

N° d'ordre: 377

50376
1985
279

50376
Année 1985
1985
279

THÈSE

présentée devant

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

en vue de l'obtention

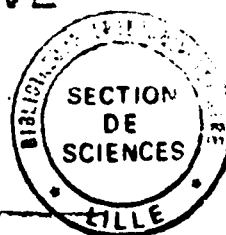
du Grade de DOCTEUR INGÉNIEUR

Spécialité : Automatique

par

Patrick DEGRAEVE

Ingénieur I.C.A.M.



ETUDE D'UN SYSTEME DE CONDUITE D'UN ATELIER INDUSTRIEL A FLOT UNIQUE

Soutenue le 14 Octobre 1985 devant la Commission d'Examen :

MM. P. VIDAL

Président

P. BAYART

J. ERSCHLER

R. SOENEN

M. STAROSWIECKI

Examineurs

SCD LILLE 1



D 030 322793 0

50376

Année 1985

1985

279

N° d'ordre : 377

50376

1985

279

THÈSE

présentée devant

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

en vue de l'obtention

du Grade de DOCTEUR INGENIEUR

Spécialité : Automatique

par

Patrick DEGRAEVE

Ingénieur I.C.A.M.



ETUDE D'UN SYSTEME DE CONDUITE D'UN ATELIER INDUSTRIEL A FLOT UNIQUE

Soutenue le 14 Octobre 1985 devant la Commission d'Examen :

MM. P. VIDAL

Président

P. BAYART

J. ERSCHLER

R. SOENEN

M. STAROSWIECKI

Examineurs

"ETUDE D'UN SYSTEME DE CONDUITE D'UN ATELIER INDUSTRIEL A FLOT UNIQUE"

Thèse soutenue par Monsieur Patrick DEGRAEVE

RESUME

Ces travaux concernent la recherche d'un modèle et d'une méthode de conduite pour un atelier industriel de bonneterie.

La problématique est d'abord définie à partir d'une présentation de la gestion de la production et du procédé physique de fabrication. Sont ainsi mis en évidence la structure d'atelier à flot unique ("flow-shop"), les contraintes et critères caractérisant le problème (notamment la gestion des effectifs).

Les diverses approches du problème d'ordonnancement sont ensuite analysées. La comparaison entre les méthodes centralisées et décentralisées permet d'orienter l'étude vers une procédure interactive d'aide à la décision.

Un modèle et une méthode de conduite sont ensuite proposés, sur la base d'une structure de décision à deux niveaux : le lancement orienté vers les contraintes externes (commerciales) et l'affectation des effectifs, orientée vers les contraintes internes.

Une expérimentation sur micro-calculateur permet, par une simulation de l'atelier réel, de mettre en évidence les gains de performance attendus (réduction des moyenne et variance des temps de passage des lots et réduction progressive de l'en-cours).

MOTS CLES : Affectation, Conduite d'atelier, Ordonnancement.

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein de la Société LES FILS DE LOUIS MULLIEZ (PHILDAR) à ROUBAIX et du Centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de LILLE.

A ce titre, je tiens à remercier Monsieur le Professeur P. VIDAL, Directeur du Laboratoire, de m'avoir permis d'effectuer cette recherche dans le cadre d'une entreprise industrielle. Je le remercie également pour la bienveillance qu'il a accordée à mon travail et l'honneur qu'il me fait de présider ce jury.

Je suis très reconnaissant à Monsieur J. ERSCHLER, Maître de Conférence à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, d'être présent dans ce jury. Je tiens à le remercier pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail et pour l'apport de ses travaux dans les orientations générales de ce mémoire.

Que Monsieur R. SOENEN, Professeur au Centre Universitaire de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, accepte mes remerciements pour sa participation à ce jury. L'enseignement qu'il m'a apporté m'a considérablement éclairé dans la façon d'aborder et de résoudre le problème industriel évoqué ici.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur M. STAROSWIECKI, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de LILLE, pour avoir bien voulu s'intéresser à mes travaux et accepter de participer à cette commission d'examen.

Il me tient tout particulièrement à coeur de remercier Monsieur P. BAYART, de la Société L.F.L.M. pour l'accueil qu'il m'a réservé au sein de son service de Développement Technologique et pour nos fructueux échanges au cours de l'avancement de ce travail.

Je remercie également la Société L.F.L.M. de m'avoir permis de débiter ainsi mon activité professionnelle dans le cadre d'une convention C.I.F.RE. (Contrat Industriel de Formation par la REcherche).

Qu'il me soit également permis de remercier tous les membres de la Société L.F.L.M. avec lesquels j'ai pu collaborer et qui ont grandement contribué à rendre ce travail proche des réalités industrielles.

Je remercie avec gratitude Mademoiselle A. VERMEERSCH pour les travaux de dactylographie, accomplis avec beaucoup de soin, et pour l'aide apportée à la réalisation matérielle de ce mémoire.

oOo

S O M M A I R E

PAGE

INTRODUCTION

CHAPITRE I : SITUATION DU PROBLEME 4

I.1. DECOMPOSITION DE LA GESTION DE PRODUCTION 6

I.1.1. Principes de décomposition 6

I.1.1.1. Décomposition horizontale 6

I.1.1.2. Décomposition verticale 7

I.1.2. Niveau long terme 9

I.1.3. Niveau moyen terme 10

I.1.4. Niveau court terme 11

I.1.5. Niveau très court terme 12

I.2. LES CARACTERISTIQUES DU PROBLEME RETENU 14

I.2.1. Description du procédé 15

I.2.2. Présentation du système de conduite 19

I.2.3. Les contraintes 21

I.2.3.1. Contraintes liées aux ordres de fabrication 21

I.2.3.2. Contraintes liées aux ressources 22

I.2.4. Les objectifs 23

I.2.4.1. Utilisation des ressources 23

I.2.4.2. Niveau d'en-cours 24

I.2.4.3. Performances de délai 24

I.3 CONCLUSION 25

CHAPITRE II : LES SYSTEMES DE CONDUITE D'ATELIER 27

II.1. LES SYSTEMES DE CONDUITE CENTRALISES 30

II.1.1. Méthodes manuelles 30

II.1.2. Méthodes optimales 33

II.1.2.1. Programmation linéaire à variables mixtes 33

II.1.2.2. Méthode par séparation et évaluation progressive 34

II.1.3. Méthodes sous-optimales	34
II.1.3.1. Méthodes d'analyse combinatoire	34
II.1.3.2. Méthodes heuristiques	35
II.1.4. Observations sur les diverses méthodes	37
II.2. LES SYSTEMES DE CONDUITE DECENTRALISES	41
II.2.1. Approche déterministe	43
II.2.2. Approche stochastique	45
II.2.2.1. Règles statiques	45
II.2.2.2. Règles dynamiques	46
II.2.2.3. Règles composites	47
II.2.3. Observations sur les règles de priorité	48
II.3. CONCLUSION	50
CHAPITRE III : PROPOSITION D'UN MODELE DE CONDUITE	52
III.1. OBJECTIFS ET PRINCIPES DE LA MODELISATION	55
III.1.1. Rôle du décideur	55
III.1.2. Intégration dans un système décentralisé	56
III.1.3. Capacité d'évolution	58
III.1.4. Principes généraux du modèle	59
III.1.4.1. Recherche d'une solution initiale	59
III.1.4.2. Choix du type de simulation locale	61
III.1.4.3. Schéma général du système de décision	63
III.2. PRESENTATION DETAILLEE DU MODELE	65
III.2.1. Formulation des critères	65
III.2.1.1. Critère d'en-cours	65
III.2.1.2. Critère d'utilisation des effectifs	67
III.2.1.3. Critères liés au temps de passage	68
III.2.2. Décomposition de la procédure de calcul	69
III.2.3. Processus d'arrivée des lots	72
III.2.4. Calcul de la charge initiale d'un moyen	73
III.2.5. Calcul de l'intensité d'un moyen	75
III.2.6. Simulation locale de l'écoulement	76
III.2.7. Poursuite de l'exemple	80

III.3.	PROCEDURES D'AJUSTEMENT	83
III.3.1.	Désignation de postes complémentaires ($\delta_h > 0$)	84
III.3.2.	Suppression de postes ($\delta_h < 0$)	88
III.4.	CONCLUSION	95
CHAPITRE IV : EXPERIMENTATION DU MODELE ET RESULTATS		96
IV.1.	IMPLEMENTATION DU MODELE	98
IV.2.	RECHERCHE D'UNE PROCEDURE D'ESSAI	101
IV.3.	EXPERIMENTATION	103
IV.3.1.	Modélisation de l'atelier	103
IV.3.2.	Procédure expérimentale	105
IV.3.3.	Constitution des jeux de données	108
IV.4.	RESULTATS	112
IV.4.1.	Mesure des performances actuelles	112
IV.4.2.	Résultats de la simulation	112
IV.4.3.	Comparaison des performances	117
IV.5.	CONCLUSION	120
CONCLUSION GENERALE		121
BIBLIOGRAPHIE		
NOTATIONS UTILISEES		

INTRODUCTION

La production industrielle est aujourd'hui soumise à une double évolution : vers l'atteinte d'une meilleure productivité d'une part et vers une flexibilité accrue d'autre part.

La coexistence de ces deux pôles d'évolution au sein des ateliers nécessite d'appréhender le système de production à travers une approche globale, en incluant à la fois les produits, les moyens de production et l'organisation. Les interactions entre ces diverses entités sont en effet complexes et nombreuses. Le nombre de paramètres à considérer amène alors de plus en plus les responsables de production à se doter d'outils de traitement d'information et d'aide à la décision.

Un pas significatif a pu être franchi grâce à l'informatique, dans la planification de la production par l'introduction de la technique MRP en remplacement des modes traditionnels de gestion de stock par recomplètement. Au niveau des ateliers, ce qui nous intéresse ici, un autre pas important a été

marqué par l'automatisation et les techniques de commande appliquées aux procédés continus. Cependant dans les procédés de fabrication discontinus, et en particulier dans les ateliers à forte main-d'oeuvre, comme la bonneterie où la nature du produit rend difficile l'introduction de nouvelles technologies, le développement d'outils logiciels pour aider au pilotage de l'atelier ne s'est pas effectué de la même manière.

Il existe bien aujourd'hui un certain nombre de logiciels d'ordonnement de même qu'il existe des systèmes de saisie de données en temps réel sur les postes de travail mais les premiers sont généralement implantés pour améliorer la flexibilité sans fournir d'assistance à la gestion des effectifs, tandis que les seconds sont essentiellement utilisés pour améliorer la productivité des personnes et des machines sans gérer les lots ni les délais.

Il nous semble donc qu'il y ait à développer des outils associant les deux fonctions et permettant de gérer l'ensemble des ressources, matérielles et humaines, comme peut le faire la technique KANBAN par exemple, dans certains types d'atelier.

C'est ce type d'approche que nous avons retenu ici dans l'élaboration d'un modèle de conduite dédié à un atelier industriel de fabrication d'articles chaussants.

Le premier chapitre situe la conduite de l'atelier dans le contexte général de la gestion de production avant de présenter le procédé physique de fabrication. La problématique retenue est ensuite mise en évidence par l'ensemble des contraintes et des critères à intégrer dans le modèle.

Le second chapitre analyse les diverses approches du problème d'ordonnement, en les classant selon la nature centralisée ou décentralisée du système de conduite, et en dégage les aspects de nature à nous guider dans le choix d'une solution.

Nous proposons ensuite dans le troisième chapitre, un modèle et une méthode d'aide à la décision pour la conduite de l'atelier.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous présentons successivement la mise en oeuvre informatique du modèle, son utilisation dans une simulation de l'atelier réel ainsi que les résultats obtenus et leur comparaison aux performances de l'atelier existant.

CHAPITRE I

SITUATION DU PROBLEME

Avant d'aborder le problème industriel de la conduite d'un atelier de bonneterie, il convient de préciser le concept même de conduite d'atelier. En effet, si le problème du responsable d'atelier est avant tout de satisfaire des objectifs de production exprimés en termes de quantité, qualité, coût et délai, il ne possède pas à lui seul, à travers le pilotage du système physique de production, toutes les réponses à ces exigences. Dans les faits, le comportement de l'atelier est déjà prédéterminé, pour une large part, par la gestion prévisionnelle de la production. Il est évident, par exemple, qu'une opération d'assemblage ne pourra avoir lieu que si l'ensemble des composants a été correctement approvisionné ou encore qu'un étranglement sur l'un des postes de l'atelier ne pourra mener au respect des délais, même en dépit du meilleur ordonnancement. Ces exemples font cependant partie des aléas quotidiens et leur résolution ne peut être approchée d'une manière globale. Aussi, nous allons décrire brièvement les différents niveaux d'une gestion de production avant de nous attacher aux objectifs et à la marge d'autonomie dont dispose le responsable d'atelier. La première partie de ce chapitre décrit la décomposition générale de la gestion de production dans l'entreprise considérée ; la seconde partie présente le problème particulier de l'atelier de finition.

I.1. DECOMPOSITION DE LA GESTION DE PRODUCTION

Nous présenterons d'abord les principes de la décomposition hiérarchisée avant de décrire les niveaux successifs rencontrés dans l'entreprise, du long terme jusqu'au très court terme.

I.1.1. Principes de décomposition

La gestion d'une production industrielle est constituée d'un ensemble de fonctions décisionnelles interdépendantes. Plusieurs éléments induisent la découpe des responsabilités :

- La répartition géographique des unités de production ou des ateliers au sein d'une même unité,
- Les différents horizons sur lesquels il faut collecter l'information et prendre des décisions. L'horizon couvert par un portefeuille de commandes est par nature différent de celui sur lequel il faut gérer les machines dans l'atelier,
- Enfin, la nécessité de répartir les tâches.

L'ensemble de ces aspects met en évidence la nécessité d'une décomposition. Encore faut-il pouvoir maintenir à travers celle-ci la cohésion de l'ensemble du système de décision. L'approche généralement retenue pour satisfaire cette condition obéit aux principes de décomposition hiérarchisée qui ont été mis en évidence d'une façon plus générale à travers l'analyse des systèmes [1]. Nous évoquerons brièvement ces principes qui s'appliquent selon deux axes ; on parle respectivement de décomposition horizontale et verticale.

I.1.1.1. Décomposition horizontale

Une unité physique de production est toujours scindée en différents sous-systèmes, soit par l'implantation physique des salles de travail, soit par la nature du procédé qui implique des étapes techniquement distinctes.

La décomposition horizontale de la commande de ce procédé consiste à créer des unités de conduite *locales et autonomes* rattachées à chacun des sous-systèmes.

Le caractère *local* rend plus aisée la résolution des problèmes qui sont d'une taille plus réduite, comparativement à une prise en compte centralisée. Il favorise aussi, notamment dans le contexte d'un atelier, une prise de décision pertinente car basée sur une connaissance réelle de l'information. Cet état de fait se vérifie d'autant plus là où l'on ne peut transmettre d'une manière exhaustive et rapide l'information nécessaire à la décision. Nous aurons l'occasion d'approfondir ce point dans l'analyse des différents systèmes de conduite.

L'autonomie constitue, quant à elle, l'une des bases d'une structure de décision répartie. Elle doit permettre de réagir aux perturbations locales sans remettre en cause les décisions prises à un niveau supérieur tant que ces aléas n'entravent pas l'atteinte des objectifs fixés. L'intégration d'un taux d'activité dans le plan de charge d'un atelier permet de réagir à tous les incidents courants (pannes, absentéisme, etc.) sans affecter le taux de production prévu. Cette autonomie locale d'un sous-système est toutefois limitée par les interactions avec les autres sous-systèmes. Ces interactions créent le besoin de coordonner les unités locales entre elles.

La coordination permet de rendre cohérents les objectifs locaux et de gérer les conflits éventuels (généralement créés en production par la limitation des moyens). L'objectif de production d'un atelier ne peut être indépendant des quantités de produit final. De la même façon on peut être amené à résoudre un problème local de sous-effectif par un transfert de main-d'oeuvre entre deux secteurs. Cette nécessaire coordination induit un niveau supérieur de gestion et amorce le principe de décomposition verticale.

I.1.1.2. Décomposition verticale

La coordination nécessite de figer les objectifs sur un certain horizon et de ne pas les modifier continuellement en fonction de l'état des ateliers. Si l'entreprise possède plusieurs unités de fabrication, comme c'est le cas ici dans l'étude, il est indispensable d'établir de façon cohérente par rapport au plan de fabrication préétabli les objectifs de production de chaque

unité. Il apparaît ainsi un niveau de coordination supplémentaire, avec un horizon d'observation plus long et une fréquence de réévaluation plus faible qu'au sein d'une seule unité. On peut, à travers ce rapide exemple, caractériser la décomposition verticale par deux composantes majeures :

- Une *échelle de temps* spécifique à chaque niveau. Dans une structure de décision hiérarchisée, plus on s'élève dans la hiérarchie, plus l'information est condensée, plus la fréquence de prise de décision est faible et plus la dynamique d'évolution du système observé est lente. Chaque niveau sera donc caractérisé par un horizon, une période ou fréquence de révision et une précision. Un autre point à ajouter est que plus on s'élève dans la hiérarchie, plus la nature du problème est globale : on parle respectivement de *régulation*, *d'optimisation*, *d'adaptation* [2] et de ce fait les modèles qui peuvent supporter la décision seront différents selon l'échelle de temps concernée.
 - *L'imbrication et la cohérence des décisions*. Dans les liaisons inter-niveaux les décisions prises à un niveau doivent fixer les objectifs pour le niveau inférieur sur un horizon déterminé en y intégrant toujours l'autonomie dont doit disposer ce dernier : pour pouvoir absorber des variations de la demande en produits finis à court terme, il faut nécessairement avoir prévu au niveau supérieur, c'est-à-dire dans le plan directeur, une certaine surcapacité ainsi qu'une couverture en composants. Si la variation se situe au-delà de la marge fixée, il faudra alors réviser le plan directeur. La cohérence peut ainsi être assurée dans la structure de décision.
- On s'aperçoit également que chaque fois que l'on descend d'un niveau pour se rapprocher du "terrain", le cadre des décisions devient de plus en plus précis et figé. On gère successivement les centres de charges critiques, puis l'ensemble des centres de charges et enfin les machines individuelles. De même on fixe successivement la capacité globale de production sur l'année (investissements), la capacité par période (lissage du plan directeur) et l'utilisation de cette capacité à la semaine (lancement). Précisons toutefois que le fait d'évoluer dans un cadre de plus en plus rigide ne s'oppose pas à la souplesse de fonctionnement. Au contraire, dans la mesure où l'autonomie est définie progressivement et où la mission de chaque niveau

est de s'adapter aux événements qui le concernent, une telle structure apparaît comme l'une des plus aptes à gérer une dynamique complexe et à réagir aux aléas : elle met seulement en évidence le fait qu'il est illusoire de penser qu'un système physique puisse être flexible si cette flexibilité n'est pas intégrée dans les décisions des niveaux supérieurs.

En conclusion, la décomposition horizontale peut être qualifiée de décomposition spatiale, la décomposition verticale de décomposition temporelle. Cela revient à transformer un problème complexe peu homogène en plusieurs sous-problèmes aux caractéristiques plus homogènes sur le plan temporel et d'un niveau de complexité sensiblement constant [13]. Le volume d'information à traiter reste en effet à peu près constant dans la mesure où plus la précision des détails à prendre en compte s'accroît, plus l'horizon concerné se raccourcit.

I.1.2. Niveau long terme

Le niveau long terme constitue le niveau supérieur de la gestion de production. Son rôle est de définir, en accord avec la politique commerciale et à partir des tendances du marché et d'indicateurs économiques, l'évolution stratégique des ressources de l'entreprise :

- choix des investissements en matériel (notamment pour le tricotage),
- définition de l'évolution des effectifs,
- politique générale d'organisation,
- évolution de la sous-traitance.

La politique à long terme peut être rapprochée des *fonctions d'auto-organisation* [3] (choix des structures de production, intégration des moyens de production, stratégie d'automatisation, politique sociale) et d'*adaptation* (adaptation des capacités matérielles et humaines à l'évolution des produits à travers des politiques successives à moyen terme).

I.1.3. Niveau moyen terme

Le moyen terme correspond au plan directeur de fabrication [4]. Bien que celui-ci s'étale généralement sur un an, la saisonnalité des ventes de produits chaussants, caractérisée par deux saisons, été et hiver, réduit ici cet horizon à six mois car il y a un renouvellement important des produits lors de chaque saison.

La capacité en matériel est considérée comme figée puisqu'elle a été déterminée par le plan à long terme. La planification à moyen terme a pour rôle d'adapter l'utilisation de cette capacité à une charge commerciale prévisionnelle de la façon la plus économique et en accord avec les services commerciaux. Cela revient à fixer, période par période (le mois), sur l'horizon de planification :

- les volumes à fabriquer par famille de produits. Notons qu'une famille regroupe, pour l'évaluation des charges, l'ensemble des coloris d'un modèle dans une taille donnée ;
- les charges sur les stades directeurs de la production, c'est-à-dire au tricotage puisque les métiers à tricoter, par leur manque de flexibilité, constituent les ressources critiques de l'atelier ;
- les effectifs nécessaires ainsi que les volumes à affecter aux façonniers,
- les approvisionnements des matières et composants ; le calcul des besoins nets jalonnés est effectué selon la technique MRP.

En dehors d'une action directe de lissage de la demande, l'ajustement de la production aux variations de celle-ci est axé autour de deux principes :

- modulation des volumes de stock (anticipation),
- modulation temporaire des capacités (effectifs ou sous-traitance).

Une optimisation du plan directeur doit être obtenue à travers la combinaison de ces deux modes d'ajustement.

D'autre part, comme nous l'avons mentionné plus haut, le plan directeur doit intégrer les éléments permettant aux niveaux inférieurs d'absorber les perturbations courantes (indisponibilité des moyens, absentéisme, taux de rebut, etc.) et éventuellement les aléas externes tels que des écarts de prévisions, dans des limites économiquement acceptables qu'il convient de définir à ce niveau.

I.1.4. Niveau court terme

Nous pouvons définir le niveau court terme comme l'horizon correspondant à la partie du plan directeur engagée en fabrication, c'est-à-dire pour laquelle sont déjà émis des ordres d'approvisionnement ou de fabrication.

Il est donc nécessaire que les demandes ou les prévisions de vente soient fermes sur cet horizon, qui est au moins égal au cycle complet de production (délai d'approvisionnement et délai de fabrication). Dans le cas présent, cet horizon couvre deux à trois mois.

La programmation de la production constitue à travers le calcul des besoins et le positionnement des ordres, une régulation de la charge des postes. Les moyens de régulation sont de même nature que précédemment (action sur les stocks ou capacités) à l'exception de toute action sur la demande, considérée comme immuable, et à l'intérieur des limites fixées par le plan directeur. Les ajustements possibles sont généralement les suivants : avancer ou retarder un ordre, annuler un regroupement en lot économique, recourir aux heures supplémentaires ou à la sous-traitance. Dans le cas du tricotage, qui constitue l'étape maîtresse du procédé, le positionnement des ordres vise surtout à réduire les temps de réglages ; on essaye donc généralement d'ordonnancer à la suite tous les coloris d'un même modèle. La programmation mécanique d'un métier lors d'un changement de modèle est en effet très longue.

Les résultats de ces décisions à court terme s'expriment par :

- un programme détaillé d'approvisionnement,
- un ordonnancement prévisionnel qui précise les dates de lancement fermes pour les premières semaines de l'horizon et prévisionnelles pour les semaines suivantes.

Les fonctions de planification à moyen et à court terme ainsi que la gestion des approvisionnements nécessitent, notamment dans un cadre multi-usine, de recourir à des moyens informatiques. Le choix de la solution informatique, en cours d'élaboration dans la Société, s'est porté sur l'acquisition d'un logiciel standard de gestion de production (type "MRP") moyennant un certain nombre d'extensions spécifiques que nous avons définies lors de nos travaux d'analyse préalables.

