	25,60000	5,00000-	.	NONE	.
772	C325	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
773	C326	BS	2,10000	5,00000-	.	NONE	.
774	C327	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
775	C328	BS	4,70000	5,00000-	.	NONE	.
776	C329	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
777	C330	BS	5,35000	5,00000-	.	NONE	.
778	C331	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
779	C332	BS	3,81000	5,00000-	.	NONE	.
780	C333	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
781	C334	BS	2,90000	5,00000-	.	NONE	.
782	C335	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
783	C336	BS	5,76000	5,00000-	.	NONE	.
784	C337	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
785	C338	BS	19,47000	5,00000-	.	NONE	.
786	C339	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
787	C340	BS	6,55000	5,00000-	.	NONE	.
788	C341	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
789	C342	BS	3,23800	5,00000-	.	NONE	.
790	C343	BS	1,67600	10,00000-	.	NONE	.
791	C344	LL	.	5,00000-	.	NONE	15,00000-
792	C345	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
793	C346	BS	2,10000	5,00000-	.	NONE	.
794	C347	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
795	C348	BS	2,78000	5,00000-	.	NONE	.
796	C349	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
797	C350	BS	4,34600	5,00000-	.	NONE	.
798	C351	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
799	C352	BS	3,81000	5,00000-	.	NONE	.
800	C353	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
801	C354	BS	1,64500	5,00000-	.	NONE	.
802	C355	BS	9,30000	10,00000-	.	NONE	.
803	C356	LL	.	5,00000-	.	NONE	15,00000-
804	C357	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
805	C358	BS	18,28500	5,00000-	.	NONE	.
806	C359	LL	.	10,00000-	.	NONE	15,00000-
807	C360	BS	6,41604	5,00000-	.	NONE	.



	Produit	Taille		Rendements (%)			Commande mensuelle	
		lot initial	$\alpha = 1,2$	3	4	global		
1	SNIAS	1	128	46	72	87	28.8	390
2		2	128	60	75	87	69.	315
3		3	128	68	82	87	48.5	192
4		4	128	60	84	78	39.3	141
5	SFENA	100	240	37	72	80	21.	200
6		101	240	40	63	86	22.	500
7	SOREMEC		168	65	65	72	30.	100
8	LCT	1	480	55	74	84.	34	200
9		2	360	50	79		33	
10		3	360	50	79		29	
11		4	360	40	69		23	
12		5	360	40	69		23	
13	EAS	1	480	40	75	78.	23.	100
14		2	480	18	65		24	
15	SERE	1	384	60	71	72.	30	50
16		2	384	45	68		22	
17		3	384	60	72		31	
18	AOIP	1	288	60	54	90	29	500
19		2	288	60	62	90	33	500
20	BULL TG		1440	89	85	85	62.	10000

D<sub>1</sub> Atelier de CIH : Fichier produits avec rendement  $(P_{i,j}, \alpha)$

N°	Kaspar	Klimch	Diamant	Scie	Laser A'	Soudure	Collage	Mblc	Passé cristal	Durex-B	Laser-B	Famebre Ca.por	Potting	Durez C
1	0.52		1.			2.17					7.09	1.87		
2	0.52		1.			1.62					7.04	1.87		
3	0.52		1.			2.17						1.87		
4	0.52		1.			1.54						1.87		
5	0.28		0.67		0.43	2.13	2.36					1.71		
6	0.28		0.67		0.26	7.9						1.71		
7	0.4		0.67				6.54							0.86
8		0.12		0.18				1.98		1.43			6.07	
9		0.17		0.25	1.09			1.53		1.43			6.07	
10		0.17		0.25	1.18			1.32		1.43			6.07	
11		0.17		0.25	1.31			2.17		1.43			6.07	
12		0.17		0.25	1.28			2.02		1.43			6.07	
13		0.17		0.18				1.55		1.43			5.76	
14		0.12		0.18				1.87		1.43			5.76	
15		0.16		0.23				1.67		1.43			6.54	
16		0.16		0.23	1.4			3.		1.43			6.54	
17		0.16		0.23	1.21			0.9		1.43			6.54	
18		0.21		0.31	0.5				1.48		1.59			0.58
19		0.22		0.31	0.58				2.57		2.07			0.58
20		0.04		0.08					0.92					0.34
CAP(β) (heures)	36	40	36	72	*	56	28	76	28	36*	28*	36	40	*