I.1.5. Niveau très court terme

Dans notre décomposition de la gestion de production, nous dissociions ici du niveau court terme évoqué un niveau très court terme. En effet, bien que la distinction entre ces niveaux ne soit pas toujours formalisée dans les structures de décision et que l'on trouve assez souvent les deux fonctions réunies dans un même service d'ordonnancement, elle existe quasiment toujours dans les procédures. La formalisation d'un niveau très court terme correspond en fait à l'existence d'un pouvoir de décision *dans* l'atelier.

Ce niveau sera assimilé dans l'exemple étudié à ce que nous appelons, en raison de sa proximité avec le système physique, la conduite d'atelier.

Celle-ci regroupe les fonctions suivantes :

- les lancements en fabrication, incluant la préparation physique des composants, qui marquent le passage d'une gestion prévisionnelle à une gestion réelle,
- le planning d'utilisation du matériel (ordonnancement détaillé),
- l'affectation du personnel aux machines.

L'horizon peut aller de la semaine à la journée selon la durée des opérations, l'organisation et les moyens mis en place pour le suivi de l'état de l'atelier. Les modes de régulation des charges mentionnés dans le paragraphe précédent s'appliquent, par l'ordonnancement détaillé, au niveau de chaque poste ou machine :

- *Régulation par les capacités* : On veut privilégier dans ce cas le temps de passage des lots et on considère alors que le niveau d'encours doit rester faible devant le poste ; une variation locale de la

charge se traduit par une modulation des capacités. Ces capacités peuvent se traduire par des machines flexibles ou encore par un personnel polyvalent et des moyens surcapacitaires dans le cas de machines non flexibles.

- *Régulation par le niveau d'en-cours* : Ce mode de régulation intervient généralement lorsque l'on dispose d'équipements à capacité fixe et pour lesquels on souhaite maintenir un taux d'utilisation élevé. Les variations de la charge au cours du temps se traduisent par une amplitude variable de la file d'attente. La maîtrise des temps d'attente est davantage liée ici à l'efficacité de la méthode d'ordonnement.

Nous verrons d'une façon plus précise, dans le paragraphe suivant, le fonctionnement de l'atelier à très court terme.

I.2. LES CARACTERISTIQUES DU PROBLEME RETENU

L'étude menée ici se situe dans le cadre du démarrage d'une unité de bonneterie fabriquant des articles chaussants.

Le problème de la conduite d'un tel atelier est abordé avec un souci majeur de réalisme et de faisabilité industrielle. Aussi nous importe-t-il de bien préciser la problématique et de mettre en évidence le corps d'hypothèses à l'intérieur duquel les résultats de cette approche peuvent être généralisés.

Pour cela nous pouvons décomposer le système de production en trois sous-systèmes :

- système physique,
- système d'information,
- système de décision,

ces deux derniers constituant ici le système de conduite.

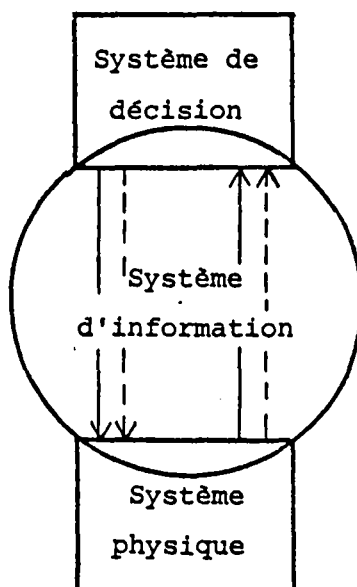


Fig. I.1.

Nous présenterons les caractéristiques de l'atelier, à travers une décomposition horizontale du procédé, avant d'aborder la structure du système de conduite, ainsi que les objectifs à prendre en considération.

I.2.1. Description du procédé

Le procédé de fabrication des articles chaussants (chaussettes et collants épais) se décompose en deux étapes distinctes : le tricotage et la finition.

Le tricotage constitue la première opération où l'on réalise l'assemblage des composants (les divers fils). Les séries d'articles réalisées sur un métier à tricoter au cours d'une saison sont découpées en lots de quelques centaines de paires de façon à pouvoir chevaucher les opérations de finition. Ces lots correspondent administrativement à un ordre de fabrication ou OF (nous retiendrons dans la suite les termes équivalents de *lot* ou *d'ordre*). L'opération de tricotage est la plus longue et la plus coûteuse du procédé (généralement plus de trente heures pour un lot de 300 paires).

La finition rassemble un dizaine d'opérations que l'on peut regrouper comme suit (cf Fig. I.2.) :

- Fermeture de pointes,
- Confection des collants,
- Lavage, traitement divers,
- Formage - Appairage,
- Opérations annexes (rasage de fils, raccoutrage, thermocollage, etc.),
- Conditionnement.

Pour chacune de ces opérations, on dispose d'un ou de plusieurs groupes de machines. Ces machines sont alimentées manuellement et constituent pour la plupart des postes individuels. Les lots suivent une gamme linéaire (il n'y a plus d'assemblage). Les variations de charge sur les postes sont absorbées par la polyvalence et la mobilité des personnes. La durée des opérations peut aller de quinze minutes à plus de deux heures.

La liaison entre les deux secteurs s'effectue par un stock tampon intermédiaire. Celui-ci permet de réguler le flux physique entre le secteur tricotage (travaillant en trois équipes) et la finition (double équipe). Ce stock tampon est suffisant pour alimenter l'atelier aval pendant toute la durée d'une équipe.

Un certain nombre d'articles subit en outre une opération de teinture entre la fermeture de pointes et le formage. Ces articles sont tricotés en fil écru, fermés à la pointe puis stockés ("stock écru"). L'opération de teinture s'effectue ensuite à la demande, de manière à réagir aux effets de mode. Les lots revenant de teinture constituent un second stock tampon alimentant l'atelier de finition.

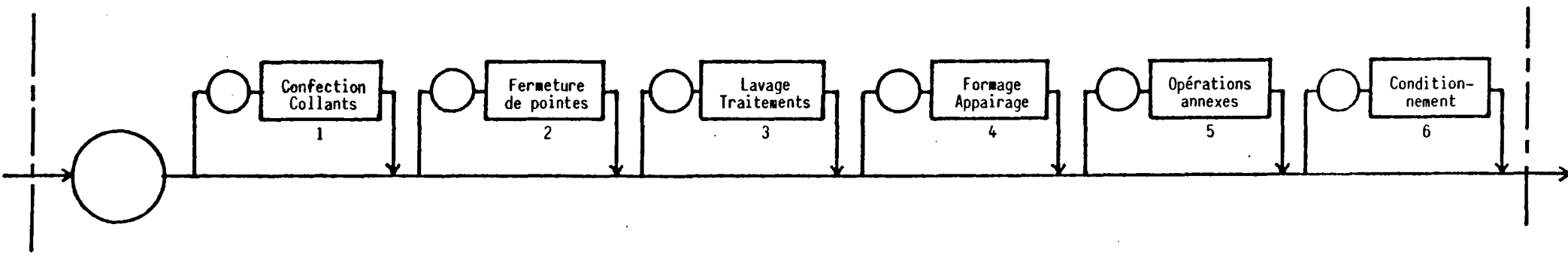
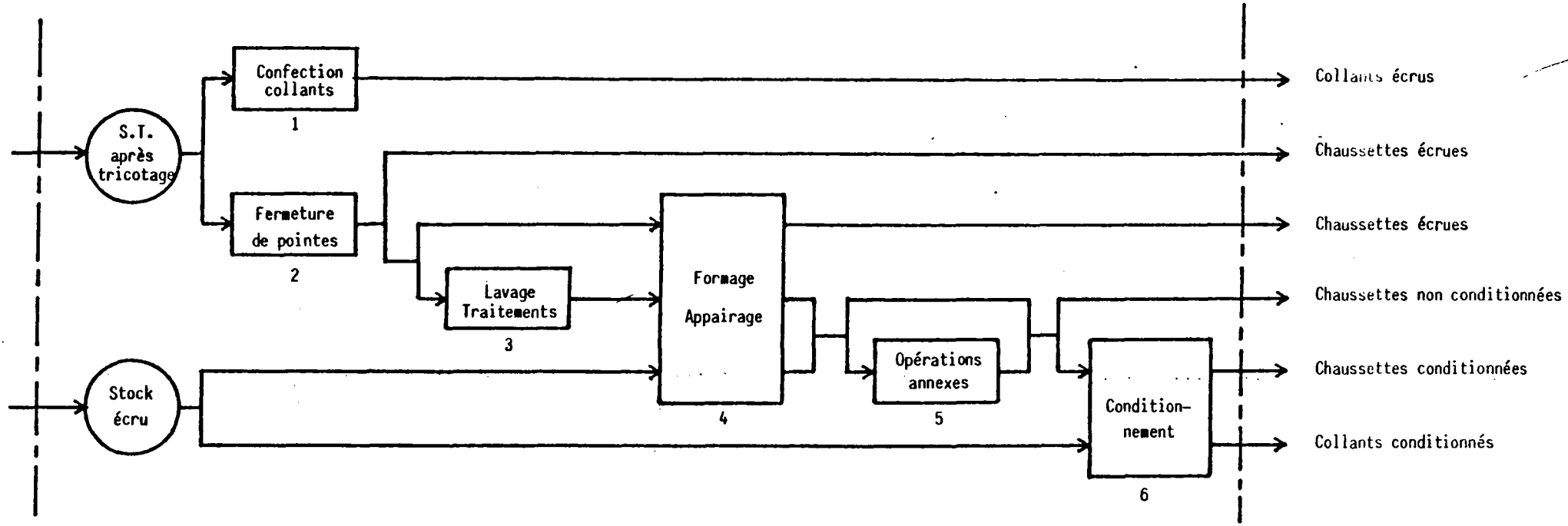
D'une façon spécifique au secteur de l'habillement, le nombre de références à gérer dans les ateliers est ici assez important (environ 800) compte tenu que chaque modèle créé est démultiplié par le nombre de coloris et de tailles.

La présente étude concerne l'atelier de finition, représenté sur la figure I.2.a). On remarque que l'ordre de succession des opérations sur les différents postes est le même pour tous les lots. Cet atelier a donc une structure *d'atelier à flot unique (Flow shop)* comme le montre la représentation de la figure I.2.b). Tous les moyens peuvent être considérés en ligne, en sachant que tous les lots ne passent pas obligatoirement sur tous les moyens. Précisons qu'un *moyen* représente un ensemble de postes homogènes, un *poste* désignant une machine ou un emplacement de travail individuel. Un moyen comportant plusieurs postes est dit *cumulatif*.

Le processus de fabrication est ici décomposé de fait en deux secteurs ou "ateliers". Dans un cadre plus général, l'atelier-type étudié peut être défini comme tout sous-système d'un procédé possédant les caractéristiques suivantes (Fig. I.3.) :

- Atelier à flot unique,
- Gammes linéaires,
- Stock tampon en amont.

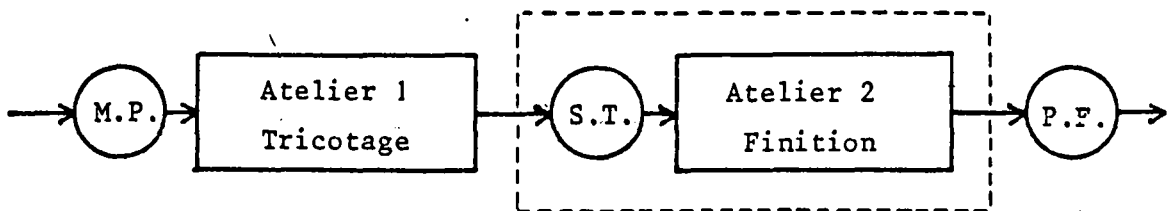
Fig. I.2. Représentation de l'atelier réel sous forme d'atelier à flot unique
(Flow shop)



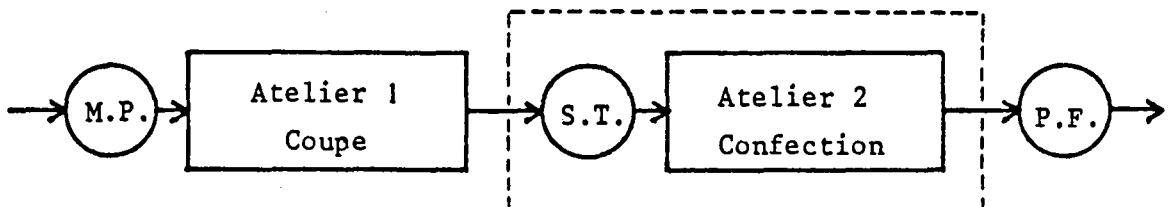
On suppose que le stock tampon minimum est capable d'alimenter l'atelier aval durant une période d'ordonnancement (sa taille maximale dépend des variations possibles du flux d'entrée).

Dans la décomposition d'un procédé complexe en plusieurs sous-systèmes, la constitution de stocks tampon de régulation permet ainsi de donner à chaque système de conduite davantage d'autonomie tout en réduisant la sensibilité aux perturbations d'amont (ceci est d'autant plus vrai dans le cas de lancements simultanés de plusieurs composants). Nous avons cherché en particulier, dans nos travaux de conception de l'atelier, à supprimer l'en-cours là où il n'apporte pas de souplesse réelle à l'outil de production et à le localiser au contraire dans des stocks tampon intermédiaires ; cela permet ici, contrairement aux organisations classiques où l'en-cours est réparti devant tous les postes, de simplifier les flux et donc les équipements de manutention, de mieux contrôler l'équilibre charge/capacité et de réduire les temps de passage dans chacun des tronçons du procédé.

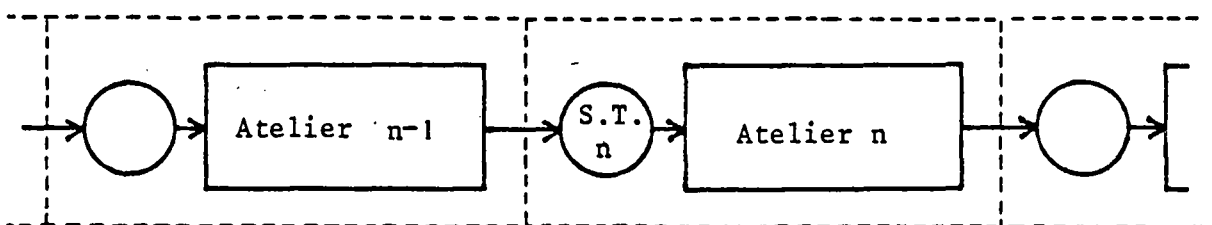
Dans la mesure où les objectifs de conduite sont proches de ceux qui sont énoncés ici, l'étude peut être généralisée aux ateliers présentant les caractéristiques ci-dessus. Nous pouvons citer les ateliers de confection à titre d'exemple [5] [6].



a) Bonneterie (articles chaussants)



b) Confection



c) Atelier-type

Fig. I.3. Généralisation du type d'atelier étudié.

I.2.2. Présentation du système de conduite

Nous avons vu que le système de conduite d'atelier constitue le niveau inférieur d'une structure hiérarchisée qui se confond généralement avec l'organigramme opérationnel de l'entreprise, chaque niveau étant lié à une échelle de temps qui lui est propre.

Dans le cadre de l'atelier étudié, les liaisons existant entre ces différents niveaux sont décrites ci-dessous.

Le service d'ordonnancement central, commun à plusieurs unités de fabrication, gère les approvisionnements ainsi que les lancements au tricotage à partir du programme de fabrication issu du plan directeur. La forte saisonnalité des ventes de produits chaussants nécessite d'anticiper la fabrication et d'alimenter un stock de produits finis. La seule contrainte de délai se traduit de ce fait par l'expression d'un délai moyen de fabrication sans que l'on n'affecte de date de fin à chacun des ordres.

Ce même service gère également les lancements en teinture à partir du stock écru. Ce circuit a pour vocation d'adapter rapidement les coloris des articles à la demande, au moment de la vente. La teinture et la finition de ces produits s'effectuent donc sur commande et imposent de ce fait des contraintes de délai plus sévères.

Dans l'unité de fabrication, la coordination entre les deux ateliers est assurée en liaison avec l'Ordonnancement. L'objectif de celui-ci, à terme, est d'établir de façon cohérente les objectifs locaux de chacun des ateliers, à travers notamment :

- le processus d'arrivée des lots, avec en finition, le choix des priorités à affecter aux fabrications sur stock et sur commande,
- l'équilibre des charges globales des ateliers et le niveau des stocks intermédiaires.

Enfin, au niveau de chaque atelier le système de conduite, que l'on se propose d'étudier en finition, doit permettre de gérer l'utilisation des ressources et l'avancement des lots en fonction des aléas et des objectifs présentés ci-après. Nous décrivons successivement le système de décision et le système d'information dont il est constitué.

Le système de décision comprend le décideur (responsable d'atelier) ainsi que les outils de traitement d'information mis à sa disposition (implantation éventuelle d'un modèle et d'une méthode de conduite). En finition, les personnes sont affectées sur les postes en début d'équipe et y restent pour la durée de l'équipe. Elles exécutent les opérations dans l'ordre d'arrivée des lots, sans qu'il soit utile de leur communiquer des listes de travaux. Le fonctionnement est donc décentralisé et le problème du décideur est surtout un problème de gestion d'effectif.

Le système d'information constitue l'interface entre le système de décision et le procédé physique ; transmission des ordres vers les postes de travail et saisie d'information concernant l'état de l'atelier (position des lots, état des ressources). Ce système d'information est essentiellement caractérisé par la fréquence de mesure et de transmission des ordres. Selon que l'on a traditionnellement une saisie manuelle de l'activité à partir de fiches suiveuses, comme c'est le cas dans l'atelier étudié, ou plus rarement un suivi en temps réel par des terminaux d'ateliers, la fréquence d'observation conditionne le processus de décision.

Nous analyserons donc conjointement, dans la suite, les outils d'aide à la conduite et le système d'information, en essayant de rechercher, à partir du fonctionnement existant, un modèle qui soit ouvert aux perspectives d'évolution.

I.2.3. Les contraintes

L'ensemble des contraintes liées au problème évoqué peut être scindé en deux catégories :

- les contraintes liées aux ordres de fabrication,
- les contraintes liées aux ressources.

I.2.3.1. Contraintes liées aux ordres de fabrication

Les principales contraintes sont d'ordre technologique et définissent les gammes de fabrication. On peut les regrouper, avec les contraintes de délai, sous le terme de "contraintes potentielles" :

- *Contraintes de succession.* On définit ainsi l'ordre dans lequel s'effectuent les diverses opérations sur le lot. L'ordre de séquençement est ici unique pour tous les lots.
- *Contraintes d'utilisation des moyens.* Celles-ci précisent pour chaque opération le moyen ainsi que la quantité de ce moyen utilisée (la durée opératoire intègre le temps de réglage). Les temps de transfert inter-postes peuvent être négligés ; en effet, tous les transports des articles entre postes sont assurés soit par voie pneumatique, soit par des convoyeurs à rouleaux. Les temps de transfert sont de ce fait négligeables.
- *Les contraintes temporelles de dates limites* (dates de début au plus tôt et de fin au plus tard) qui sont à prendre en compte dans le fonctionnement futur.

Ajoutons à ces contraintes le fait que :

- une opération en cours ne peut être interrompue pour en exécuter une autre,
- un lot ne passe qu'une seule fois sur un même groupe de machines (à l'exception des recyclages résultant d'aléas de fabrication).

I.2.3.2. Contraintes liées aux ressources

Les ressources sont composées de l'ensemble des moyens ainsi que de l'effectif total du personnel productif. L'un des rôles du responsable d'atelier est d'affecter les différentes personnes sur les postes. Ce problème d'affectation est caractérisé par un certain nombre de contraintes disjonctives et cumulatives.

- *Contraintes disjonctives sur les postes* : Sauf exception, un poste ne peut exécuter les opérations que sur un seul lot à la fois.
- *Contraintes disjonctives sur l'effectif* : Une personne ne peut être affectée qu'à un seul poste à la fois.
- *Contraintes cumulatives sur les moyens (limitation du cumul des moyens)* : celles-ci définissent le nombre de postes identiques, disponibles en début de période, que comporte chaque moyen.
- *Contrainte cumulative sur l'effectif total* : Cette contrainte exprime le fait que le nombre de postes à pourvoir en début de période doit occuper l'effectif total disponible sur la période.
- *Contraintes cumulatives sur les effectifs locaux* : Un effectif local est défini par le nombre de personnes susceptibles d'être affectées à un moyen donné. Ces contraintes ne sont effectives qu'en cas de marche dégradée (absentéisme). En fonctionnement normal, la polyvalence doit être suffisante pour que ces contraintes n'interviennent pas.
- *Contrainte temporelle sur les moyens* : nous définissons l'intensité d'un moyen [7] comme la quantité de ce moyen utilisable sur la période (nombre de postes actifs). L'intensité de chacun des moyens est considérée comme fixe sur toute la période, étant donné qu'il n'est pas souhaitable en règle générale, pour des raisons de productivité et de conditions de travail, de déplacer les personnes en cours d'équipe.

I.2.4. Les objectifs

La gestion d'une unité de fabrication obéit à des critères multiples. La diversité des critères pouvant être pris en compte traduit trois objectifs majeurs :

- l'utilisation des capacités,
- le niveau d'en-cours,
- les performances de délai.

Or dans les procédés discontinus par la diversité des gammes et des temps opératoires, ces divers objectifs ne peuvent être obtenus simultanément ; il est nécessaire de réaliser un compromis. Seuls les procédés continus permettent de satisfaire simultanément ces trois objectifs, d'où la tendance à "fluidifier" la fabrication par lots pour approcher un fonctionnement continu.

La difficulté au niveau du système de décision est alors de choisir les variables de décision appropriées. En effet, on ne peut définir de manière analytique l'ensemble des relations liant les variables-objectifs entre elles (variables d'observation) ainsi que les relations liant celles-ci aux variables de décision.

Nous allons exprimer ici la transcription des objectifs au niveau de l'atelier de finition.

I.2.4.1. Utilisation des ressources

Dans l'atelier de finition, l'objectif est d'obtenir une *utilisation maximale de l'effectif total*. En effet, le rapport du coût main d'oeuvre / matériel est de l'ordre de 80/20. Il y a donc un intérêt évident à privilégier l'utilisation du personnel sur celle du matériel, ce qui revient à minimiser les temps de rupture sur les postes actifs et à adopter le principe d'une surcapacité en matériel.

I.2.4.2. Niveau d'en-cours

L'objectif d'une *réduction des files d'attente devant les postes* répond à plusieurs souhaits :

- d'une part une réduction des coûts liés aux en-cours : surface, manutention, gestion (le coût d'immobilisation étant plus discutable dans le cas d'une fabrication par anticipation),
- d'autre part une réduction du temps de passage moyen, puisque l'on sait que le nombre moyen de lots en-cours $\bar{N}$ et le temps de passage moyen des lots $\bar{P}$ sont liés par la relation (LITTLE, [8]) :

$$\bar{N} = \lambda \bar{P} \quad (\lambda : \text{taux d'arrivée moyen des lots}).$$

Cette réduction du temps de passage moyen présente surtout un intérêt aujourd'hui pour le circuit de teinture en plongée qui obéit à un fonctionnement à la commande.

I.2.4.3. Performances de délai

Les critères de délai ne sont pas prédominants dans le fonctionnement actuel, mais c'est ici qu'il nous faut introduire les perspectives d'évolution du fonctionnement de l'atelier. En effet, plusieurs facteurs concourent à introduire, en plus de la gestion des effectifs, une gestion des délais. On peut citer :

- un rapprochement de la fabrication et de la vente (moins d'anticipation),
- la tendance à créer des séries plus courtes et renouvelées plus fréquemment,
- la possibilité à terme d'injecter dans l'atelier des lots qui subissent uniquement des opérations de conditionnement ou de préparation de commandes.

Par rapport à ces perspectives, il apparaît d'une part, que l'avancement des lots doit se faire en fonction de la *date de fin* et, d'autre part, que les différents circuits de fabrication internes à l'atelier font naître une notion de *priorité relative* des circuits entre eux. Notons d'une façon générale que plus les lots sont injectés près du conditionnement, plus ils demandent une rapidité d'exécution. Il nous faut donc rechercher ici une forme d'ordonnancement adaptée à ce fonctionnement futur.

I.3. CONCLUSION

Nous avons situé le problème de conduite d'atelier dans l'environnement général de la production. Si l'on se réfère à une classification couramment retenue, celle de B. ROY [9], il nous faut ranger celui-ci dans la classe des problèmes de type (T,W) puisqu'il fait intervenir comme inconnues à la fois les caractéristiques d'époque (notées T) dans le sous-problème d'ordonnement et les caractéristiques de moyens (notées W) dans le sous-problème d'affectation des effectifs. Le problème étant ainsi défini, nous allons pouvoir élaborer un modèle et une méthode de résolution adaptés.

La recherche d'un outil de conduite obéit au souhait d'améliorer les performances de l'atelier. L'efficacité de cet outil doit se traduire physiquement ici par une réduction des en-cours de fabrication.

En effet, dans un système de production décentralisé, tel que celui-ci où l'on ne dispose pas d'outil d'aide à la conduite, la charge de travail des postes est communément évaluée par la longueur des files d'attente devant chaque poste. L'amplitude de ces files constitue alors, outre sa fonction de régulation, la principale variable de décision pour affecter les personnes sur les postes de travail. Il est à noter, de ce fait, que l'en-cours a une certaine tendance à augmenter puisqu'il constitue au niveau de chaque poste une marge de sécurité pour le décideur.

Dès lors que l'on souhaite réduire les files d'attente devant les postes tout en minimisant les risques de rupture d'alimentation, il devient nécessaire d'évaluer prévisionnellement la charge qui sera affectée sur le poste au cours de la période à ordonnancer ; ceci de façon à ce que le décideur conserve la maîtrise des flux, en dépit d'une moins grande autonomie. Une réduction de l'en-cours implique en effet d'aller d'un mode de régulation par le niveau d'en-cours vers un mode de régulation par les capacités ; cela nécessite une souplesse accrue dans l'utilisation des moyens et une connaissance plus fine de l'état de l'atelier.

Avant de proposer un modèle qui réponde à ces souhaits, nous allons examiner, dans le chapitre suivant, les diverses approches du problème d'ordonnement afin de les confronter et de nous guider dans le choix d'une solution adaptée à notre problématique.

Seront examinées successivement dans le chapitre II les méthodes d'ordonnement - au sens général du terme - propres aux systèmes centralisés et aux systèmes décentralisés. Elles concerneront donc selon les cas le niveau de conduite ou à la fois les deux niveaux court terme et très court terme.

CHAPITRE II

LES SYSTEMES DE CONDUITE D'ATELIER

La résolution des problèmes d'ordonnancement est couramment abordée par la présentation des différentes méthodes dont on dispose. Cependant, dès que l'on souhaite implanter l'une d'entre elles en milieu industriel, il devient nécessaire de considérer l'ensemble du système de conduite, c'est-à-dire à la fois le système de décision et le système d'information.

En effet, comme nous le verrons plus loin, une méthode donnée n'est pas forcément cohérente avec le système d'information existant et d'autre part c'est également à travers ce système d'information qu'intervient le coût et donc la justification économique du système de conduite.

Nous présenterons ici un classement des différents systèmes selon leur nature, en distinguant :

- les systèmes centralisés,
- les systèmes décentralisés.

Ce critère de distinction, fondé sur la structure, nous semble en effet le plus significatif pour évoquer tous les éléments nécessaires à la conduite :

- la saisie d'informations dans les ateliers pour le suivi des lots et des ressources (matérielles et humaines),
- la transmission des ordres au niveau de chaque poste,
- l'importance du rôle des personnes dans la fonction décisionnelle, notamment pour la prise en compte des perturbations (nous ne nous situons pas ici dans le cadre d'ateliers automatisés).

Nous analyserons également l'écart qui existe entre les méthodes issues des travaux de Recherche Opérationnelle, séduisantes, mais très peu utilisées, et les méthodes pragmatiques, souvent peu formalisées, utilisées dans la pratique ; ceci non pas dans le but d'opposer les deux approches, mais au contraire d'identifier les conditions nécessaires à une saine implantation d'un système de conduite. Il convient pour cela de classer auparavant les différents problèmes.

On distingue couramment deux types de problèmes d'ordonnancement :

- *Les problèmes statiques* : l'ensemble des lots ou tâches à ordonnancer est simultanément disponible pour être exécuté. Aucun autre lot ne sera pris en compte tant que tous ces lots ne seront pas réalisés.
- *Les problèmes dynamiques* : les lots peuvent être disponibles à l'entrée ou arriver de façon continue dans l'atelier. Dans les deux cas, les lots en-cours sur les postes sont intégrés dans l'ordonnancement.

La conduite d'atelier est un problème dynamique, caractérisé en outre par un certain nombre de paramètres. De façon à formuler ceux-ci d'une manière synthétique, nous allons adopter la notation de CONWAY [10] dans laquelle tout problème d'ordonnancement est représenté par le quadruplet A/B/C/D, où A définit le nombre de lots, B le nombre de moyens ou postes, C le type d'atelier et D le critère d'évaluation de l'ordonnancement.

Les symboles utilisés seront les suivants :

- A) n , nombre total de lots à ordonnancer,
- B) m , nombre total de moyens, lorsque ceux-ci sont en exemplaire unique,
 M , nombre total de postes dans le cas de moyens cumulatifs,
- C) G , atelier à flot quelconque (*job shop*) ;
l'ordre de succession des opérations sur les postes est quelconque
 F , atelier à flot unique (*flow shop*),
- D) F , travail total en cours dans l'atelier,
 $\bar{N}$, nombre moyen de lots en cours,
 P , temps total de passage (de tous les lots à ordonnancer),
 $\bar{P}$, temps de passage moyen des lots,
 R , retard total des lots (par rapport à la date de fin au plus tard),
 $\bar{R}$, retard moyen des lots,
 $\bar{U}$, taux moyen d'utilisation des moyens,
 $\bar{W}$, temps attente moyen des lots,
 V , critère quelconque ou multiple.

A titre d'exemple, le problème que nous étudions d'un atelier à flot unique, comportant des moyens cumulatifs et soumis à des objectifs multiples s'écrira : $n/M/F/V$.

II.1. LES SYSTEMES DE CONDUITE CENTRALISES

Ce mode de conduite représente l'ordonnancement traditionnel (Fig.II.1.) et suppose l'existence d'un service central vers lequel convergent régulièrement des informations précises sur :

- les capacités disponibles des postes de travail,
- l'état d'avancement des en-cours,
- les nouveaux ordres à lancer.

Ce service a pour rôle de suivre la progression des lots sur les postes et de réaliser les ajustements nécessaires tout au long du procédé.

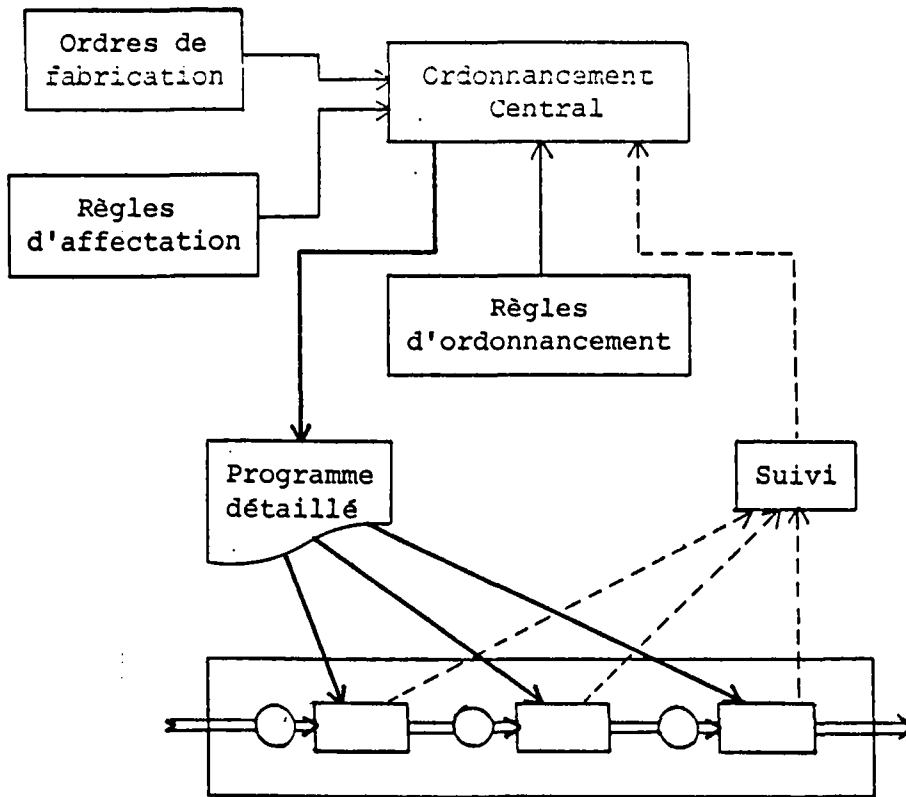
Le principe des méthodes employées est de proposer un jalonnement précis des lots à fabriquer à partir des gammes et des capacités disponibles, de façon à communiquer en retour à l'atelier un programme d'activité détaillé par poste de charge ("liste de travaux"). Le jalonnement peut être obtenu par diverses techniques que nous présenterons ci-après, en insistant davantage sur les conditions et les limites d'utilisation (et en les situant par rapport au problème posé) plutôt que sur le détail des techniques elles-mêmes.

Les méthodes présentées ici se situent toutes dans le cadre d'une approche déterministe.

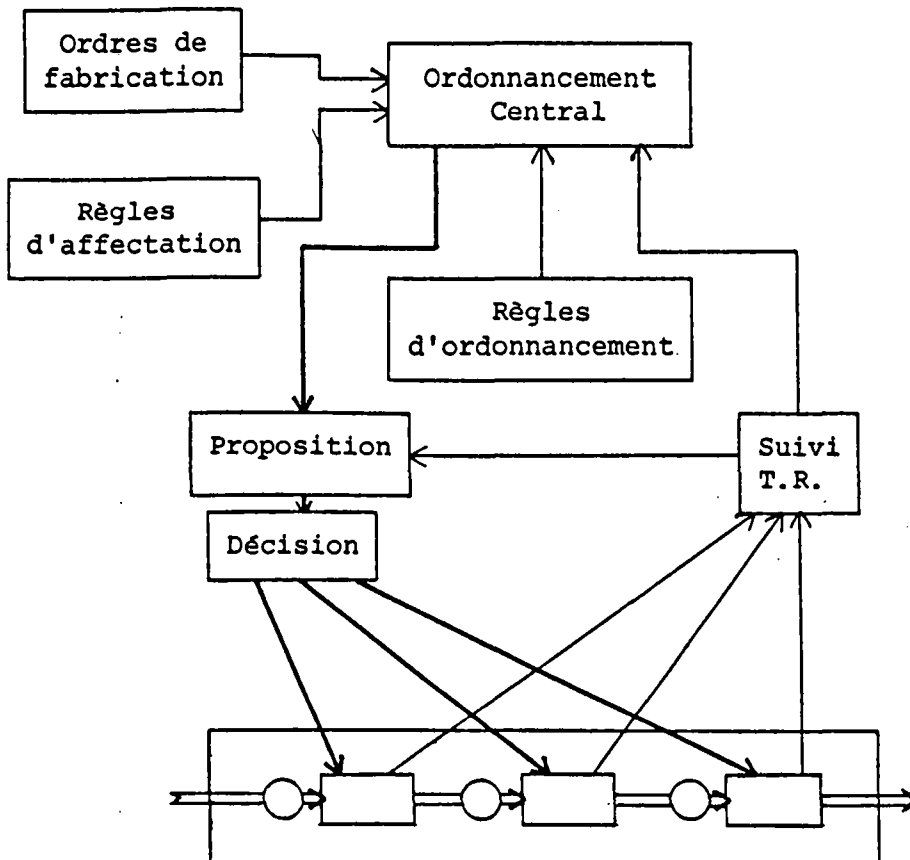
II.1.1. Méthodes manuelles

La technique la plus répandue consiste à utiliser le diagramme de GANTT (diagramme à barres) comme support, avec les règles d'affectation suivantes :

1. *Chargement au plus tôt (progressif)*. Le lot choisi est positionné en partant de la date de début au plus tôt de la première opération, c'est-à-dire généralement la date de disponibilité des composants ou celle des moyens et outillage (déterminée par le niveau supérieur). Les opérations suivantes sont ensuite chargées dans l'ordre de la



Type déterministe (différé)



Type "Aide à la décision" (temps réel)

Fig. II.1. Types de conduite centralisée

gamme dans les emplacements libres sur le diagramme des capacités. La marge libre, lorsqu'elle existe, se trouve alors en aval.

Cette règle tend à mieux utiliser les capacités. On peut considérer que le critère principal est le taux d'utilisation des moyens $\bar{U}$.

2. *Chargement au plus tard (régressif)*. Dans ce cas, le lot est positionné à partir de la date de fin au plus tard de la dernière opération qui correspond à la date d'exigibilité ou de mise à disposition du client. Les autres opérations sont positionnées en remontant la séquence indiquée par la gamme, la marge libre éventuelle se trouve ainsi en amont.

Cette règle tend à minimiser les en-cours (critères F , $\bar{N}$, ...) et vise à un meilleur respect des délais (R). Elle est la plus utilisée.

Dans la pratique, ces deux règles sont presque toujours utilisées simultanément : chargement au plus tard pour les ordres prioritaires et chargement au plus tôt pour les ordres restants ou ceux qu'il est impossible de planifier au plus tard (date de début au plus tard antérieure à la date de l'ordonnancement). Notons aussi qu'avant l'étape de chargement, la façon dont on sélectionne successivement les ordres à charger constitue une affectation implicite de priorités. Cette notion de priorité est gérée d'autre part en aval par les interventions de lissage des charges (déplacement des opérations, fractionnement, compression des temps de transfert, ...).

Si l'on essaye de caractériser les méthodes manuelles, on peut dire des solutions obtenues qu'elles sont *réalisables*, *non optimales* et qu'elles visent la satisfaction d'un ensemble de critères liés le plus souvent aux lots considérés (*multicritères*).

La difficulté essentielle du problème d'ordonnancement tient à sa nature combinatoire et donc au nombre de solutions. Faute de pouvoir explorer l'ensemble de ces solutions dans une procédure manuelle, il faut réduire la dimension du problème, ce qui s'opère ici par introduction de contraintes (dates au plus tôt, au plus tard) et par des choix a priori. Cela permet de converger rapidement vers une solution finale sans que l'on sache toutefois en apprécier l'efficacité. Des recherches pour améliorer la qualité des solutions ont amené à utiliser l'informatique et les techniques d'optimisation.

II.1.2. Méthodes optimales

Ces méthodes recherchent une solution d'ordonnancement qui minimise un critère donné après avoir intégré et formalisé toutes les données et contraintes du problème.

On distingue la programmation linéaire à variables mixtes et la méthode SEP (Séparation et Evaluation Progressive). Nous ne citerons la méthode d'énumération complète que pour fixer la dimension du problème, celle-ci rendant de toute évidence le calcul impossible pour des problèmes industriels ; les ordonnancements théoriques pour un problème $n/m/F/P$ sont au nombre de $(n!)^m$, soit pour le cas 20/7/F/P pas moins de 5.10^{128} séquences !

II.1.2.1. Programmation linéaire à variables mixtes

Les méthodes de programmation linéaire requièrent une formulation du problème à l'aide de deux types de variables :

- les dates de début de chaque opération, qui sont les inconnues,
- des variables booléennes qui servent notamment à exprimer les contraintes d'utilisation des moyens (contraintes disjonctives).

Les contraintes de succession sont formulées à partir des dates de début et des temps opératoires sous forme d'inégalités de potentiel.

La fonction à minimiser la plus souvent étudiée est le temps total de passage P mais elle peut exprimer les divers critères ($\bar{P}$, R , ...).

L'introduction de variables booléennes alourdit considérablement le nombre de variables et ainsi la dimension du problème. Dans l'exemple précédent 20/7/F/P, il faut ajouter aux 140 inconnues (formulation de MANNE) [11] 1330 variables booléennes, celles-ci devant vérifier au total 2800 contraintes ($m.n^2$).

La méthode s'avère ici suffisamment lourde pour ne pas l'étendre aux ateliers comportant des moyens cumulatifs.

II.1.2.2. Méthode par Séparation et Evaluation Progressive

Les difficultés de résolution des programmes linéaires ont conduit à rechercher des méthodes plus rapides basées sur une énumération partielle des solutions.

La méthode d'énumération implicite S.E.P. ("Branch and Bound") consiste à choisir dans l'arborescence des solutions, la branche pour laquelle un minorant du critère retenu est minimal.

On ne parcourt donc l'arbre des solutions possibles qu'en considérant un nombre limité d'entre elles, contrairement à l'énumération complète.

Le critère retenu est toujours le temps total de passage P et le mode de calcul s'accorde bien avec une formulation à partir de graphes (paires de disjonction).

L'efficacité du calcul est surtout liée à la détermination du minorant et l'obtention d'une solution optimale est souvent longue et coûteuse, d'autant que le temps de calcul augmente exponentiellement en fonction de la taille du problème. La résolution peut néanmoins être plus rapide si l'on accepte d'obtenir des solutions sous-optimales.

La méthode se limite donc aux problèmes $n/m/F/P$ ou $n/m/G/P$ de faible taille.

II.1.3. Méthodes sous-optimales

Outre le cas particulier d'utilisation de la méthode S.E.P. pour des solutions sous-optimales, on peut distinguer deux familles de méthodes, les méthodes analytiques combinatoires et les méthodes heuristiques.

II.1.3.1 Méthodes d'analyse combinatoire

Ces méthodes sont développées dans le cadre du L.A.A.S. [12] en partant de certains travaux de CONWAY [10]. L'approche du problème se caractérise par

une recherche, dans l'ensemble des solutions, de sous-ensembles remarquables, ce qui permet de réduire la dimension du problème. Ces sous-ensembles doivent être *admissibles* (respect des contraintes sur les dates limites et les moyens) et *dominants* (meilleurs au sens du critère retenu).

Des conditions nécessaires et suffisantes d'admissibilité ont été mises en évidence par l'analyse sous contraintes (ERSCHLER [¹³]) tandis que des conditions nécessaires de dominance ont été démontrées à travers l'étude des structures pyramidales des diagrammes de GANTT (COUZINET [¹⁴]) ou encore la recherche de circuit dans des graphes (FONTAN [¹⁵]).

Les problèmes dynamiques sont traités par ces méthodes comme une série de problèmes statiques enchaînés.

L'intérêt de ces méthodes est de se prêter à une application d'aide à la décision dans la mesure où la solution proposée au décideur n'est plus unique et figée, mais comporte des degrés de liberté permettant d'ajuster celle-ci en temps réel en fonction des perturbations et de l'état de l'atelier.

Cependant les résultats obtenus aujourd'hui sur des exemples limités n'ont pas encore été appliqués à des problèmes industriels de type $n/M/G/V$ ou dans notre cas, $n/M/F/V$.

II.1.3.2. Méthodes heuristiques

On désigne ici sous ce terme une grande variété de méthodes qui peuvent être utilisées pour résoudre des problèmes industriels. C'est pourquoi nous nous attarderons davantage sur celles-ci dans la suite de l'exposé. Leur capacité à résoudre des problèmes de grande taille s'obtient au détriment de l'optimalité de la solution.

La première famille de méthodes présentée ici regroupe celles qui sont adaptées à un fonctionnement centralisé, c'est-à-dire qui fournissent périodiquement à chaque poste une solution séquentielle d'ordonnancement. La plupart sont commercialisées sous forme de modules intégrés dans des logiciels de gestion de production ⁽¹⁾ ou encore sous forme de produits autonomes portables sur mini ou micro-ordinateur ⁽²⁾.

(1) TSAR II (Production Systèmes), MM-PM 3000 (Hewlett-Packard), IMSTD (CII-HB), SLR (IBM)...

(2) SAGA (Ordomatique), SAVEPLAN (CMG), SYSGEDA (Cartatout)...

Chaque produit possède des spécificités qui lui sont propres ; on peut néanmoins essayer d'extraire les principes communs généralement adoptés en distinguant les fonctions suivantes :

1. Affectation de priorités externes (commerciales) aux différents ordres en attente de lancement.
2. Jalonement automatique des ordres, selon les modes classiques (cf. § II.1.1) progressif, régressif, mixte ("rétro-progressif") ou forcé. Le choix est souvent laissé à l'initiative de l'utilisateur.
3. Chargement des postes et lissage des charges. Deux modes de chargement sont possibles : à capacité finie ou infinie. Dans le premier cas, le système effectue le lissage par report automatique des ordres dès que la capacité d'un centre de charge est saturée. Ces reports peuvent se faire aussi bien en amont qu'en aval dans les systèmes les plus élaborés. Les autres moyens habituels pour réduire les surcharges peuvent également être proposés par le système : chevauchement des opérations, fractionnement des lots, compression des temps inter-opératoires, gammes de remplacement, heures supplémentaires, etc.

Dans le chargement à capacité infinie, le système se contente de positionner les ordres aux dates issues du jalonement, en signalant les surcharges.

Notons que les deux approches convergent dans les procédures interactives puisque, que le système propose ou non des actions pour réguler la charge, la décision finale revient généralement à l'utilisateur.
4. Réévaluation des priorités (internes) des ordres en cours. L'enchaînement des opérations sur les postes est géré par des règles de priorité ; les indices peuvent être recalculés en fonction de l'avancement des lots en cours. Les règles à appliquer (cf. § II.2.2.) sont plus ou moins complexes et hiérarchisées. Le choix en est généralement laissé au décideur.
5. Simulation de l'écoulement des ordres sur des périodes plus courtes (la journée) et au niveau de chaque machine, par ponction des lots dans les files d'attente ; en respectant les priorités calculées, de façon à fournir aux différents postes la liste prévisionnelle des travaux à effectuer.

Si, de fait, ces méthodes ne font que formaliser les techniques manuelles (en y incluant les règles de priorité) leur intérêt provient surtout de la rapidité du traitement qui permet un ordonnancement quotidien, même avec un volume d'informations élevé. Le premier critère d'application de ces outils informatiques s'exprime souvent par le souhait de raccourcir les délais (et conjointement les en-cours). Dans ce cas l'efficacité des solutions apportées au problème $n/M/G/R$ dépend des règles de priorité choisies (externes et internes) et les possibilités de simulation ne contribuent qu'imparfaitement à la recherche de solutions admissibles et dominantes.

II.1.4. Observations sur les diverses méthodes

L'exposé des méthodes précédentes révèle une progression vis-à-vis des objectifs recherchés. Le tableau II.2 en résume les principales caractéristiques.

Il apparaît d'une façon générale que plus on veut tendre vers une solution optimale, plus on s'éloigne des problèmes de grande taille - et donc a fortiori des problèmes réels - et plus on s'éloigne nécessairement d'un calcul en temps réel - et donc de la situation réelle de l'atelier - ; d'où de sérieuses réserves quant à l'utilité de la solution. Ces réserves peuvent être examinées d'un point de vue théorique et d'un point de vue pratique.

Au niveau théorique, plusieurs facteurs s'opposent à une solution optimale :

1. Le caractère *statique* du problème, qui suppose que sont disponibles à une date donnée tous les lots à ordonnancer sur la période ; ceci est difficilement compatible avec le fonctionnement d'un atelier où l'arrivée des lots se fait de façon continue et où des lots sont en permanence en cours sur les machines.
2. Ensuite la solution est optimale vis-à-vis d'un *critère unique*, souvent le temps total de passage P . Ce critère est surtout inspiré des méthodes de chemin critique pour la conduite de projet unique et s'avère peu réaliste pour la conduite d'un atelier de production.