Atelier des CIH ; temps Fig en heures/pièces

## D2 Atelier des CIP

FICHER PRODUITS

	Type	% Moyen/ Global	Carnet de commandes en m <sup>2</sup> /mois
1	SE. Photo. SnPb. TM	0.15	1.6
2	SF. Photo. SnPn. TNM	2.3	27.
3	DF. Photo. SnPn. TM	53.5	585.
4	DF. Sérig. SnPb. TM	4.78	52.
5	DF. Sérig. SnPb. TNM	1.94	21.
6	DF. Photo. Au. TM	28.35	308.
7	DF. Sérig. Au. TM	0.17	2.
8	DF. Sérig. Au. TNM	1.	10.5
9	SF. Photo. Cu. TM	0.24	2.6
10	DF. Photo. Cu. TM	2.07	22.5

Famille Poste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	CAP (p) h/ semaine
1. Perçage TM	1.27	0	0.74	0.64	0	1	2.2	0	0	1.45	200
2. Perçage TNM	0	0.24	0	0	0.53	0	0	0.53	0	0	36
3. Auto-1	0.1	0	0.11	0.1	0	0.14	0.16	0	0.12	0.2	36
4. Photo	1	1	1	0	0	1	0	0	1.26	1.42	210
5. Sérigraphie	0	0	0	0.16	0.16	0	0.15	0.15	0	0	18
6. Auto-2	0.08	0.08	0.1	0.11	0.11	0.15	0.13	0.13	0	0	36
7. Gravure	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08	0.13	0.12	45
6. Auto-3	0	0	0	0	0	0.33	0.28	0.28	0	0	32
9. Sérig. masquage	0.1	0.1	0.07	0.08	0.08	0.09	0	0	0	0	16
10. Perçage compl.	1.2	1.2	0.15	0.14	0.14	0.18	0.68	0.68	0	0	40
11. Usinage	2.3	2.3	0.27	1	1	0.47	0.41	0.41	0	0	140
12. Emballage	0.26	0.26	0.27	0.25	0.25	0.3	0.26	0.26	0.45	0.42	70



## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
Chapitre I - PLANIFICATION DE LA PRODUCTION DANS UN SYSTEME DE GESTION INTEGREE DE L'ENTREPRISE	5
I-1 - L'entreprise, système complexe	6
I-2 - Nécessité d'une aide à la décision	7
I-3 - Un système de commande hiérarchisé	10
1-3-1 - le niveau supérieur	12
1-3-2 - le système de surveillance et de commande	12
1-3-3 - la banque de données et l'analyse du système	13
I-4 - Objectifs du programme "Automatisation intégrée"	14
I-5 - La planification de la production	16
1-5-1 - introduction	16
1-5-2 - le long terme	18
1-5-3 - le moyen terme	19
1-5-4 - le court terme	21
Chapitre II - ELABORATION D'UN MODELE DE PLANIFICATION MOYEN TERME	25
2-1 - Présentation du problème	25
2-2 - Délimitation du champ d'action et hypothèses générales retenues	26
2-2-1 - généralités	26
2-2-2 - Hypothèses retenues	27
2-2-3 - L'horizon de travail	28

2-3 - Equations générales du modèle	29
2-3-1 - discrétisation spatiale et temporelle	29
2-3-2 - Les variables du modèle	32
2-3-3 - Les contraintes	34
2-3-3-1 - équations de circulation	34
2-3-3-2 - occupation des moyens	36
2-3-3-3 - approvisionnement extérieur	40
2-3-4 - Les objectifs	42
2-3-4-1 - satisfaction de la commande	42
2-3-4-2 - non occupation des moyens	43
2-3-4-3 - régulation des niveaux de stocks	44
2-4 - Le modèle informatique	45
2-4-1 - Présentation	45
2-4-2 - construction d'une fonction critère linéaire	46
2-4-3 - construction de la matrice linéaire	50
2-4-4 - conclusion	
Chapitre III - APPLICATION DU MODELE A DEUX ATELIERS DE FABRICATION DE COMPOSANTS ELECTRONIQUES RESULTATS ET PERFORMANCES	
3-1 - Introduction	65
3-2 - Description de la chaîne de fabrication CIH	65
3-2-1 - Le type de fabrication	66
3-2-2 - L'atelier des CIH	67
3-3 - Modélisation du processus réel et extraction des données	71
3-3-1 - Introduction	71