METHODES	QUALITE DE LA SOLUTION	TAILLE DU PROBLEME	ADAPTABILITE AUX PROBLEMES DYNAMIQUES	CRITERES	UTILISATION PRATIQUE
P.L.V.M.	Optimale	très réduite	très faible	P (autres) P, R	Non utilisée en industrie
S.E.P.	Optimale ou sous-optimale	assez réduite	assez faible	P	Non utilisée en industrie
M.A.C.	Non optimale mais dominante	Extension à des moyens cumulatifs en cours	Oui par enchaînement de problèmes statiques et aide à la décision (TR)	P + décideur	A l'état de recherches
HEURISTIQUES	Seulement réalisable et présumée relativement bonne.	Problèmes de grande taille Ex 500/100/G//	Oui, relative rapidité de calcul. Ex 15mn/3500 opér. (Utilisation quotidienne).	Compromis entre critères multiples.	Implantations industrielles
MANUELLES	Réalisable ("de bon sens") sans connaissance a priori des performances.	Appliquées à des problèmes de grande taille mais difficiles à mettre à jour.	Faible. Charge de travail élevée pour mise à jour (utilisation hebdo.).	Non formulés	Utilisation courante

Fig. II. 2. Méthodes d'ordonnancement applicables aux systèmes centralisés.

3. Et enfin, l'atelier constitue un système *perturbé* par nature. Les nombreux aléas (pannes, absentéisme, écarts sur temps standard) ajoutés aux *simplifications* introduites dans la formulation du problème offrent toutes les chances à la solution optimale de n'être pas réalisable.

D'un point de vue pratique, l'inconvénient majeur des méthodes optimales est aussi ce manque d'actualité par rapport à l'état réel de l'atelier, inconvénient partagé également par les méthodes manuelles. En effet, dès qu'une méthode s'avère lourde et complexe, les solutions obtenues ne peuvent être actualisées à une fréquence suffisante et il s'amorce alors inévitablement un processus de dégradation du fonctionnement.

Dès qu'un aléa se produit sur un lot, celui-ci se répercute en cascade sur les autres lots (effet "entonnoir" dans diagramme de GANTT) ; ce qui aboutit toujours à ce qu'un lot devant être pris en main au niveau d'un poste ne se trouve pas dans la file d'attente, l'ordonnancement s'effectue alors de façon décentralisée, non coordonnée et favorise très vite l'accumulation d'en-cours et le non respect des délais. Ce phénomène est d'autant plus probable que plus une solution d'ordonnancement est optimisée, plus elle est sensible aux perturbations et plus elle risque alors d'être discréditée par les utilisateurs.

Ajoutons à ces inconvénients le coût et la puissance de calcul nécessaires.

Ces observations nous amènent à la conclusion que les seules méthodes conciliant les contraintes de mise en oeuvre industrielle et les objectifs de performance, dans les systèmes centralisés, restent les méthodes heuristiques et d'analyse combinatoire, comme il est cité dans [16] (KING, 1979) :

"... Il semble qu'il n'y ait pas lieu de rechercher des solutions optimales aux problèmes d'ordonnancement tels qu'ils se posent couramment dans les situations pratiques ; il est certain que celles-ci se situent, au moins dans un avenir proche, bien au-delà des capacités disponibles des calculateurs. Pour de tels problèmes, il apparaît que nous devons nous concentrer sur l'élaboration d'algorithmes heuristiques... visant des solutions approchées qui soient satisfaisantes, même si elles peuvent ne pas être optimales."

Les méthodes heuristiques employées aujourd'hui sont compatibles avec une utilisation quotidienne. La difficulté reste cependant de juger les solutions par rapport aux objectifs à atteindre. On comprend bien dès lors l'effort de recherche porté sur les méthodes d'analyse combinatoire qui cherchent à allier l'intérêt pratique - concept d'aide à la décision et calcul en temps réel - et l'intérêt théorique - notion de dominance -. Elles n'ont cependant été appliquées aujourd'hui qu'à des problèmes restreints et leur extension à des problèmes de type $n/M/G/V$ ou $n/M/F/V$ n'est pas encore réalisée. Elles nécessitent également un système de saisie d'informations en temps réel.

On peut opposer aux systèmes de conduite évoqués ici une philosophie des systèmes décentralisés qui s'appuie selon les cas, sur les types d'organisation rencontrés dans l'atelier, l'aspect économique, ou encore la conviction face aux systèmes classiques, qu'une dépendance vis-à-vis de l'informatique peut réduire l'esprit d'initiative des personnes ainsi que leur aptitude à réagir aux incidents. Nous verrons comment nous situer par rapport à ces différents points de vue après avoir présenté les systèmes de conduite décentralisés.

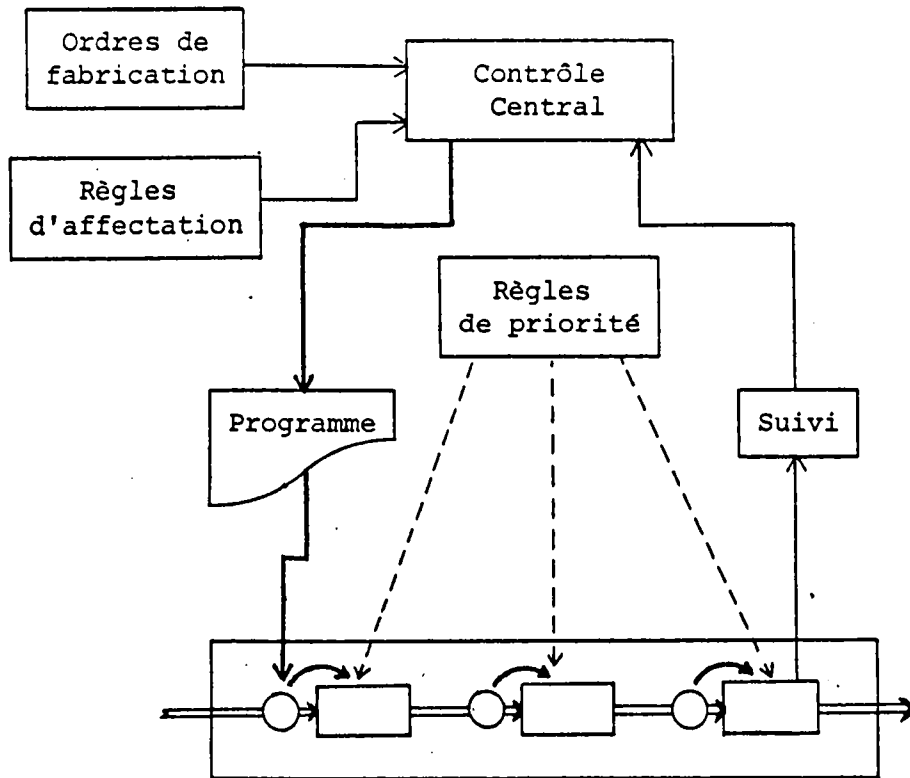
II.2. LES SYSTEMES DE CONDUITE DECENTRALISES

Dans les systèmes décentralisés, il existe toujours une structure centrale qui établit les programmes de fabrication et les lancements (niveau CT) mais ceux-ci sont transmis seulement à la première ou à la dernière étape du procédé. Les ajustements sont effectués par une communication mutuelle entre les postes, sans que le contrôle central ne donne d'instruction aux postes intermédiaires (cette communication peut même ne s'établir que par le flux physique des produits).

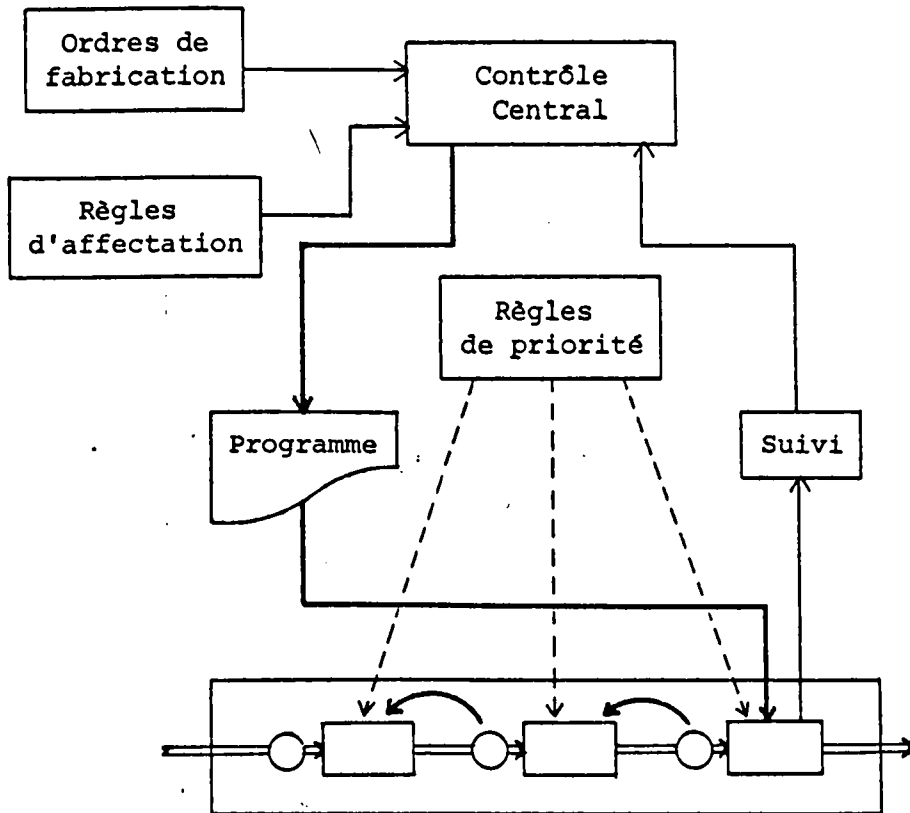
Pour choisir l'ordre à effectuer parmi la file d'attente, chaque poste doit alors disposer d'un critère de décision. Ce critère ou indice de priorité est établi à partir de règles choisies par le niveau central en fonction des objectifs de conduite souhaités. Nous passons donc d'un *ordonnancement global* (vu précédemment) à un *ordonnancement local* qui prend nécessairement en compte l'état instantané des files d'attente *au moment* de la décision.

Au niveau de la structure et du fonctionnement, on peut distinguer deux types de systèmes d'information (cf. Fig II.3.).

1. *Système "push"* : Le programme de fabrication est transmis aux postes qui effectuent la première opération de chaque lot ; chaque poste applique ensuite une règle de priorité sur les ordres en provenance du poste précédent. La création des files d'attente constitue donc une programmation implicite du travail de chaque poste. Les flux-produit et flux d'information circulent dans le même sens.
2. *Système "pull"* : L'information relative au programme de production est transmise à la dernière étape du procédé. Chaque poste intermédiaire doit alors exécuter les opérations sur les lots demandés par le poste suivant. Les flux-produit et flux d'information circulent en sens inverse.



Type "push"



Type "pull"

Fig. II.3 Types de conduite décentralisée

Les systèmes pull constituent un cas limite pour le problème de conduite que nous étudions ici. Ils peuvent en effet s'appliquer aux ateliers à flot unique comportant des lots différenciés par leur gamme de fabrication mais leur emploi est limité par le nombre de lots de nature différente pouvant être géré simultanément ainsi que par des conditions de stabilité de la demande pour chacun des types de produits (ratios de production des différents lots) ; sous peine d'accroître considérablement le niveau d'en-cours, alors que l'objectif majeur visé par les méthodes appliquées à ces systèmes est précisément la réduction des en-cours [17].

Le succès ou les espoirs suscités aujourd'hui par ces systèmes tiennent surtout aux aspects bénéfiques d'une prise en compte du facteur humain et d'une décentralisation des responsabilités dans le mode de conduite et la réaction aux perturbations. Ils méritent à ce titre d'être soulignés.

Les travaux relatés ci-dessous se rapportent aux systèmes push et se réfèrent soit à la recherche d'une séquence d'entrée des lots, soit aux règles locales de priorité.

II. 2.1. Approche déterministe

Cette première famille de techniques s'applique aux ateliers à flot unique seulement. L'objectif est de trouver une *séquence d'entrée* des lots dans l'atelier qui minimise le temps total de passage P , en sachant que la règle de priorité est toujours : premier arrivé, premier servi (FCFS). L'ordre d'entrée est donc conservé tout au long de la ligne. Cette méthode correspond précisément à la définition d'un système décentralisé de type push.

Le fondement de ces diverses heuristiques est l'algorithme de JOHNSON (1954) [18], qui fournit une solution optimale au problème à deux machines $n/2/F/P$, ceci quel que soit le nombre des tâches (une extension a été formulée par JACKSON (1956) [19] pour le problème $n/2/G/P$).

Face au peu de réalisme du cas étudié, les recherches ultérieures ont visé à résoudre le même problème sur un nombre de machines supérieur et en

essayant d'obtenir des solutions qui soient seulement proches de l'optimum, de façon à minimiser le rapport coût de calcul / efficacité de la solution. Nous citerons ici les principaux travaux.

L'approche de PALMER (1965) [20] donne une solution approchée en utilisant une fonction de priorité liée à la croissance des temps opératoires sur les machines successives.

CAMPBELL, DUDEK et SMITH (1970) [21] ont scindé les m machines en deux groupes (machines 1 à k , et $k+1$ à m), créant ainsi artificiellement un problème à deux machines, qui peut être résolu par l'algorithme de JOHNSON. On répète le calcul $m-1$ fois en faisant varier la valeur de k , et on retient la meilleure solution comme étant proche de l'optimale.

GUPTA (1971) [22] introduit, comme PALMER, une fonction de classement analogue à une règle de priorité et divise également le problème sur m machines en $m-1$ problèmes sur deux machines.

L'efficacité ainsi que le temps de calcul de ces deux derniers algorithmes sont assez satisfaisants pour être appliqués à des cas concrets [6]. La recherche du temps total de passage P qui équivaut à minimiser les temps de rupture convient sur le plan théorique à un atelier à flot unique, à condition :

- d'une part, que l'on dispose simultanément de tous les lots à l'entrée,
- d'autre part, qu'aucun lot ne se trouve initialement sur les machines.

Si ces restrictions peuvent être admises dans le cas d'équipements onéreux, disposés en ligne et pour lesquels il faut privilégier le taux d'utilisation, elles ne conviennent guère à un problème dynamique. De plus, la tendance de ces heuristiques est d'augmenter le niveau d'en-cours devant chaque poste puisque, par principe, ils fournissent au plus tôt un maximum de travail sur les postes afin d'éviter le risque d'une rupture.

D'autre part, ces algorithmes n'admettent que des machines en exemplaire unique ; ils ne peuvent donc s'appliquer au cas $n/M/F/V$.

II.2.2. Approche stochastique

L'approche stochastique ne concerne plus, comme précédemment, les séquences d'entrée des lots, mais les règles locales de décision.

Au-delà de certains résultats analytiques issus de la théorie des files d'attente, la majorité des études de performance s'appuie sur une simulation. Dans ce cas, contrairement à toutes les méthodes précédentes, la performance n'est plus évaluée période par période à partir de lots réels (*problème déterministe*), mais à partir d'un processus d'arrivée des lots exponentiels (*problème stochastique*) et sur un horizon de temps très long, pendant lequel l'atelier est considéré en régime permanent. L'atelier est alors vu comme un réseau de files d'attente, généralement ouvert. La distribution des temps opératoires suit une loi exponentielle et des perturbations aléatoires peuvent éventuellement être générées sur les différents moyens. L'écoulement des lots est géré par les indices de priorité ; la mesure de divers paramètres au cours de la simulation permet une estimation a posteriori des performances de la règle choisie par rapport aux critères étudiés.

Les nombreux travaux menés sur ce thème ont permis de tester un nombre considérable de règles. Nous présentons ici les plus significatives pour la conduite d'atelier. Plusieurs classifications ont déjà été proposées. Nous adopterons celle de JACKSON [¹⁰] qui distingue les règles statiques des règles dynamiques. Cette différenciation nous semble être celle qui se conjugue le mieux avec la nature du système d'information.

II.2.2.1. Règles statiques

Les valeurs des indices de priorité sont évaluées définitivement lors de la mise en circulation des lots dans l'atelier (elles peuvent être calculées pour chaque poste). Ce mode de calcul est le plus facile à implanter car il n'a pas recours à un suivi des lots.

1. FASFS : "Premier arrivé dans l'atelier, premier servi" (nous conservons l'appellation de CONWAY [¹⁰], celle-ci étant la plus fréquemment adoptée dans la littérature).

2. SPT : "Shortest processing time" : la priorité est donnée à l'opération ayant le plus court temps opératoire.
3. SPT/OPN : Temps opératoire minimal / nombre d'opérations restantes.
4. DDATE : La priorité est égale à la date de mise à disposition du lot.
5. Valeur du lot : le lot prioritaire est celui qui a la valeur la plus élevée.

II.2.2.2. Règles dynamiques

L'indice de priorité est recalculé tout au long du procédé (sauf FCFS). Il intègre l'avancement du lot par rapport à sa date d'échéance et/ou l'évolution de l'état de l'atelier. La fréquence d'évaluation peut être variable.

II.2.2.2.1. Règles locales

Une règle est dite locale lorsqu'elle ne prend en compte l'état d'aucun autre poste (les règles statiques précédentes sont locales par définition).

1. FCFS : "Premier arrivé, premier servi". Cette règle dynamique est la plus simple car elle ne nécessite aucun calcul, et elle facilite l'implantation physique des files d'attente.
2. SLACK : "Slack time" (marge libre). La priorité est égale au temps restant hors opérations, soit :

$$\text{Date de fin} - \text{Date actuelle} - \sum \text{Temps opératoires des opérations restantes}$$

3. S/OPN : "Marge libre/nombre d'opérations restantes" (ratio critique).

II.2.2.2.2. Règles semi-locales

Une règle est dite semi-locale lorsqu'elle tient compte de l'état d'autres files que celle où elle est appliquée (généralement le poste précédent ou suivant).

1. WINQ : "Charge dans la file suivante" : le lot prioritaire est celui dont le prochain poste est le moins chargé.
2. XWINQ : "Charge prévue dans la file suivante". La priorité est donnée au lot pour lequel la charge du poste suivant sera la plus réduite lorsqu'il y arrivera.

II.2.2.3. Règles composites

Les règles composites sont constituées à partir des règles simples précédentes et visent à moduler l'application des priorités en fonction de l'état du système. Cette modulation peut se faire de plusieurs façons :

- Adjonction à une règle de priorité préférentielle d'une ou plusieurs règles subsidiaires, soit pour départager les ex aequo (priorité hiérarchisée), soit pour limiter les effets de la règle fondamentale lorsque le système atteint un état où elle est néfaste ou sans intérêt (bascule).
 - Combinaison paramétrique de plusieurs règles de façon à obtenir une solution d'ordonnancement qui concilie les objectifs contradictoires des différents critères.
1. λ SPT + μ FCFS : ($\lambda + \mu = 1$) ; la règle SPT est souvent la règle de base dans les combinaisons paramétriques.
 2. λ SPT + μ FASFS [²³]
 3. λ SPT + μ DDATE, [²⁴] ; on introduit dans ces deux règles un terme dépendant du délai (date de lancement, date de fin).
 4. λ SPT + μ WINQ [¹⁰] ; le second terme dépend ici de l'état de l'atelier.
 5. FCFS $\wedge$ SPT [⁵] [¹⁰] ; la règle de base est la règle "premier arrivé, premier servi". Si la file d'attente dépasse une valeur prescrite, alors intervient la règle SPT.

II.2.3. Observations sur les règles de priorité

Nous avons présenté ici les règles de priorité dans le cadre des systèmes de décision décentralisés. Or nous avons vu précédemment (§ II.1.3.2.) qu'elles sont utilisées dans toutes les méthodes heuristiques appliquées aux systèmes centralisés. Il convient donc de bien préciser les deux modes d'application :

- dans les systèmes centralisés, les fonctions de priorités appliquées aux lots n'apparaissent qu'en tant que mode de calcul local servant à bâtir (à l'aide d'une simulation) des listes détaillées de travaux par poste,
- dans une application décentralisée, seul le calcul s'effectue lorsqu'il y a lieu (règles heuristiques). Les décisions de sélection des lots s'exécutent au niveau de chaque poste en fonction de la file d'attente présente au moment du choix (tous les aléas sont implicitement intégrés dans les décisions).

Il faut toutefois remarquer une certaine convergence entre les deux approches, notamment dans le cas de règles semi-locales (puisqu'il faut alors un système d'information centralisé) et lorsqu'on tend vers un calcul en temps réel (l'état réel de l'atelier étant alors de plus en plus proche de l'état prévu par simulation).

Plusieurs observations complémentaires sont à faire sur les résultats et la validité des règles de priorité :

1. Les performances d'une règle par rapport à un critère donné dépendent aussi des caractéristiques des travaux à effectuer. Des résultats contradictoires peuvent apparaître par exemple selon que les lots comportent un grand nombre d'assemblages ou pas [23]. Et il n'y a pas d'étude à notre connaissance qui analyse les relations entre les performances des règles de priorité et les caractéristiques du jeu d'essai utilisé. Il faut donc être prudent sur les limites de validité d'une règle donnée.

2. On peut toutefois dégager un certain nombre de tendances :

- "L'effet SPT" : la règle est unanimement reconnue comme remarquable par rapport au critère du temps d'attente moyen $\bar{W}$, et par conséquent au niveau d'en-cours moyen $\bar{N}$ de l'atelier. Ceci au détriment de la variance sur les temps de passage (les lots les plus longs à exécuter ayant systématiquement les plus longues attentes).
- Les règles dépendant du délai ou de la date de fin (FASFS, DDATE, SLACK, S/OPN) améliorent sensiblement la variance sur les temps de passage ("low variance rules", NANOT, [25]) et sont naturellement les mieux placées pour diminuer le retard moyen $\bar{R}$.
- De plus, lorsque l'objectif est le respect des délais, il faut rechercher non seulement une règle performante, mais plutôt l'adéquation entre la règle de priorité et le mode d'allocation du délai [10] [23] [26]. On retrouve ici un besoin de cohérence entre différents niveaux de traitement d'information.

3. La recherche de règles composites répond au souhait d'avoir des règles de conduite souples, pouvant être adaptées à l'état de l'atelier. Or, si des résultats significatifs peuvent se dégager de l'utilisation de règles simples, l'emploi de règles complexes ne permet pas de connaître avec suffisamment de précision leur effet sur l'atelier (à cause des nombreuses interactions, entre elles, avec le mode d'allocation de délai, etc). Il vaut donc mieux s'en tenir à des règles simples d'une façon générale et se garder de mettre entre les mains de l'utilisateur des leviers dont il ne maîtrise pas bien les effets.

II.3. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les principales familles de méthodes d'ordonnancement. Il existe en outre un grand nombre d'approches plus marginales que nous n'avons pas citées ici dans la mesure où elles n'introduisent pas de concept nouveau par rapport à ceux qui sont contenus dans les méthodes analysées. L'examen de ces divers systèmes et méthodes permet de dégager deux séries de conclusions ; la première concerne les orientations générales du système de conduite, la seconde les réponses au problème à traiter.

Une première démarche pour construire le système de conduite consiste à partir du problème posé pour rechercher une méthode de résolution, le choix de la méthode impliquant ensuite la nature du système d'information. Face à la complexité ou au niveau de performance attendu, les méthodes les plus avancées sur un plan théorique s'inscrivent dans un fonctionnement centralisé, s'accompagnant généralement d'un système d'information en temps réel étendu à l'ensemble de l'atelier. Cette approche, qui se justifie parfaitement dans le cadre d'ateliers automatisés, n'est pas toujours la plus adaptée à des ateliers à forte main-d'oeuvre où la tendance actuelle d'organisation s'exprime plutôt par une décentralisation des décisions, comme en témoigne la mise en application des systèmes de type pull par exemple.

Il faut donc préciser, face à cette démarche, que les moyens de décomposition du problème initial ne se situent pas seulement au niveau des méthodes utilisées, mais encore dans l'organisation générale de la production, au niveau du produit lui-même et de l'implantation physique des équipements. La réduction de la dimension combinatoire du problème peut être obtenue soit par une action de standardisation des produits, soit encore par le découplage des secteurs de l'atelier (stock-tampon entre tricotage et finition) ou par une reconfiguration complète des moyens lorsque l'on va jusqu'aux flots de fabrication par exemple. La réduction de la taille du problème initial obtenue par décomposition peut permettre dans un certain nombre de cas d'appliquer aux sous-problèmes locaux, des méthodes et des moyens informatiques qui seraient initialement prohibés. L'architecture du système de conduite doit donc toujours être élaborée, selon nous, à partir d'une approche globale.

Enfin, les conclusions propres à notre problème se résument par les points suivants :

- La structure d'atelier à flot unique apporte une simplification considérable au problème de conduite et la plupart des travaux orientés *flow-shop* utilisent cette structure pour créer des modèles spécifiques. Aussi, dans la mesure où nous recherchons un modèle dédié à un atelier précis, il semble préférable d'utiliser cette hypothèse, même si cela ne permet plus de généraliser l'approche aux ateliers à flot quelconque.
- La majorité des solutions proposées pour les ateliers à flot unique sont limitées à des moyens en exemplaire unique. Cette restriction oriente généralement les travaux vers la recherche d'une séquence d'entrée. Les résultats obtenus ne sont toutefois pas transposables à des moyens cumulatifs et il apparaît, par rapport à cette voie de recherche, que la seule définition d'une séquence d'entrée ne peut pas suffire, dans notre cas, à l'obtention d'une solution.
- De plus, la quasi-totalité des travaux intégrant des moyens cumulatifs traite le problème d'ordonnancement en supposant le nombre de moyens constant ou au moins fixé sur la période à traiter, dans le cas de problèmes à ressources variables. Une des rares études conciliant à notre connaissance le problème d'ordonnancement et le problème d'affectation, a été menée sur des exemples limités par NELSON [27] [28]. Les procédures choisies pour l'affectation ainsi que l'utilisation de matrices d'efficacité des personnes ne rendent toutefois pas l'étude très réaliste. Il nous faut donc trouver une solution originale au problème d'affectation puisque le nombre de postes actifs de chaque moyen constitue pour nous une inconnue du problème.
- Enfin, le nombre de critères sur lesquels s'appuie la décision divise les méthodes en deux classes : une classe monocritère, que nous ne retiendrons pas car elle ne cadre pas avec la réalité d'un atelier, et une classe multicritère au sein de laquelle l'approche par l'aide à la décision semble la plus apte à la conduite d'atelier.

Nous présenterons dans le chapitre suivant le modèle de conduite élaboré à partir de ces constats.

CHAPITRE III

PROPOSITION D'UN MODELE DE CONDUITE

Le problème (T,W) tel que nous l'avons défini ne trouve pas de réponse immédiate dans le chapitre précédent. Nous allons le résoudre ici à travers une décomposition du problème conforme aux principes évoqués en I.1. La démarche adoptée consiste à dissocier celui-ci selon deux niveaux et à traiter séparément le problème de type T au niveau de coordination et le problème de type W au niveau de conduite. Ces deux niveaux prennent respectivement en compte :

- les contraintes externes, caractérisées par les dates limites de fin,
- les contraintes internes, liées à l'utilisation des ressources ; contraintes technologiques, contraintes sur les moyens et sur l'effectif.

La simplification introduite dans la résolution par la non prise en compte des dates limites à l'intérieur de l'atelier est supportée par deux facteurs importants:

- d'une part, le fait d'adopter un mode de régulation par les capacités diminue le besoin de réguler les charges par les en-cours ; la surcapacité en matériel affaiblit singulièrement la nature disjonctive ou séquentielle du problème puisque l'on cherche à adapter de façon continue la capacité d'un poste au flux de travail entrant sur ce poste.
- D'autre part, les temps de passage des lots étant relativement courts, il n'y a pas d'avantage substantiel à retirer, dans cet atelier à flot unique, d'un ordonnancement détaillé au niveau des postes.

La méthode proposée traite dans une première étape le flux d'entrée dans l'atelier (*niveau de lancement*). Le rangement des lots dans la séquence d'entrée est déterminé par un indice de priorité défini en fonction des dates limites de fin. La représentation de l'atelier est très simple à ce niveau ; on le considère comme un serveur unique d'une capacité égale à l'effectif disponible. Le flux entrant, mesuré en quantité de travail, doit égaler cette capacité pour saturer le personnel. L'évolution de l'état de l'atelier n'intervient pas ici et on peut parler de modèle statique.

Dans une seconde étape est traité le calcul de l'affectation des personnes aux postes de travail (*niveau d'affectation*). L'atelier est modélisé comme un réseau de files d'attente ; ces files sont gérées selon la règle du "premier arrivé - premier servi" et, de ce fait, le problème de conduite est vu ici comme un problème de régulation de flux. On a recours, pour résoudre celui-ci, à une modélisation dynamique ; l'avancement des lots est mesuré localement à l'aide d'une simulation événementielle.

La solution finale d'affectation est obtenue par une procédure itérative ; une première solution est calculée par le modèle, laquelle est ensuite ajustée de manière interactive pour satisfaire au mieux les critères concernant l'utilisation maximale des effectifs et la maîtrise du niveau d'en-cours dans chaque file d'attente. Des indicateurs sont mis en évidence pour assister le décideur dans l'ajustement des effectifs.

III.1. OBJECTIFS ET PRINCIPES DE LA MODELISATION

Nous avons défini au chapitre I les objectifs de la conduite d'atelier en termes de performance. Nous définissons ici, à la suite des observations faites au chapitre II, les objectifs plus généraux concernant l'implantation du système de décision dans l'environnement de production. Les aspects les plus importants à considérer dans le contexte présent sont, à notre avis, le rôle du chef d'atelier, l'intégration dans un système décentralisé et la capacité d'évolution du modèle.

III.1.1. Rôle du décideur

On peut estimer que la conduite d'atelier fait appel à trois natures de connaissance : quantitative, qualitative et intuitive. L'utilisation d'un modèle de représentation de l'atelier fournit une information quantitative, ici le calcul de charges, et qualitative, par l'évaluation des critères de performance. La fonction du chef d'atelier est alors, dans l'approche retenue, de compléter ces éléments d'appréciation par une connaissance intuitive et qualitative qui concerne notamment les ressources humaines. L'efficacité du système de décision est liée, à notre sens, à la complémentarité du couple homme-calculateur.

En effet, sur un plan qualitatif, et contrairement aux ateliers automatisés, le responsable a connaissance de toute la dynamique des moyens humains qui ne peut être modélisée, en particulier toutes les données qui évoluent trop rapidement ou qui sont trop subjectives pour être traduites en termes de caractéristiques dans le modèle, comme l'efficacité d'une personne sur un poste ou encore le souhait du personnel de permuter sur les postes ou au contraire de rester affecté à une même tâche. Dans les procédés où la productivité est davantage le fait des personnes que des équipements, la prise en compte de ces aspects ne peut être négligée.

Le rôle du décideur est également associé à la notion d'apprentissage. L'acquisition d'expérience constitue une connaissance intuitive et agrégée. De fait, si l'homme est assez vite limité dans le traitement d'un grand nom-

bre de données, contrairement aux moyens informatiques, il est beaucoup plus apte qu'un modèle à synthétiser une situation à travers une information condensée. La faculté de passer d'un niveau global à un niveau local ou inversement est fort utile dans la décision. Si nous prenons l'exemple d'une ligne de fabrication composée de plusieurs machines, nous savons d'une façon globale, que la cadence de la ligne est la cadence de la machine la plus lente ou encore que le fait de ne pas alimenter la machine amont revient à arrêter l'ensemble de la ligne. Un modèle de représentation, selon qu'il est établi poste par poste ou par section de l'atelier, effectuera le calcul d'une manière systématique sans pouvoir facilement, sans l'aide d'un décideur, changer de niveau d'information selon la nature des problèmes qui se posent ; ceci est d'autant plus vrai que la notion d'apprentissage s'inscrit dans une échelle de temps beaucoup plus longue que celle de la conduite à très court terme.

En troisième lieu, le rôle du décideur est d'obtenir le meilleur compromis final en fonction de la hiérarchie des critères au moment de la décision. Les méthodes de décision multi-critères peuvent être scindées en trois classes [29] :

- les méthodes qui s'appuient sur une hiérarchisation a priori des critères (critère composite),
- les méthodes offrant au décideur l'ensemble des solutions avec leur évaluation pour une décision a posteriori,
- les méthodes de construction progressive et interactive de la solution finale.

Nous adoptons ici cette dernière voie qui permet de faire évoluer le compromis final en fonction des contraintes de terrain et qui doit également permettre de faire évoluer le niveau de contraintes en fonction de la situation de l'atelier.

III.1.2. Intégration dans un système décentralisé

Nous avons mis en évidence, dans le chapitre précédent, le fait que la nature du système de conduite conditionne le choix d'une méthode. Nous avons

également montré que les décompositions verticale de la structure de commande et horizontale du procédé en sous-systèmes apportaient une réponse satisfaisante à la gestion des délais, dans la mesure où le temps total opératoire dans l'atelier de finition ne dépasse pas en moyenne la durée d'une équipe et dans la mesure où aucune méthode ne permet de traiter à la fois un problème d'ordonnancement et un problème d'affectation.

Il est donc préférable, dans ce cadre, de conserver un fonctionnement décentralisé, fonctionnement justifié par ailleurs sur le seul plan de la responsabilisation des personnes et de la moindre sensibilité aux aléas et aux variations sur les temps opératoires.

L'ordonnancement des lots sur les postes ne peut donc se réaliser dans un tel système que par des règles locales de priorité. La règle de base adoptée ici est la règle FCFS ("premier arrivé, premier servi"). Les raisons de ce choix sont les suivantes :

- la règle FCFS est celle qui s'adapte le mieux à l'utilisation d'équipements de manutention,
- elle fait partie des règles qui réduisent la variance sur les temps d'attente et qui permettent ainsi la meilleure maîtrise des temps de passage des lots (p_k),
- enfin, elle permet, associée à un mode de régulation par les capacités, de minimiser l'en-cours, en tendant vers un fonctionnement "pseudo-continu".

Le problème du chef d'atelier reste alors le choix des moyens à mettre en oeuvre sur chaque période, c'est-à-dire essentiellement un *problème d'affectation*. Dans la mesure où les personnes occupent le même poste pendant la durée d'une équipe, la fréquence minimale d'observation de l'atelier et de décision est d'une fois par équipe.

On ne peut cependant envisager d'une manière réaliste l'implantation d'un modèle d'aide à la décision sans disposer d'un système de suivi d'atelier qui communique à chaque début de période l'état de l'atelier au système de décision. Les informations à transmettre concernent les données dynamiques liées aux lots :

- la position de chaque lot en cours,
- la date d'arrivée $a_{k,i}$ de chacun des lots dans la file d'attente où il se trouve,
- la date de début d'opération $e_{k,i}$ des lots en cours d'exécution,

Le nombre de lots en cours ne se prête guère à une saisie manuelle de ces données, notamment à la jonction de deux équipes consécutives. De plus, le système de suivi des lots doit permettre de mesurer les valeurs réelles des critères de performance et de pouvoir éventuellement les comparer aux valeurs estimées par le modèle.

Le modèle doit être, quant à lui, d'une taille compatible avec une implantation sur micro-ordinateur en atelier et être orienté temps réel.

III.1.3. Capacité d'évolution

La flexibilité apparaît aujourd'hui comme un objectif majeur dans l'évolution des moyens de production. Or si la flexibilité peut être améliorée par un outil de conduite, il apparaît également dans les procédés discontinus que celle-ci s'inscrit dans une démarche globale de progrès et de réduction des coûts qui dépasse les simples objectifs de conduite. Cette démarche nécessite généralement de reconsidérer l'organisation de la production autant sous l'angle des méthodes de travail que sous celui de l'implantation des équipements.

Dans un tel contexte, le système de décision doit non seulement apporter une prise de décision plus fiable et plus rapide mais doit aussi être capable, au niveau du modèle, d'évoluer en même temps que l'atelier.

Pour respecter ces principes, le modèle proposé doit obéir à plusieurs impératifs :

- suivre l'évolution physique de l'atelier,
- s'adapter aux objectifs locaux sur les postes,
- permettre un abaissement progressif du niveau d'en-cours, ceci allant généralement de pair avec une amélioration de la flexibilité dans les procédés discontinus.

L'implantation physique de l'atelier de finition correspond, au niveau de chaque moyen, à une file d'attente à serveurs multiples, les serveurs étant les postes actifs. Néanmoins, il faut que le modèle puisse intégrer n'importe quel schéma d'implantation. En particulier, si des postes sont mis en ligne, il devient alors nécessaire de considérer, au niveau d'un moyen, plusieurs files d'attente à serveur unique de telle sorte que la solution proposée par le modèle de représentation reste interprétable et proche de la réalité.

Les objectifs locaux sont pris en compte dans le modèle par les règles de gestion des files d'attente. La souplesse de fonctionnement impose de pouvoir modifier ces règles au niveau de l'atelier ou au niveau d'un poste en particulier ; si un moyen est saturé sur une période par indisponibilité de certains postes, il peut être nécessaire de recourir à la règle du plus court temps opératoire (SPT) plutôt qu'à la règle FCFS par exemple. Les règles de priorité appliquées au modèle seront donc définies individuellement pour chaque moyen au poste.

La diminution de l'en-cours qui doit accompagner la recherche d'une plus grande souplesse, ne peut se réaliser que d'une manière progressive puisque l'en-cours joue un rôle de régulation des charges et qu'il est lié à des paramètres plus généraux comme la taille des lots ou la variété des gammes opératoires. L'intérêt d'un modèle est d'apporter une aide dans ce processus de "tension des flux" en permettant de faire évoluer progressivement les objectifs et en les validant sur chaque période. Dans cette optique le niveau d'en-cours est introduit dans le modèle en tant qu'objectif local pour chaque moyen, défini période par période.

III.1.4. Principes généraux du modèle

III.1.4.1. Recherche d'une solution initiale

Le problème d'affectation revient à définir en début d'équipe l'intensité - le nombre de postes actifs - de chaque moyen I_i^f , en s'assurant que les effectifs ainsi répartis seront chargés jusqu'à la fin de l'équipe et que l'on respecte au mieux l'objectif d'en-cours final.

Le problème équivaut donc à trouver une combinaison linéaire des q_i , S_f qui vérifie l'équation suivante et qui soit satisfaisante vis-à-vis des critères :

$$q_1 I_1^f + q_2 I_2^f + \dots + q_m I_m^f = h \quad (\text{III.1})$$

$$\forall i \in [1, \dots, m] \quad I_i^f \in \mathbb{N} \quad \text{et} \quad 0 \leq I_i^f \leq m_i$$

q_i : nombre de personnes par poste sur le moyen M_i
(q_i entier, étant donnée la *contrainte disjonctive* sur les effectifs)

h : effectif total disponible

m_i : nombre de postes appartenant au moyen M_i

Une solution sera dite admissible ici lorsqu'elle satisfait cette équation, c'est-à-dire lorsqu'elle respecte la *contrainte cumulative* sur l'effectif total.

Le nombre de solutions possibles qui augmente rapidement en fonction de la surcapacité, est trop élevé pour qu'il soit possible d'effectuer l'évaluation multi-critère de chacune d'entre elles. Il nous faut donc réduire la dimension du problème. Plutôt que de chercher dans l'ensemble des solutions un sous-ensemble remarquable, le modèle proposé calcule une solution initiale qui respecte les critères mais qui peut ne pas être admissible, en laissant le soin au décideur de choisir la solution admissible la plus approchée de la solution initiale ; cette dernière est définie par l'ensemble des valeurs locales de l'intensité I_i :

$$S_m = \{I_i / i = 1, \dots, m\}$$

Le modèle doit toutefois apporter une aide au décideur pour réduire l'écart δ_h entre l'effectif total disponible et l'effectif total obtenu par le modèle h_m lorsque celui-ci n'est pas nul.

$$\delta_h = h - h_m = h - \sum_{i=1}^m q_i I_i \quad (\text{III.2})$$

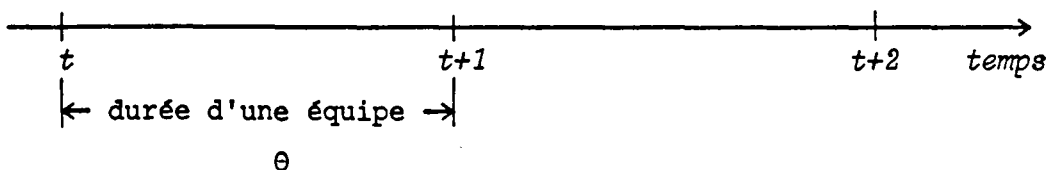
Cette aide à la décision est bâtie sur la mise en évidence d'indicateurs simples.

Dans le cas où le chef d'atelier ne peut parvenir à annuler δ_h d'une manière satisfaisante, il doit s'en référer au niveau supérieur de coordination :

$\delta_h > 0$: il y a un sureffectif relatif qui peut être corrigé par une action sur le flux d'entrée,

$\delta_h < 0$: il y a sous-effectif ; il devient alors nécessaire de supprimer certains postes au détriment de l'objectif final d'en-cours et des temps de passage des lots.

Le calcul de la solution S_m doit s'effectuer à chaque début d'équipe. L'horizon est donc découpé en périodes de longueur égale à la durée d'une équipe. Cette longueur sera prise conventionnellement égale à l'unité pour simplifier les notations ; la période d'indice t représente alors la période qui débute à l'instant t et s'achève à l'instant $t+1$ (la durée en minutes sera exprimée par θ) :



Le choix de l'intensité des moyens est défini en fonction de la charge de ces moyens sur la période. Cette charge, ou quantité de travail, est évaluée à partir de l'équation d'état des en-cours locaux, dans laquelle on introduit l'en-cours final souhaité (cf § III.2.4.).

La structure d'atelier à flot unique permet d'évaluer la solution initiale en une seule passe puisque dès que l'on a calculé la charge et fixé l'intensité d'un moyen M_i , on peut connaître, à l'issue d'une simulation la charge induite sur le moyen suivant M_{i+1} .

A partir de l'état initial de l'atelier, le modèle effectue donc un calcul itératif sur chaque moyen dans l'ordre d'avancement des lots, chaque itération comportant les phases suivantes :

- Calcul de la charge,
- Calcul de l'intensité,
- Simulation de l'écoulement et affectation des lots sur les postes suivants.

III.1.4.2. Choix du type de simulation locale

La simulation de l'écoulement des lots en fonction des règles locales de priorité permet d'estimer l'activité réelle des postes et de connaître les dates d'arrivée des lots sur chaque moyen. Nous avons le choix pour celle-ci entre deux approches : l'approche par événements discrets ou par activités [20] ; précisons qu'un événement désigne un changement d'état du système de production qui initialise une activité (exemple : début d'opération), une

activité caractérisant l'état d'un objet (machine, lot) sur l'intervalle de temps entre deux événements (exemple : opération en cours).

1. *Simulation par événements.* Il s'agit de représenter sous forme algorithmique la logique de changement d'état du système en fonction des événements ainsi que la logique de génération des événements associés, ceci après avoir identifié tous les événements ou changements d'état susceptibles de se produire.

Exemple : L'événement "fin d'opération" sur un poste va entraîner :

- le déplacement du lot vers le poste suivant (changement d'état de l'en-cours),
- le début de l'opération suivante, si un lot est présent dans la file d'attente,
- ou sinon, la mise en attente du poste (changement d'activité).

2. *Simulation par activités.* La modélisation doit décrire ici les conditions qui peuvent entraîner le début ou la fin d'une activité, après avoir inventorié toutes les activités qui peuvent être rencontrées dans le fonctionnement du système. La simulation étant conduite par une horloge, on examine à chaque avance d'une unité de temps si les conditions d'un changement d'activité sont remplies.

Exemple : L'activité "opération en cours" sur un lot sera terminée lorsque la date d'horloge sera égale à la date de début plus la durée opératoire.

Dans le premier cas, l'avance du temps se fait d'une date à l'autre ; dans le second, elle se fait par incrémentation, ce qui accroît considérablement le nombre de tests et donc le temps de calcul. Une évaluation rapide nous montre que si le temps opératoire moyen (exprimé à la minute près) est d'une heure en finition, une simulation par événements traitera en moyenne, pour suivre les lots, huit événements par équipe et par poste ; une simulation par activité nécessitera, pour une précision équivalente, d'effectuer au moins soixante fois plus de tests.

La solution adoptée est donc une simulation par événements, l'atelier étant considéré comme un réseau ouvert de files d'attente.

III.1.4.3. Schéma général du système de décision

Une fois que la simulation a été menée sur tous les moyens pour obtenir la solution S_m , le décideur doit procéder à des ajustements pour atteindre la solution finale S_f . Cette solution finale s'obtient par une démarche interactive, chaque boucle d'évaluation comprenant alternativement une phase de calcul et une phase de décision, comme le résume la figure III.1. Si aucune solution admissible ne peut être obtenue, le problème doit alors être résolu au niveau supérieur de coordination.

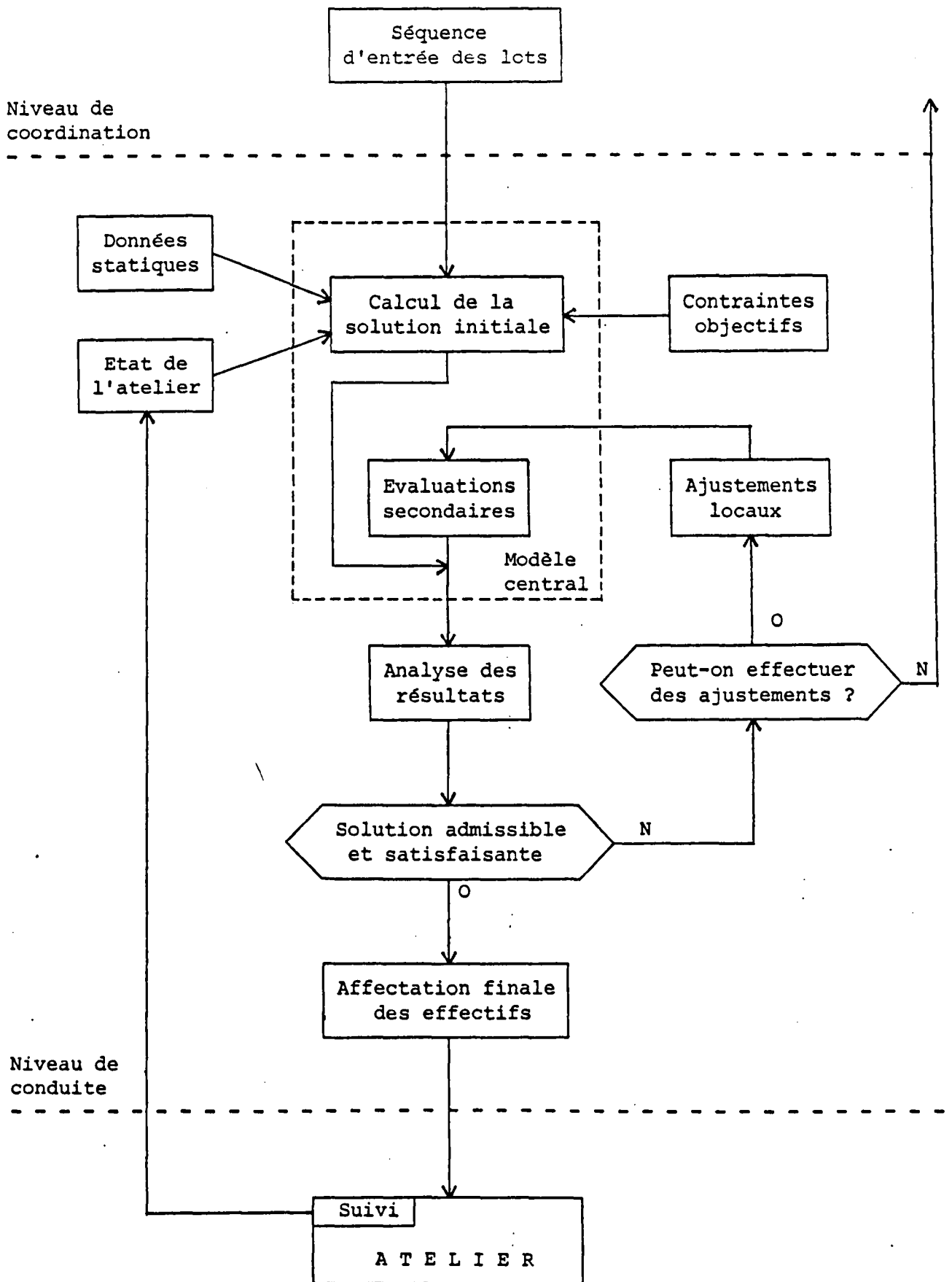


Fig. III.1. Procédure de résolution interactive du problème d'affectation.