3-3-2 - organisation informatique actuelle de l'atelier	72
3-3-3 - décomposition en sous-ateliers	75
3-3-4 - réduction du nombre de gammes	77
3-3-5 - recherche des machines critiques	80
3-3-6 - Calcul des rendements de fabrication	82
3-3-7 - Coûts de fabrication	83
3-3-8 - modèle informatique général	84
3-3-9 - sorties du programme	
3-4 - Application à d'autres ateliers	
3-4-1 - description de la fabrication des CI	88
3-4-2 - adaptation du modèle	93
3-4-3 - sorties du programme linéaire	96
3-5 - Résultats et conclusions générales	98
3-5-1 - mise au point du programme	98
3-5-2 - Adaptation dynamique des données	100
3-5-2-1 - les coefficients de coût	101
3-5-2-2 - les capacités des postes critiques	102
3-5-2-3 - variation de la commande	103
3-5-3 - Conclusions	103
CONCLUSION	111
ANNEXES	
Annexe n°1 : Linéarisation des coûts sur les écarts par rapport à une valeur de consigne	117
Annexe n°2 : Programme de génération de la matrice données MPSX et fichiers réels	123



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gestion intégrée de la production et de l'ordonnancement. M. CROLAIS
- [2] Aide à la décision en matière d'organisation d'atelier.  
Thèse 3e cycle 1976 JL. GIORDANO  
JC. SUQUET
- [3] A decision-making progress for the real time control  
of a production unit.  
Int. J. Prod. Res. 1976, vol. 14 n° 2 J. ERSCHLER  
F. ROUBELLAT  
JP. VERNHES
- [4] Analyse structurale des systèmes complexes en vue  
d'une commande hiérarchisée  
Thèse d'Etat 1975 M. RICHETIN
- [5] Rapport DGI/LAAS - 1974
- |   |   |
|---|---|
| 5-I - Principe généraux de conception de<br>l'automatisation intégrée d'une chaîne<br>de fabrication de composants électroniques        | D. ESTEVE<br>M. RICHETIN                    |
| 5-II - Analyse structurale de la chaîne de fa-<br>brication pour les données en vue de la<br>maîtrise des caractéristiques des produits | C. HERNANDEZ<br>M. RICHETIN<br>H. PISTOWSKI |
| 5-III- L'aide à la décision au niveau surveil-<br>lance et décision statistiques  | L. ETE SSE<br>M. LEMAITRE<br>JP. RICHARD    |
| 5-IV - Diagnostic d'incidents répertoriés   | M. LEMAITRE<br>JP. RICHARD                  |

- [ 6 ] Planification de la gestion d'une chaîne de fabrication de semi-conducteur au silicium J. BEDHET  
P. SECHERRE  
(Rapport ENSAE 1974)
- [ 7 ] Consistance, complétude et traduction optimale des tables de décision RAIRO Vol. 12 n°1 - 1978 M. GHALLAB
- [ 8 ] Production systems ; planning, analysis and control Wiley 1970 James L. RIGGS
- [ 9 ] A computer integrated manufacturing system Development of production systems. Proceedings : 1973 Copenhagen Chr. NISSEN
- [ 10 ] Contribution à l'étude des systèmes de conduite en temps réel en vue de la commande d'unité de fabrication Thèse d'Etat 1977 - LILLE R. SOENEN
- [ 11 ] Linear programming and extensions Princeton University press 1963 GB. DANTZIG
- [ 12 ] Identification de processus. J. SZYMANSKI  
(Rapport ENSAE 1976)
- [ 13 ] Process charts - transactions of ASME F&L. GILBRETH
- [ 14 ] Production and opérations management Harcourt, Brace & World Inc. 1968 JW. GAVETT
- [ 15 ] The theory of linear economic models J. GALE  
Mac Graw Hill - 1960

- [16] Production planning and control  
Pergamon International  
Library - 1975  
J.R KING
- [17] Suivi de commande en temps réel d'un atelier de  
fabrication; Annexe (A2)  
Action concertée LAAS/1975  
R. DEMMOU  
J. ERSCHLER  
F. ROUBELLAT
- [18] Le planning de la production et le contrôle des  
stocks  
Dunod 1962  
JF. MAGEE
- [19] Programmation linéaire  
Dunod 1972  
M. SIMONNARD
- [20] Définition d'un plan de production à moyen terme pour  
une unité de circuits intégrés  
Annexe 3 . Action concertée  
LAAS/1978  
JB. LASSERRE  
F. ROUBELLAT  
JE. DOUCET
- [21] Système d'ordonnancement à moyen terme avec optimisa-  
tion assistée sur mini ordinateur  
Thèse 3e cycle  
Bordeaux 1976  
Ch de LAVERGNE