III.2. PRESENTATION DETAILLEE DU MODELE

III.2.1. Formulation des critères

Pour pouvoir analyser les solutions proposées par le modèle, il faut transcrire les objectifs de performance exprimés en I.2.4. en critères mesurables. Rappelons que les objectifs étaient les suivants :

- Réduction des en-cours
- Utilisation des effectifs
- Maîtrise du temps de passage total.

Nous définissons ici des critères locaux, pour l'aide à la décision ainsi qu'un critère global, chaque fois qu'il faut pouvoir apprécier la performance d'ensemble du système; cette information est notamment destinée au niveau de coordination. Mis à part les critères nécessitant une mesure en plusieurs périodes consécutives, ceux-ci représentent ici les valeurs atteintes en fin de période en fonction de la solution retenue pour l'affectation des effectifs.

III.2.1.1. Critère d'en-cours -----

L'en-cours peut être exprimé de diverses façons par :

- N : nombre de lots en cours sur la période,
- F : quantité de travail équivalant à l'ensemble des lots en cours,
- F_r : quantité de travail restant à effectuer sur les lots en cours,
- F_e : quantité de travail déjà effectuée sur les lots en cours,
- E_t : quantité de travail restant à effectuer sur les opérations immédiates des lots en cours.

La notion d'en-cours nous intéresse ici en termes de charge puisque nous l'utilisons pour décider de l'intensité de chaque moyen. Nous ne retiendrons donc pas la variable N qui présente peu d'intérêt à très court terme, ni les diverses expressions de la variable F, mais la quantité de travail restant à effectuer sur les opérations immédiates E_t qui correspond précisément à la charge locale des moyens.

L'en-cours, dans notre modèle, a une double fonction puisqu'il constitue à la fois une variable d'état, pour définir l'état initial et final de l'atelier, et un critère. Cet en-cours total, exprimé par E_t , est calculé à partir de la valeur locale de l'en-cours devant chaque moyen $E_{i,t}$.

Nous définirons $E_{i,t}$ comme l'ensemble des lots en attente devant le moyen M_i ou en cours d'exécution sur celui-ci. Il est constitué des deux sous-ensembles suivants :

$F_{i,t}$: Ensemble des lots présents dans la file d'attente du moyen M_i à l'instant t ,

$P_{i,t}$: Ensemble des lots en cours d'exécution sur les postes du moyen M_i à l'instant t .

$$E_{i,t} = F_{i,t} \cup P_{i,t} \quad \text{et} \quad F_{i,t} \cap P_{i,t} = \emptyset$$

A partir de la définition de ces sous-ensembles, nous pouvons écrire les relations correspondantes exprimant les quantités de travail :

$$F_{i,t} = \sum_{k/l_k \in F_{i,t}} d_{k,i} \quad \text{et} \quad P_{i,t} = \sum_{k/l_k \in P_{i,t}} d_{k,i,t}^+ \quad (\text{III.3.})$$

$$E_{i,t} = F_{i,t} + P_{i,t} \quad (\text{III.4.})$$

$F_{i,t}$: Quantité de travail en attente dans la file du moyen M_i , à l'instant t ,

$P_{i,t}$: Quantité de travail pour achever les lots en cours sur le moyen M_i , à l'instant t ,

$E_{i,t}$: Niveau d'en-cours sur le moyen M_i , en début de période t ,

$d_{k,i}$: Durée opératoire du lot l_k sur le moyen M_i ,

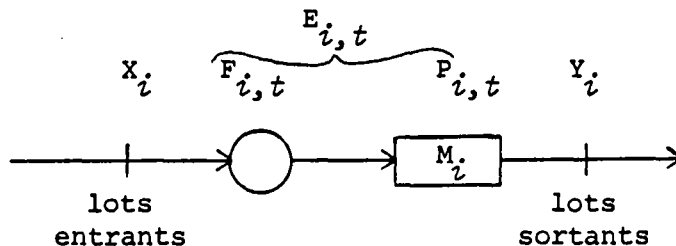
$d_{k,i,t}^+$: Durée opératoire pour achever le lot l_k sur le moyen M_i , mesurée à l'instant t .

A chaque fin de période, on estimera donc la valeur de l'en-cours devant chaque moyen $E_{i,t+1}$ et de l'en-cours total E_{t+1} défini par :

$$E_{t+1} = \sum_{i=1}^m E_{i,t+1} \quad (\text{III.5.})$$

L'évolution de l'en-cours dans l'atelier entre les instants t et $t+1$ s'exprime par une équation d'état :

$$E_{i,t+1} = E_{i,t} + X_i - Y_i \quad (\text{III.6.})$$



- X_i : Quantité de travail entrant sur le moyen M_i durant la période t ,
 Y_i : Quantité de travail effectuée par le moyen M_i (activité) durant la période t .

Nous utiliserons plus loin cette relation pour le calcul des charges des différents moyens.

En ce qui concerne les notations adoptées, précisons que toutes les variables utilisées sont nécessairement exprimées pour la période d'indice t examinée. Toutefois pour alléger l'écriture, ces variables ne seront indicées que lorsque cela s'avèrera indispensable à la bonne compréhension du texte.

III.2.1.2. Critère d'utilisation des effectifs

Le second objectif cité est de maximiser l'utilisation des effectifs sur la période, c'est-à-dire saturer les postes actifs. Le taux d'utilisation global U^h de même que le taux d'utilisation au niveau de chaque moyen U_i^h est évalué à partir de la relation suivante :

$$U_i^h = \frac{Y_i}{\theta \cdot I_i} \quad (\text{III.7.})$$

$$U^h = \frac{\sum_{i=1}^m q_i Y_i}{\theta \sum_{i=1}^m q_i I_i} \quad (\text{III.8.})$$

ou encore, si $q_1 = q_2 = \dots q_m = 1$:

$$U_i = \frac{Y}{\theta \cdot I} \quad (\text{III.9.})$$

- Y_i : Activité du moyen M_i durant la période t ,
- Y : Activité totale de l'atelier durant la période t ,
- I_i : Intensité du moyen M_i ,
- I : Intensité totale des moyens
- q_i : Nombre de personnes par poste sur le moyen M_i ,
- θ : Durée totale de la période.

Les termes Y_i et Y sont obtenus par la simulation, les termes I_i et I sont le résultat du problème d'affectation. L'objectif est d'obtenir des valeurs de taux d'utilisation les plus proches possibles de l'unité, ce qui équivaut à éviter toute rupture d'alimentation sur les postes actifs.

Notons également que la valeur de U_h n'a de sens que lorsque le nombre de postes actifs occupe tout l'effectif disponible (*contrainte cumulative sur l'effectif total satisfaite*).

III.2.1.3. Critères liés au temps de passage

Le temps de passage d'un lot dans l'atelier est défini entre la date d'entrée et la fin de la dernière opération. Il est encore égal à la somme du temps total opératoire et du temps d'attente total :

$$p_k = s_k - e_k = d_k + w_k \quad (\text{III.10.})$$

- e_k : Date d'entrée dans l'atelier du lot l_k
- s_k : Date de sortie (fin de la dernière opération) du lot l_k
- d_k : Durée opératoire totale du lot l_k
- w_k : Temps d'attente total du lot l_k .

Les éléments d'appréciation nécessaires pour gérer les délais (niveau de coordination) sont le temps de passage moyen des lots $\bar{P}$ ainsi que la variance sur les temps de passage s_p^2 .

$$\bar{P} = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} p_k \quad (\text{III.11})$$

$$s_p^2 = \frac{1}{n_s - 1} \sum_{k=1}^{n_s} [p_k - \bar{P}]^2 \quad (\text{III.12})$$

où n_s est le nombre total de lots sortis.

Les critères directement influencés par le système de conduite, sont liés aux temps d'attente des lots. La connaissance du temps moyen d'attente par poste permet en particulier de définir, à partir de la gamme, le temps de passage prévisionnel de chaque type d'article.

$$\bar{W} = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} w_k \quad (\text{III.13})$$

$$s_w^2 = \frac{1}{n_s - 1} \sum_{k=1}^{n_s} [w_k - \bar{W}]^2 \quad (\text{III.14})$$

Ces critères ne sont évidemment pas exploitables à la journée ni à l'équipe et doivent être mesurés par le système de suivi sur un certain nombre de périodes consécutives. Ils peuvent toutefois être estimés par une simulation sur plusieurs périodes.

III.2.2. Décomposition de la procédure de calcul

Nous allons présenter successivement ici les différentes étapes de calcul pour parvenir à la solution S_m . Elles seront détaillées comme suit :

- le processus d'arrivée,
- le calcul de la charge initiale,
- le calcul de l'intensité,
- la simulation de l'écoulement,

les trois dernières étapes appartenant à une même boucle de traitement sur chaque moyen.

Précisons, pour généraliser le modèle à tout type d'implantation, qu'un moyen est défini ici comme un ensemble d'un ou plusieurs postes identiques alimentés par une même file d'attente.

Pour la clarté de l'exposé, nous supposons toutefois dans cette présentation une seule file d'attente par opération et un stock d'entrée unique.

Nous illustrerons la présentation des différentes étapes par un exemple numérique simple où l'on dispose de deux moyens comprenant chacun deux postes individuels. On suppose que l'effectif disponible est de trois personnes. L'état initial est connu (position des lots, date d'arrivée sur le moyen, date de début d'opération) ainsi que les gammes opératoires (cf Fig. III.2. et III.3.). Le problème d'affectation se pose donc ainsi : comment répartir les trois personnes sur les quatre postes en respectant au mieux les objectifs ?

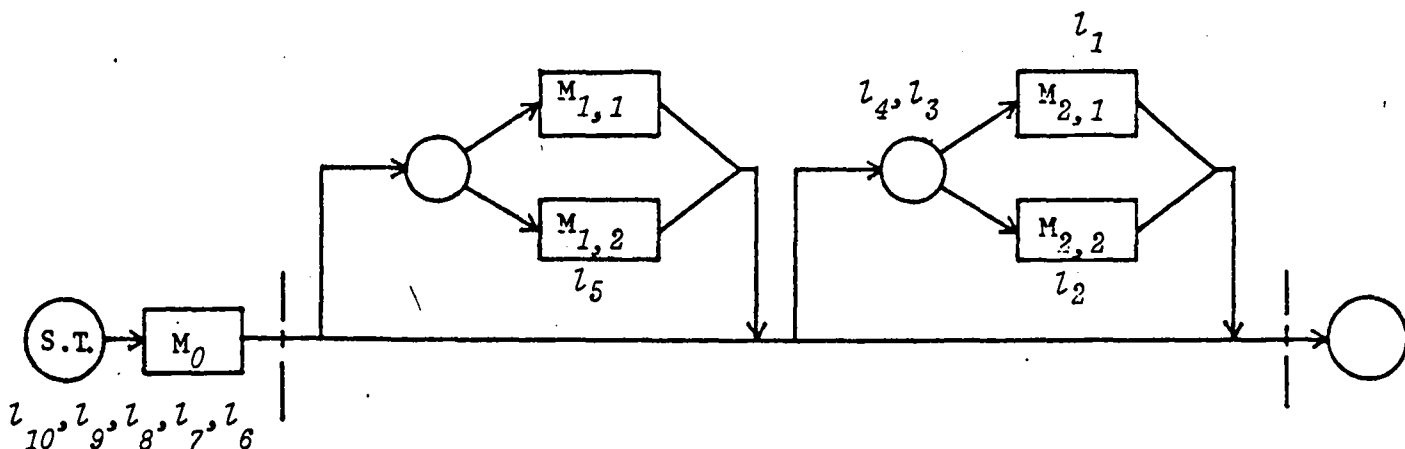


Fig. III.2. Etat initial à l'instant t.

L'en-cours initial est évalué ci-dessous d'après les relations III.3. et III.4.

Moyen M_1	$F_{1,t}$	$= \emptyset$	$F_{1,t}$	$= 0$
	$P_{1,t}$	$= \{l_5\}$	$P_{1,t}$	$= d_{5,1,t}^+ = 40$
	$E_{1,t}$	$= \{l_5\}$	$E_{1,t}$	$= F_{1,t} + P_{1,t} = 40$
Moyen M_2	$F_{2,t}$	$= \{l_3, l_4\}$	$F_{2,t}$	$= d_{3,2} + d_{4,2} = 145$
	$P_{2,t}$	$= \{l_1, l_2\}$	$P_{2,t}$	$= d_{1,2,t}^+ + d_{2,2,t}^+ = 105$
	$E_{2,t}$	$= \{l_1, l_2, l_3, l_4\}$	$E_{2,t}$	$= F_{2,t} + P_{2,t} = 250$

La numérotation des lots respecte l'ordre d'arrivée dans les files d'attente ou la priorité externe pour les lots dans le stock tampon.

lots l_k	TEMPS OPERATOIRES		TEMPS TOTAL	TEMPS RESTANTS		TEMPS EFFECTUES	
	$d_{k,1}$	$d_{k,2}$		$d^+_{k,1,t}$	$d^+_{k,2,t}$	$d^-_{k,1,t}$	$d^-_{k,2,t}$
l_1	40	65	105		45		20
l_2	45	70	115		60		10
l_3	60	70	130				
l_4	65	75	140				
l_5	70	90	160	40		30	
l_6	50	0	50				
l_7	45	85	130				
l_8	45	90	135				
l_9	60	100	160				
l_{10}	65	75	140				

Fig. III.3. Temps opératoires

Le processus d'arrivée des lots est représenté sur la Fig. III.2. par un moyen fictif M_0 .

L'exemple sera repris dans chaque étape sur le moyen M_1 avant d'effectuer une seconde itération sur le moyen M_2 pour parvenir à l'état final à l'instant $t+1$.

Les contraintes du problème qui ont été évoquées dans le premier chapitre (§ I.2.3.) seront présentées au fur et à mesure de leur prise en compte respective par le modèle.

III.2.3. Processus d'arrivée des lots

Le processus d'arrivée détermine ici la séquence d'entrée des lots dans l'atelier à partir du stock tampon amont. Il intègre pour cela deux fonctions distinctes : la gestion des priorités externes et l'équilibrage des charges globales dans l'unité de production.

1. Gestion des priorités externes : La priorité externe de chacun des lots est définie en fonction de la date de mise à disposition du lot (*contrainte temporelle de date limite*). Les formulations proposées par divers auteurs pour cette fonction de priorité $f(k)$ sont multiples et nous ne l'étudierons pas ici dans la mesure où elle est extérieure au système de conduite proprement dit (un exemple d'application à la confection est donné dans [31]).

2. Equilibrage de la charge globale : Cet équilibre est déterminé par le flux d'entrée ϕ_e . Pour définir ce flux d'entrée on considère l'atelier comme un serveur unique alimenté par le stock tampon. La capacité de ce serveur est égale à la quantité de travail pouvant être fournie par l'effectif total. le flux entrant doit naturellement viser à saturer ce serveur pour satisfaire le critère d'utilisation de l'effectif U^h ; il est mesuré pour chaque lot à partir des temps opératoires $d_{k,i}$.

Si nous appelons Φ_e l'ensemble des lots entrants, on obtient :

$$\phi_e = \sum_{k/l_k \in \Phi_e} \sum_{i=1}^m q_i d_{k,i} \quad (\text{III.15})$$

ou encore, dans le cas où l'on a pour tous les moyens une seule personne par poste ($q_1 = q_2 = \dots q_m = 1$) :

$$\phi_e = \sum_{k/l_k \in \Phi_e} d_k \quad (\text{III.16})$$

La condition à respecter pour saturer l'atelier sur la période s'écrit :

$$\phi_e + \delta_\phi \geq h \theta \quad (\text{III.17})$$

où h désigne l'effectif total disponible, θ la durée de la période et δ_ϕ la quantité de travail manquante ou excédentaire sur la période précédente.

On définit alors la séquence d'entrée en prélevant les lots du stock tampon par ordre de priorité jusqu'à ce que l'inégalité précédente soit vérifiée (le terme δ_ϕ est utilisé de ce fait pour ne pas induire une dérive du niveau d'en-cours par le jeu des approximations successives sur chaque période). Ces lots sont supposés arriver sur les moyens à l'instant t ; ils sont de ce fait prioritaires sur les lots induits.

Exemple

Le stock tampon est composé des lots : l_6 , l_7 , l_8 , l_9 et l_{10} . Nous prenons une période de durée égale à 150.

$$\theta = 150$$

$$h = 3$$

$$\delta_\phi = 0$$

$$q_1 = q_2 = 1$$

Le flux minimal vaut donc : $h \cdot \theta = 3 \cdot 150 = 450$

Nous supposerons que la fonction de priorité prenne les valeurs suivantes :

$$f(6) = 0,3 , f(7) = 1,0 , f(8) = 1,2 , f(9) = 2,1 , f(10) = 2,9$$

Pour vérifier III.17 il nous faut prendre les quatre premiers lots :

$$\phi_e = \{l_6 , l_7 , l_8 , l_9\}$$

$$\phi_e = d_6 + d_7 + d_8 + d_9 = 50 + 130 + 135 + 160 \quad \underline{\phi_e = 475}$$

III.2.4. Calcul de la charge initiale d'un moyen

Nous avons exprimé au § III.2.1.1. la variation d'en-cours sur la période par la relation :

$$E_{i,t+1} = E_{i,t} + X_i - Y_i \quad (\text{III.6.})$$

où X_i représente la quantité de travail entrante et Y_i la quantité de travail effectuée par le moyen M_i durant la période t .

Si nous définissons :

X_i : l'ensemble des lots entrant sur le moyen M_i , durant la période t

Y_i : l'ensemble des lots sortis du moyen M_i sur la période t

le terme X_i peut s'écrire sous la forme :

$$X_i = \sum_{k/l_k \in X_i} d_{k,i} \quad (\text{III.18.})$$

ou encore, pour $i \geq 1$ grâce à la structure d'atelier à flot unique :

$$X_i = \sum_{k/l_k \in Y_0 \cup Y_1 \cup \dots \cup Y_{i-1}} d_{k,i} \quad (\text{III.19.})$$

où $b_{k,i}$ est une variable booléenne définissant l'affectation du lot l_k sur le moyen M_i . Un lot est affecté sur un moyen si toutes les opérations sur les moyens précédents sont terminées.

$$\begin{aligned} b_{k,i} &= 1 \quad \text{si } l_k \text{ affecté sur } M_i \\ &= 0 \quad \text{dans le cas contraire.} \end{aligned}$$

(Pour le premier moyen M_1 , la quantité de travail entrante X_1 est issue en totalité du flux d'entrée ϕ_e , égal à Y_0). Le terme Y_i s'écrit, lui, sous la forme :

$$Y_i = \sum_{k/l_k \in Y_i} d_{k,i} - \sum_{k/l_k \in P_{i,t}} \bar{d}_{k,i,t} + \sum_{k/l_k \in P_{i,t+1}} d_{k,i,t+1}^+ \quad (\text{III.20.})$$

$\bar{d}_{k,i,t}$: temps opératoire déjà effectué sur le lot l_k par le moyen M_i à l'instant t

$d_{k,i,t+1}^+$: temps opératoire restant à effectuer sur le lot l_k par le moyen M_i à l'instant $t+1$.

Notons qu'en raisonnant sur le nombre de lots, on obtient une relation semblable à celle sur les charges, à savoir :

$$\text{Card } E_{i,t+1} = \text{Card } E_{i,t} + \text{Card } X_i - \text{Card } Y_i \quad (\text{III.21})$$

A l'instant initial t , nous connaissons successivement pour chaque moyen les termes $E_{i,t}$ et X_i . Comme nous venons de l'exprimer, la quantité X_i est déduite soit du flux d'entrée soit des flux de sortie des moyens antécédents.

Nous allons introduire dans la relation III.6. la valeur de l'en-cours souhaitée en fin de période de façon à en déduire la charge initiale C_i :

$$C_i = E_{i,t} + X_i - \overset{\text{obj}}{E_{i,t+1}} \quad (\text{III.22})$$

Exemple

Dans l'exemple choisi, tous les lots passent sur le moyen M_1 , le flux d'entrée sur M_1 sera donc égal au flux d'entrée total ($X_1 = Y_0$).

$$E_{1,t} = 40$$

$$\text{Nous supposons } \overset{\text{obj}}{E_{1,t+1}} = 60$$

$$X_1 = \sum_{k/l_k \in Y_0} d_{k,1} = d_{6,1} + d_{7,1} + d_{8,1} + d_{9,1} = 50 + 45 + 45 + 60 = 200$$

$$C_1 = E_{1,t} + X_1 - \overset{\text{obj}}{E_{1,t+1}} = 40 + 200 - 60 \quad \underline{\underline{C_1 = 180}}$$

III.2.5. Calcul de l'intensité d'un moyen

L'intensité, définie par le nombre de postes en activité d'un moyen, est soumise à plusieurs contraintes.

D'une part, elle est limitée par le nombre de postes disponibles m_i (contrainte cumulative sur les moyens) :

$$0 \leq I_i \leq m_i \quad (\text{III.23})$$

D'autre part, elle doit être constante sur la période (*contrainte temporelle sur les moyens*). De façon à ce que les postes soient alimentés correctement sur la durée de la période, nous choisissons un nombre de postes immédiatement inférieur à celui requis par la charge initiale.

L'intensité est donc égale à :

$$\begin{aligned} I_i &= \text{Int} [C_i / \theta] && \text{si } \text{Int} [C_i / \theta] < m_i \\ &= m_i && \text{sinon} \end{aligned} \quad (\text{III.24})$$

(où Int désigne la partie entière du terme entre crochets).

Exemple

C_1	$= 180$
θ	$= 150$
m_1	$= 2$

$$\text{Int} [C_1 / \theta] = \text{Int} [1,2] = 1 \quad \underline{\underline{I_1 = 1}}$$

On se place ainsi volontairement dans un cas favorable par rapport au critère U^h , en évitant le plus possible a priori les ruptures sur les postes actifs. L'intensité sera éventuellement corrigée ensuite selon la valeur de δ_h si le nombre de personnes ainsi obtenu est supérieur ou inférieur à l'effectif disponible h (§ III.3.).

III.2.6. Simulation locale de l'écoulement

La simulation consiste à traiter sur un moyen tous les événements "fin d'opération" par ordre d'apparition et à rechercher à chaque fois le lot suivant dans la file d'attente.

Un premier traitement avant simulation permet de ranger les lots par ordre d'arrivée, de façon à pouvoir gérer ensuite un pointeur dans la file d'attente et simplifier ainsi la recherche du lot prioritaire.

En effet, les lots présents sur un moyen au cours de la période peuvent appartenir à divers ensembles :

- l'ensemble des lots en cours d'exécution en début de période, $P_{i,t}$
- l'ensemble des lots en attente en début de période $F_{i,t}$
- l'ensemble des lots induits par les moyens antécédents X_i

Ils se succèdent avant classement dans un ordre déterminé par la boucle de calcul, tel que celui de l'exemple ci-dessous (Fig. III.4a). La période débute ici à l'instant $t = 0$.

a)	<table> <tr> <th>k</th><th>$a_{k,3}$</th><th>$f(k)$</th></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>120</td><td>0,9</td></tr> <tr><td>7</td><td>90</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>8</td><td>50</td><td>1,5</td></tr> <tr><td>5</td><td>90</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>9</td><td>60</td><td>1,7</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>4</td><td>- 10</td><td>0,8</td></tr> <tr><td>3</td><td>- 15</td><td>1,5</td></tr> <tr><td>2</td><td>- 60</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>1</td><td>- 80</td><td>0,5</td></tr> </table>	k	$a_{k,3}$	$f(k)$				10	120	0,9	7	90	1,0	8	50	1,5	5	90	1,2	9	60	1,7	6	0	1,0	4	- 10	0,8	3	- 15	1,5	2	- 60	1,0	1	- 80	0,5	$\left. \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \in Y_2 \\ \in Y_1 \\ \in Y_0 \end{array} \right\} \\ F_{3,t} \\ P_{3,t} \end{array} \right\} X_3$
k	$a_{k,3}$	$f(k)$																																				
10	120	0,9																																				
7	90	1,0																																				
8	50	1,5																																				
5	90	1,2																																				
9	60	1,7																																				
6	0	1,0																																				
4	- 10	0,8																																				
3	- 15	1,5																																				
2	- 60	1,0																																				
1	- 80	0,5																																				
b)	<table> <tr> <th>k</th><th>$a_{k,3}$</th><th>$f(k)$</th></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>120</td><td>0,9</td></tr> <tr><td>5</td><td>90</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>7</td><td>90</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>9</td><td>60</td><td>1,7</td></tr> <tr><td>8</td><td>50</td><td>1,5</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>4</td><td>- 10</td><td>0,8</td></tr> <tr><td>3</td><td>- 15</td><td>1,5</td></tr> <tr><td>2</td><td>- 60</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>1</td><td>- 80</td><td>0,5</td></tr> </table>	k	$a_{k,3}$	$f(k)$				10	120	0,9	5	90	1,2	7	90	1,0	9	60	1,7	8	50	1,5	6	0	1,0	4	- 10	0,8	3	- 15	1,5	2	- 60	1,0	1	- 80	0,5	
k	$a_{k,3}$	$f(k)$																																				
10	120	0,9																																				
5	90	1,2																																				
7	90	1,0																																				
9	60	1,7																																				
8	50	1,5																																				
6	0	1,0																																				
4	- 10	0,8																																				
3	- 15	1,5																																				
2	- 60	1,0																																				
1	- 80	0,5																																				

Fig. III.4 Rangement des lots par ordre d'arrivée.

Dans le cas où des lots sont ex aequo par rapport à la règle "premier entré, premier servi", ceux-ci sont départagés par la priorité externe (dans l'exemple, les lots l_5 et l_7). Le classement final est donné par la Fig. III.4b et correspond à l'allure physique de la file d'attente.

Ensuite, dans la simulation, lorsqu'une opération est terminée sur l'un des postes du moyen M_i , la logique d'évolution du système se définit par la séquence suivante :

- Rangement du lot dans la file du moyen suivant M_{i+x} . Sont alors prises en compte les *contraintes de succession* ainsi que l'implantation physique si l'on sort du cadre d'une file unique par opération.
- Enregistrement de la date d'arrivée $a_{k,i+x}$ ou de la date de fin s_k s'il s'agit de la dernière opération.

- c) Recherche du lot prioritaire dans la file d'attente (sur les postes non utilisés, les lots qui étaient en cours d'exécution en fin de période précédente sont achevés avant les lots entrants, de manière à ne pas les immobiliser durant toute une période).
- d) Calcul de la date de fin de l'opération $s_{k,i}$ (prise en compte de la *contrainte d'utilisation des moyens*).
- e) Recherche de la plus petite date de fin sur les postes (nouvel événement à traiter).

La simulation intègre également, au cours de son déroulement, la mesure de tous les indicateurs nécessaires à l'évaluation du résultat final.

Exemple

La file d'attente, après classement, se présente sous la forme suivante :

k	$a_{k,1}$	$f(k)$
9	t	2,1
8	t	1,2
7	t	1,0
6	t	0,3
5	$t-80$	0,9

}

$X_{1,t}$

 $P_{1,t}$

Fig. III.5.

L'écoulement des lots selon la règle FCFS est visualisé sur le diagramme ci-dessous. Nous représentons également l'évolution de la charge entre les instants t et $t+1$.

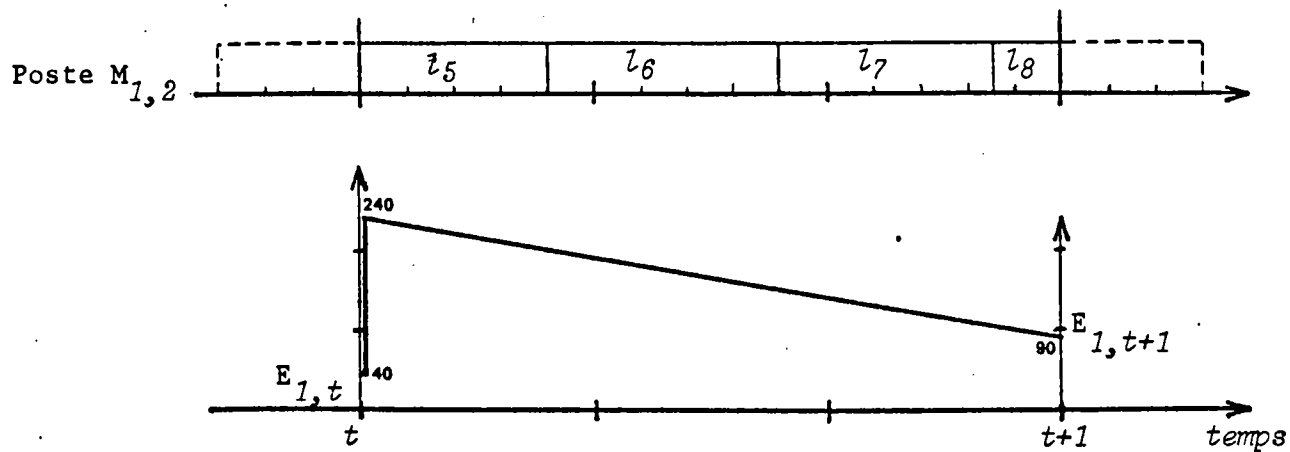


Fig. III.6. Ecoulement des lots sur le poste $M_{1,2}$.

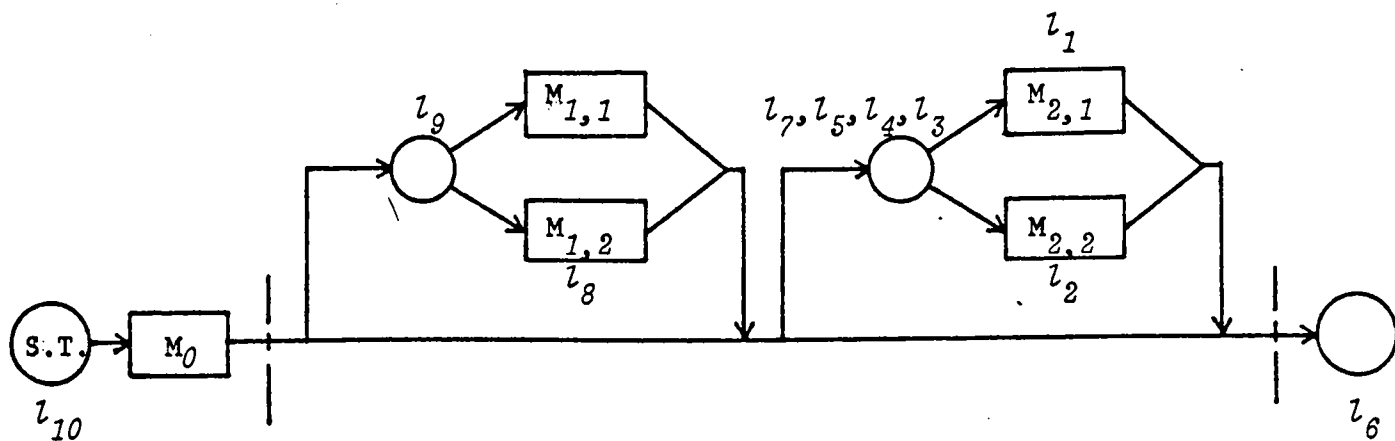


Fig. III.7. Etat de l'atelier après itération sur le moyen M_1 .

III.2.7. Poursuite de l'exemple

Après avoir décomposé la procédure de calcul sur le moyen M_1 , nous allons effectuer l'ensemble du calcul sur le moyen M_2 .

L'état au départ est le suivant :

Moyen M_2	$E_{2,t} = \{l_1, l_2, l_3, l_4\}$	$E_{2,t} = 250$ (cf § III.2.2)
	$X_2 = \{l_5, l_7\}$	$X_2 = 175$ (cf Fig. III.7.)

1. Charge initiale

On suppose $\overset{\text{obj}}{E_{2,t+1}} = 60$

$$C_2 = E_{2,t} + X_2 - \overset{\text{obj}}{E_{2,t+1}} = 250 + 175 - 60 \quad \underline{\underline{C_2 = 365}}$$

2. Intensité

$$\text{Int} [C_2 / \theta] = \text{Int} [365 / 150] = \text{Int} [2,43] \implies \underline{\underline{I_2 = 2}}$$

$$m_2 = 2$$

3. Simulation

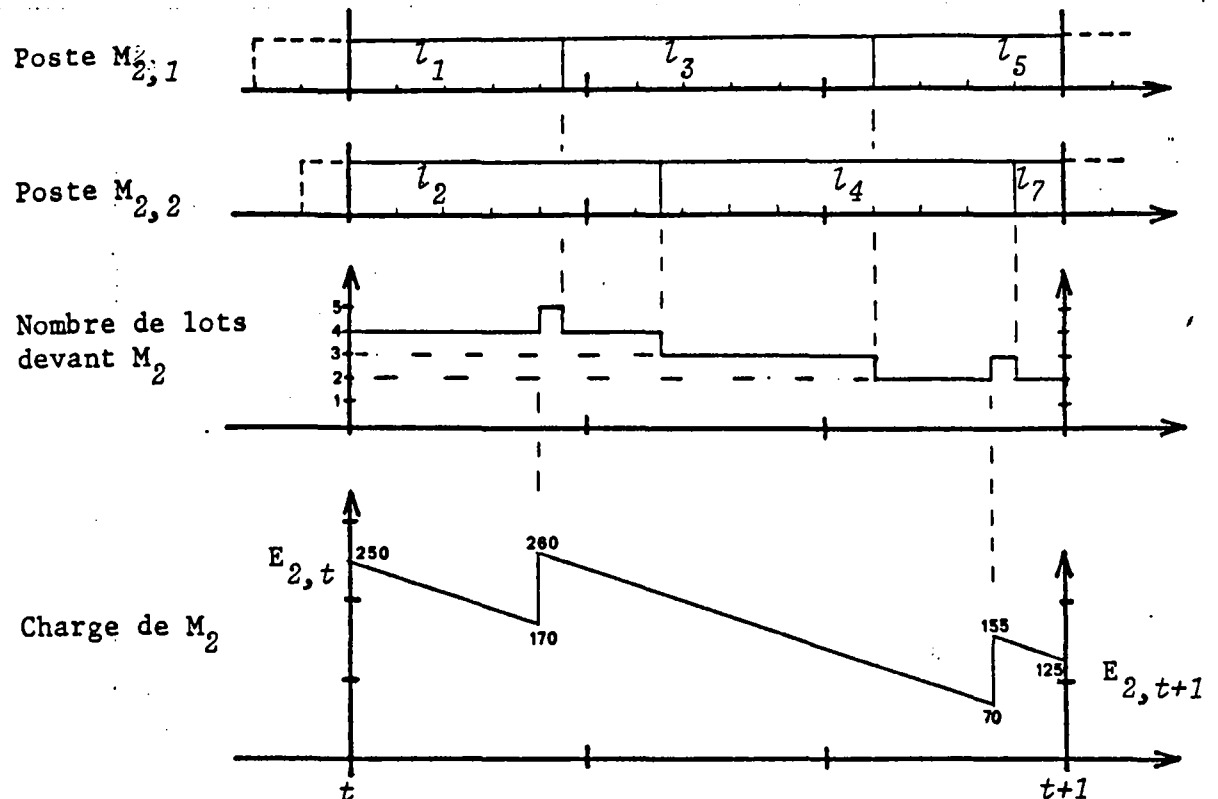


Fig. III.8. Ecoulement des lots sur le moyen M_2

4. Etat final

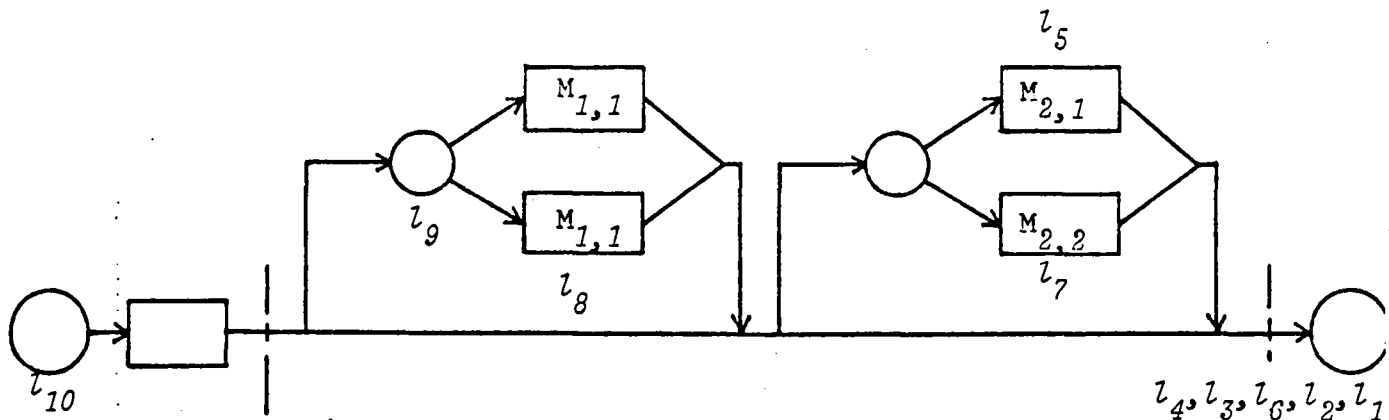


Fig. III.9. Etat final à l'instant t+1

$$\begin{array}{llll} \text{Moyen } M_1 : F_{1,t+1} = \{l_9\} & F_{1,t+1} = d_{9,1} = 60 & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ E_{1,t+1} = 90 \end{array} \\ P_{1,t+1} = \{l_8\} & P_{1,t+1} = d_{8,1,t+1}^* = 30 & \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{Moyen } M_2 : F_{2,t+1} = \emptyset & F_{2,t+1} = 0 & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ E_{2,t+1} = 125 \end{array} \\ P_{2,t+1} = \{l_5, l_7\} & P_{2,t+1} = 125 & \end{array}$$

L'en-cours total en fin de période vaut donc : $E_{t+1} = 215$. On peut calculer ensuite l'activité de chaque moyen afin d'en déduire le taux d'utilisation des effectifs.

Y_i est obtenu à partir de la relation III.6. :

$$\begin{array}{llll} Y_1 = E_{1,t} + X_1 - E_{1,t+1} = 40 + 200 - 90 & Y_1 = 150 \\ Y_2 = E_{2,t} + X_2 - E_{2,t+1} = 250 + 175 - 125 & Y_2 = 300 \end{array}$$

$$\text{et donc : } U_1^h = \frac{Y_1}{\theta \cdot I_1} = \frac{150}{150 \cdot 1} \quad \underline{U_1^h = 1}$$

$$U_2^h = \frac{Y_2}{\theta \cdot I_2} = \frac{300}{150 \cdot 2} \quad \underline{U_2^h = 1}$$

et puisque nous avons partout une seule personne par poste (relation III.9.) :

$$U^h = \frac{Y}{\theta.I} = \frac{450}{150.3} \quad \underline{U^h = 1}$$

Le taux d'utilisation obtenu est évidemment de 100 % puisqu'il n'y a aucune rupture prévisible sur les postes actifs, comme le montrent les diagrammes de GANTT.

La solution élaborée par le modèle $S_m = \{1,2\}$ vérifie la relation III.1. :

$$\begin{aligned} q_1 I_1 + q_2 I_2 &= h \\ 1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 &= 3 \end{aligned}$$

ce qui équivaut à $\delta_h = 0$

La solution proposée par le modèle est donc *admissible* et ne nécessite pas d'ajustement d'effectif ($S_m = S_f$), à condition toutefois que les qualifications des personnes soient adaptées, c'est-à-dire que n'interviennent pas de contraintes cumulatives sur les effectifs locaux.

III.3. PROCEDURES D'AJUSTEMENT

La solution initiale proposée par le modèle satisfait implicitement les critères d'évaluation (en-cours et taux d'activité des postes). Il reste toutefois à ajuster, le cas échéant, le nombre de postes en fonction de l'effectif présent dans l'atelier. On se situe alors dans un processus de décision multi-critère où les choix à faire résultent la plupart du temps de compromis. Ce rôle d'ajustement appartient au décideur qui doit annuler l'écart δ_h entre l'effectif calculé et l'effectif présent.

Lorsque le niveau d'en-cours est élevé, les moyens sont fortement découplés entre eux sur une même période ; cela revient à exprimer qu'un lot sortant d'un poste a peu de chance d'être exécuté sur le poste suivant durant la même période si la file d'attente est importante. Le choix des postes n'est limité dans ce cas que par les contraintes cumulatives et il est relativement facile de décider puisqu'il existe un grand nombre de solutions admissibles. Dans un contexte où les flux sont plus "tendus", et nous nous situons délibérément dans ce cadre, une aide à la décision devient souhaitable car alors, selon que δ_h est positif ou négatif les questions qui se posent deviennent respectivement les suivantes :

- Comment choisir des postes complémentaires en étant sûr qu'ils auront un taux d'activité satisfaisant ?
- Comment supprimer des postes en s'assurant que ces suppressions n'occasionneront pas de rupture sur les postes en aval ?

Le modèle, tel qu'il a été décrit jusqu'ici, permet d'évaluer par l'emploi de la simulation les conséquences de chaque décision. On peut donc parvenir par des itérations successives à une solution admissible. Ce premier type de raisonnement relève cependant d'une procédure de type "essai - erreur" et ne nous paraît pas acceptable.

Dans une perspective d'utilisation en temps réel, il faut au contraire chercher à réduire au minimum le nombre de ces itérations. Cela nous impose de définir lors du calcul de la solution S_m les éléments d'appréciation nécessaires pour procéder à des ajustements pertinents et éviter des calculs successifs.

Si nous nous référons à la terminologie de description des calculs décisionnels [32] le problème posé est ici de déterminer par inférence un nouveau support de l'activité, c'est-à-dire de nouvelles valeurs d'intensité.

La démarche proposée ci-après sera illustrée à partir de l'exemple précédent auquel nous ajoutons un moyen M_3 . Ce moyen comporte deux postes et on suppose qu'un lot l_0 est en cours d'exécution sur le poste $M_{3,1}$.

On suppose également dans un premier temps que l'on dispose de cinq personnes, ce cas mettant en évidence le besoin d'un poste complémentaire.

Le calcul du flux d'entrée donne les résultats suivants :

$$\phi_e = \{l_6, l_7, l_8, l_9, l_{10}\} \quad \text{et} \quad \phi_e = 820 \quad (h \cdot \theta = 750)$$

L'exécution des lots sur les deux premiers moyens est identique au cas précédent. Pour le moyen M_3 , il faut initialement un poste actif :

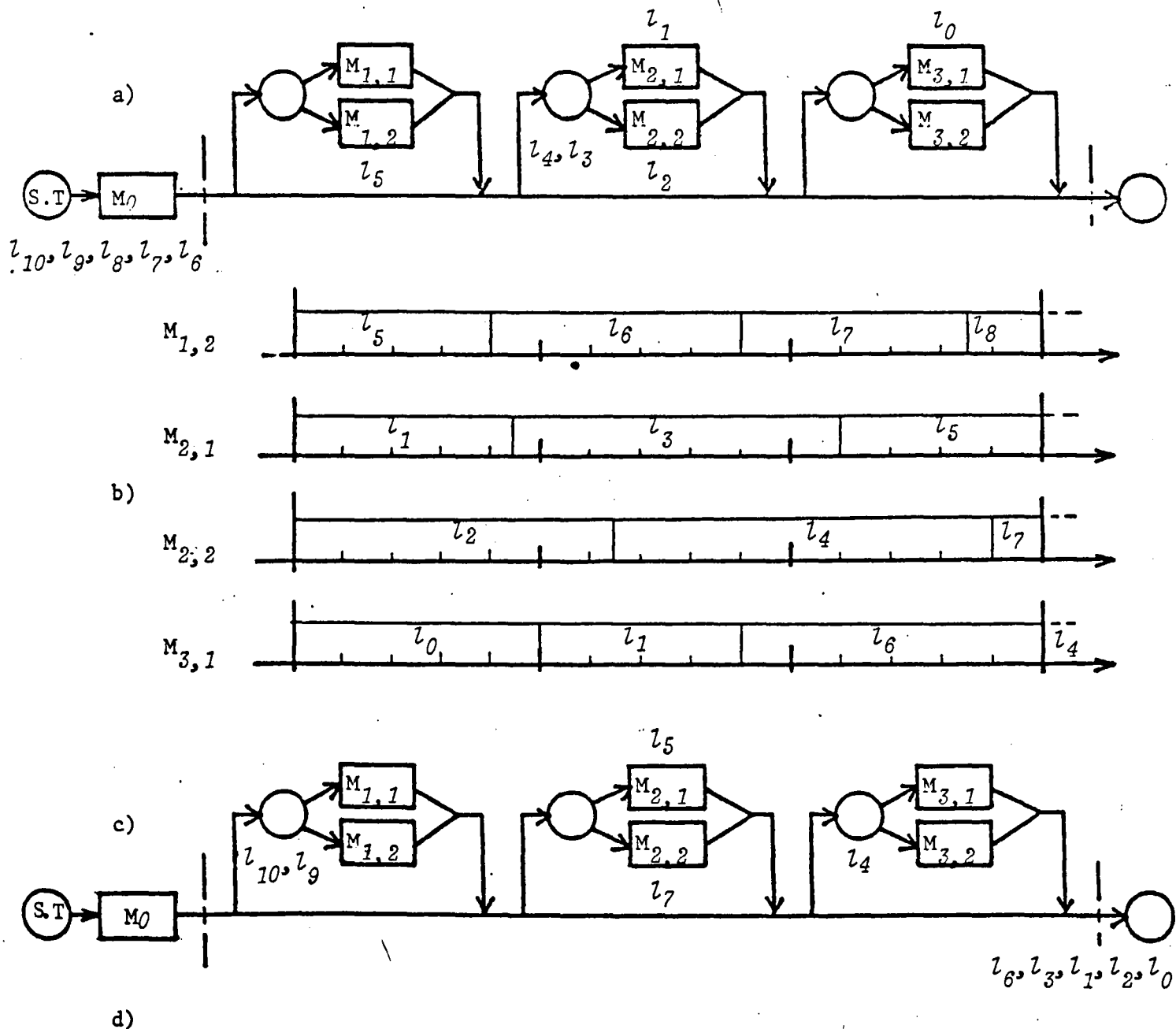
$$I_3 = 1 \quad \text{pour} \quad \overset{\text{obj}}{E_{3,t+1}} = 60$$

L'évolution générale de l'atelier correspondant à la solution $S_m = \{1, 2, 1\}$ est représentée sur la figure III.10.

III.3.1. Désignation de postes complémentaires ($\delta_h > 0$)

Pour passer de la solution S_m à la solution finale S_f , nous avons cherché à définir des indicateurs *locaux* de manière à éviter le recours à l'évaluation globale de plusieurs solutions. L'obtention de ces indicateurs a pu être ramenée à une procédure simple ; en effet, plusieurs facteurs contribuent à simplifier le problème :

- d'une part, on peut éliminer par avance les moyens pour lesquels tous les postes disponibles sont actifs dans la solution initiale : $I_i = m_i$; on ne peut alors ajouter de poste ;
- d'autre part, il est peu probable, lorsque l'en-cours est faible, de pouvoir désigner plus d'un poste complémentaire appartenant à un même moyen. Et ceci n'est de toute façon pas souhaitable par rapport au respect de l'objectif d'en-cours final.



	TEMPS OPERATOIRES			TEMPS TOTAL	TEMPS RESTANT			TEMPS EFFECTUE		
Lots	$d_{k,1}$	$d_{k,2}$	$d_{k,3}$	d_k	$d_{k,1,t}^+$	$d_{k,2,t}^+$	$d_{k,3,t}^+$	$\bar{d}_{k,1,t}$	$\bar{d}_{k,2,t}$	$\bar{d}_{k,3,t}$
l_0	50	50	70	170			50			20
l_1	40	65	40	145		45			20	
l_2	45	70	0	115		60			10	
l_3	60	70	0	130						
l_4	65	75	65	205						
l_5	70	90	0	160	40			30		
l_6	50	0	60	110						
l_7	45	85	35	165						
l_8	45	90	60	195						
l_9	60	100	0	160						
l_{10}	65	75	50	190						

Fig. III.10. Solution initiale sur trois moyens - cinq personnes.

a) Etat initial, b) Avancement des lots, c) Etat final, d) Temps opératoires.

- enfin, l'influence d'une augmentation du nombre des postes d'un moyen est généralement favorable aux moyens suivants (elle a tendance à faire arriver les lots plus tôt sur les postes d'aval et donc à favoriser leur activité).

Compte tenu de ce dernier point, dans la majorité des cas, les ajustements que l'on peut décider localement et sans analyser l'incidence sur l'environnement en aval, ne remettent pas en cause la solution initiale sur les autres moyens. Nous allons donc raisonner localement afin de privilégier l'efficacité du calcul.

L'activité Y_i de chaque moyen est connue pour une valeur d'intensité égale à I_i . Nous allons faire l'hypothèse, après chaque simulation locale sur I_i , d'un poste en plus lorsque cela sera possible, simuler l'écoulement des lots sur I_i+1 postes et déterminer l'activité correspondante Y_i^+ .

Le taux d'utilisation correspondant est défini par :

$$U_i^{h+} = \frac{Y_i^+}{\theta (I_i+1)} \quad (\text{III.25})$$

Dans la mesure où l'en-cours final le permet, on peut ainsi dégager des postes complémentaires sur la base de ces indicateurs.

Exemple

Dans le cas cité précédemment, le passage des lots sur I_i+1 postes est représenté sur les diagrammes de la figure III.11.

Les résultats sont résumés dans le tableau III.12.

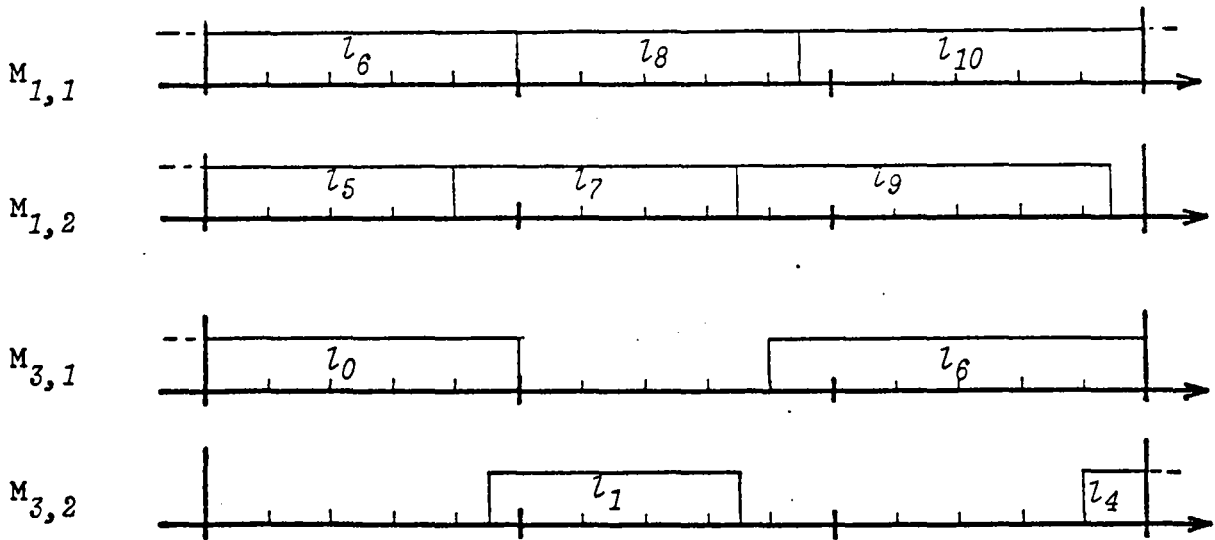


Fig. III.11. Simulation sur I_i+1 postes

	M_1	M_2	M_3
I_i	1	2	1
Y_i	150	300	150
U_i^h	1,00	1,00	1,00
$E_{i,t+1}$	90	200	65
Y_i^+	295	impossible	160
U_i^{h+}	0,98	-	0,53
$E_{i,t+1}^+$	10	-	55

Fig. III.12. Résultats

La solution initiale propose quatre postes alors que nous disposons de cinq personnes. Cette cinquième personne peut être affectée soit au moyen M_1 , soit au moyen M_3 . Le taux d'utilisation de 98 % obtenu par la simulation sur I_i+1 postes privilégie le choix d'un poste du moyen M_1 ; celui-ci subira toutefois dans l'exemple une rupture d'alimentation de cinq minutes.

Dans le cas général, si la première évaluation ne permet pas de dégager un nombre suffisant de postes complémentaires, on peut procéder à une nouvelle itération car les moyens sur lesquels on aura alors augmenté le nombre de postes vont induire une plus grande charge entrante sur les moyens suivants et permettre éventuellement des nouveaux ajustements.

Il est à noter que l'on peut limiter de ce fait le rôle du décideur en désignant d'une façon automatique et itérative les postes qui ont un taux d'utilisation satisfaisant (supérieur ou égal à une valeur fixée). Nous verrons plus loin comment cette procédure a été utilisée dans l'expérimentation du modèle.

III.3.2. Suppression de postes ($\delta_h < 0$)

Nous savons, par le mode de calcul des intensités, qu'en marche normale de l'atelier, le modèle place toujours la solution initiale dans le cas précédent où δ_h est positif ; ceci est d'autant plus confortable que l'évaluation est rapide. Le cas où δ_h est négatif, c'est-à-dire où il faut supprimer certains postes proposés par le modèle, n'apparaît que dans des cas de marche dégradée, en particulier lorsque l'absentéisme est tel que la répercussion sur le flux d'entrée ne suffit plus à réduire suffisamment la charge initiale : mais le problème est alors beaucoup plus complexe dans la mesure où il faut nécessairement considérer l'influence d'un moyen sur les moyens qui lui succèdent.

Nous allons chercher à identifier, à partir d'indicateurs, les postes qui peuvent être supprimés sans créer de rupture de charge en aval.

Un examen des approches possible du problème nous a conduit à retenir la procédure de calcul la moins lourde ; celle-ci consiste à raisonner comme si l'on ne voulait supprimer qu'un seul poste à la fois. S'il faut supprimer plusieurs postes, on effectue alors plusieurs itérations.

Nous partirons de l'hypothèse suivante :

- Il est peu probable de pouvoir ôter de la solution initiale plus d'un poste appartenant à un même moyen,

et nous étudierons localement sur chaque moyen, à travers la notion de *couplage* définie ci-dessous, l'incidence de la suppression d'un poste :

Définition Le couplage $K_{i,j}$ entre un moyen M_i et un moyen M_j situé en aval ($i < j$), est défini comme la perte d'activité subie par le moyen M_j au cours de la période lorsque l'on supprime un poste sur le moyen M_i .

(Si aucun poste du moyen M_i n'est initialement actif, alors le couplage est nul par définition).

On pose alors la condition suivante :

Pour supprimer un poste du moyen M_i , il faut et il suffit que le couplage soit nul entre le moyen M_i et l'ensemble des moyens "aval".

Ce qui revient à écrire :

$$K_i = \sum_{j=i+1}^m K_{i,j} = 0 \quad (\text{III.26.})$$

K_i : couplage total du moyen M_i .

La perte d'activité éventuelle définie par $K_{i,j}$ est évidemment due aux lots qui passent initialement sur M_i et M_j et qui ne sortent plus de M_i du fait de la diminution d'un poste. Celle-ci peut toutefois être compensée par l'exécution d'autres lots ne passant pas initialement sur M_j , soit :

- des lots en attente dans la file de M_j
- des lots entrants, induits par des modifications de la charge des postes intermédiaires entre M_i et M_j , lorsque $j > i+1$.

Pour prendre en compte l'ensemble de ces aspects sous l'angle dynamique, il est nécessaire de simuler l'écoulement des lots. La procédure adoptée pour évaluer le couplage d'un moyen M_i ($i=1, \dots, m-1$) comporte les deux étapes suivantes :

- a) simulation de l'écoulement des lots sur $I_i - 1$ postes,
- b) simulation sur tous les moyens suivants M_j ($j=i+1, \dots, m$) en reprenant les intensités initiales I_j et en mesurant l'activité ainsi obtenue, qui sera notée y_j^i .

On répète donc cette procédure $m-1$ fois avant de calculer les termes de couplage $K_{i,j}$ qui sont égaux à la différence entre l'activité initiale Y_j et l'activité résultante Y_j^i :

$$K_{i,j} = Y_j - Y_j^i \quad (\text{III.27})$$

Une fois connu l'ensemble de ces valeurs, on peut rechercher les couplages nuls.

Exemple

On repart du même exemple que précédemment en supposant que l'on dispose cette fois de trois personnes.

Le flux d'entrée est naturellement inférieur au cas précédent :

$$\begin{aligned} \phi_e &= \{L_6, L_7, L_8\} \\ \phi_e &= 470 \end{aligned}$$

La solution initiale d'affectation reste la même (cf. Fig. III.13.) ; elle propose quatre postes actifs :

$$\left. \begin{array}{l} h = 3 \\ h_m = 4 \end{array} \right\} \implies \delta_h = -1$$

Il faut donc supprimer un poste.

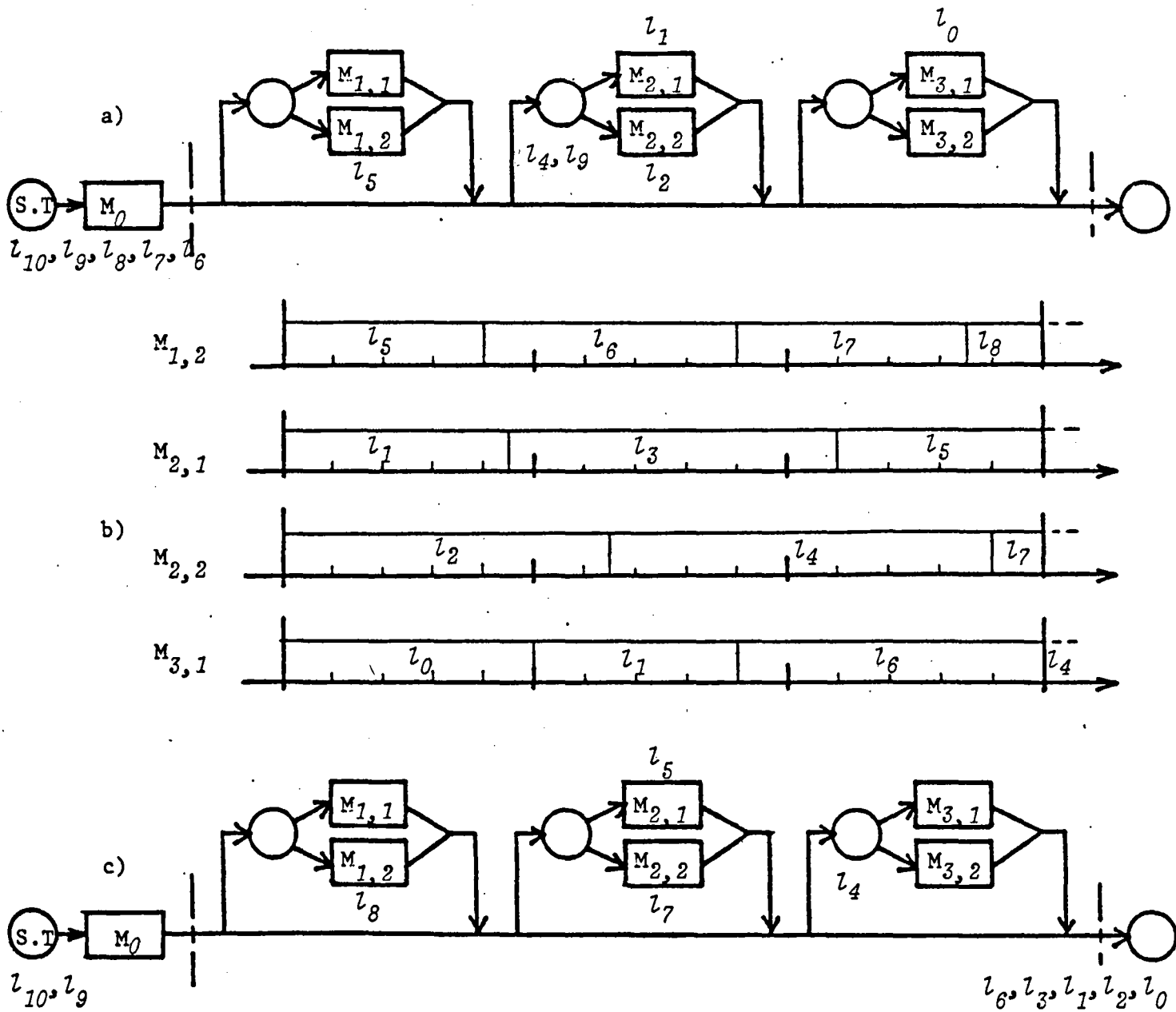
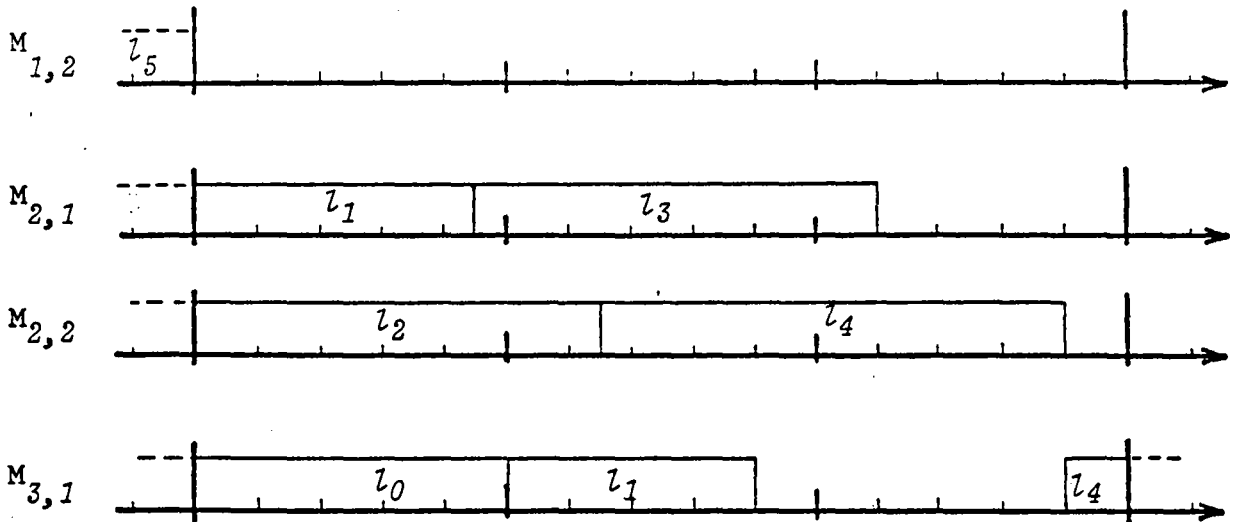


Fig. III.13. Solution initiale sur trois moyens - trois personnes

a) Etat initial, b) Avancement des lots, c) Etat final.

Couplage du moyen M_1

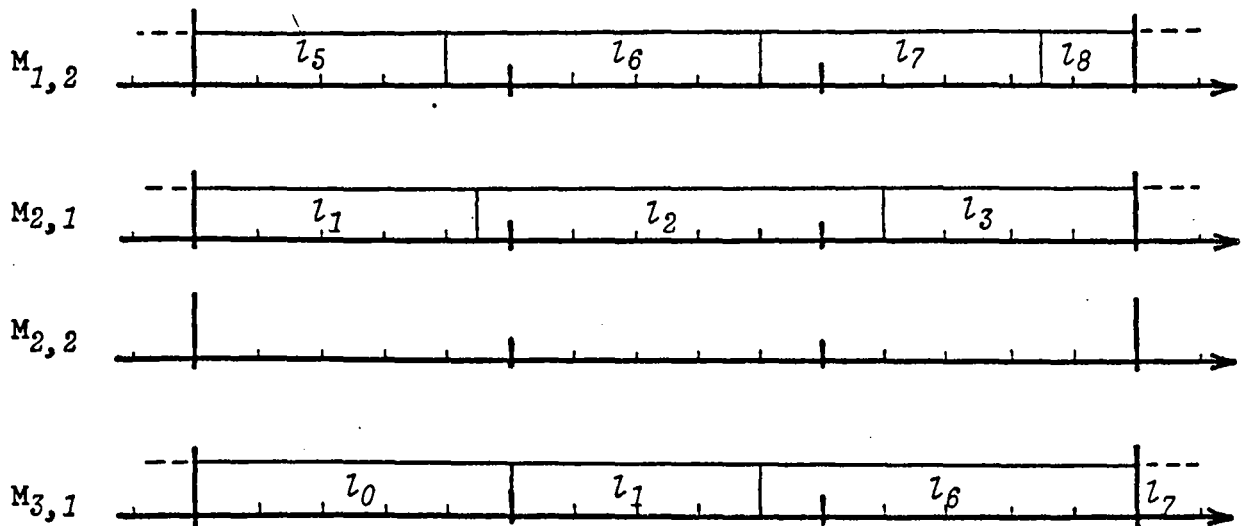


$$I_{i-1} = 0 \quad \text{Aucun poste de } M_1 \text{ actif}$$

$$Y_2^1 = 250 \quad K_{1,2} = Y_2 - Y_2^1 = 300 - 250 \quad K_{1,2} = 50$$

$$Y_3^1 = 100 \quad K_{1,3} = Y_3 - Y_3^1 = 150 - 100 \quad K_{1,3} = 50$$

Couplage du moyen M_2



$$I_{2-1} = 1$$

$$Y_3^2 = 150 \quad K_{2,3} = Y_3 - Y_3^2 = 150 - 150 \quad K_{2,3} = 0$$

Fig. III.14. Evaluation des termes de couplage

L'avancement des lots issus des I_i-1 postes est représenté sur la figure III.14. On obtient les résultats suivants :

$$K_{1,2} = Y_2 - Y_2^1 = 300 - 250 = 50$$

$$K_{1,3} = Y_3 - Y_3^1 = 150 - 100 = 50$$

$$K_{2,3} = Y_3 - Y_3^2 = 150 - 150 = 0$$

$$\underline{K_1 = 100}$$

$$\underline{K_2 = 0}$$

Le couplage total K_2 est nul ; on peut donc supprimer ici le poste $M_{2,2}$ pour obtenir la solution admissible finale $S_f = \{1,1,1\}$.

Il faut toutefois noter que le cas que nous avons fait apparaître sur un exemple limité grâce à une variation importante du niveau d'en-cours, nécessite, lorsqu'il se produit dans un cadre plus concret, un nombre de simulations beaucoup plus important.

Le tableau suivant résume le nombre de simulations locales à effectuer pour chacune des procédures.

Nombre de files m		m	3	5	10	15	20
P R O C É D U R E S	Solution initiale	m	3	5	10	15	20
	Désignation de postes complémentaires	m	3	5	10	15	20
	Suppression d'un poste	$\sum_{i=2}^m i = \frac{m(m+1)}{2} - 1$	5	14	54	119	209
	Suppression de deux postes	$\sum_{i=3}^m i(i-2) = \frac{m}{6}(m+1)(2m-5)+1$	3	26	276	1001	2451

Fig. III.15. Comparaison du volume de calcul des diverses procédures.

Le tableau nous donne les valeurs théoriques maximales pour chacun des cas. Il n'en reste pas moins que la procédure de suppression d'un poste est très longue (environsix fois supérieure en temps de calcul, à la recherche

des postes complémentaires, dans le cas d'un atelier à onze files d'attente comme celui de finition). Le nombre de simulations locales qu'il faudrait effectuer pour pouvoir supprimer deux postes à la fois, montre l'intérêt d'adopter une procédure itérative.

Notons également que si aucun couplage total n'est nul, on peut toujours supprimer un ou plusieurs postes du dernier moyen de l'atelier bien que ceci ne soit pas favorable au flux de sortie ; il est sans aucun doute préférable, dans ce cas, pour un meilleur respect du temps de passage moyen, d'enfreindre la contrainte temporelle sur les moyens en divisant la durée de l'équipe en deux périodes. On effectue alors un premier calcul d'affectation en début d'équipe puis un second calcul sur l'autre moitié en transférant certaines personnes en milieu d'équipe.

III.4. CONCLUSION

Nous avons présenté, au cours de ce chapitre, l'ensemble des principes du modèle de conduite qui permettent, dans les différents cas de figure évoqués, de parvenir à une solution admissible (au sens où nous avons défini l'admissibilité).

L'approche que nous avons retenue permet de respecter les contraintes de mise en oeuvre évoquées en début de chapitre et qui sont essentiellement liées à la prépondérance des ressources humaines dans la gestion de l'atelier.

En effet, l'orientation vers l'aide à la décision permet au responsable d'intégrer dans la solution finale sa connaissance de l'atelier ainsi que l'importance relative de chacun des critères de décision ; ces éléments n'étant pas représentés dans le modèle, cela permet en outre de concrétiser facilement l'application sur un équipement informatique léger de type micro-calculateur.

Par ailleurs, le choix d'un système de conduite décentralisé fait en sorte que l'obtention d'une solution unique ne s'effectue pas au détriment de l'autonomie des postes de travail ; l'affectation des effectifs obtenue laisse en particulier à l'atelier la capacité d'absorber les variations locales de rythme de travail, à l'intérieur des limites que l'on s'est fixées.

Ces conditions étant satisfaisantes sur un plan général, encore faut-il s'assurer que l'utilisation pratique du modèle permette d'atteindre les différents objectifs mesurables que l'on s'est assignés, de manière à tirer un réel bénéfice des avantages associés à une gestion maîtrisée des effectifs et des en-cours.

Ce sont ces points que nous allons vérifier par l'expérimentation du modèle présentée dans le dernier chapitre.

CHAPITRE IV

EXPERIMENTATION DU MODELE ET RESULTATS

Nous nous proposons de montrer dans ce chapitre comment l'utilisation du modèle peut améliorer les performances actuelles de l'atelier de finition. La principale question à laquelle nous apportons une réponse est la suivante :

Jusqu'à quel seuil peut-on diminuer l'en-cours dans l'atelier sans réduire le taux d'activité des personnes ?

A cette fin, nous allons estimer, par simulation, l'évolution conjuguée des divers paramètres de gestion de l'atelier, en prenant pour base de comparaison les performances actuelles des ateliers de production.

IV.1. IMPLEMENTATION DU MODELE

Les procédures décrites dans le chapitre précédent (cf Fig. IV.1) ainsi que les extensions nécessaires à la simulation ont été programmées en BASIC (15 Koctets) sur un micro-ordinateur APPLE III.

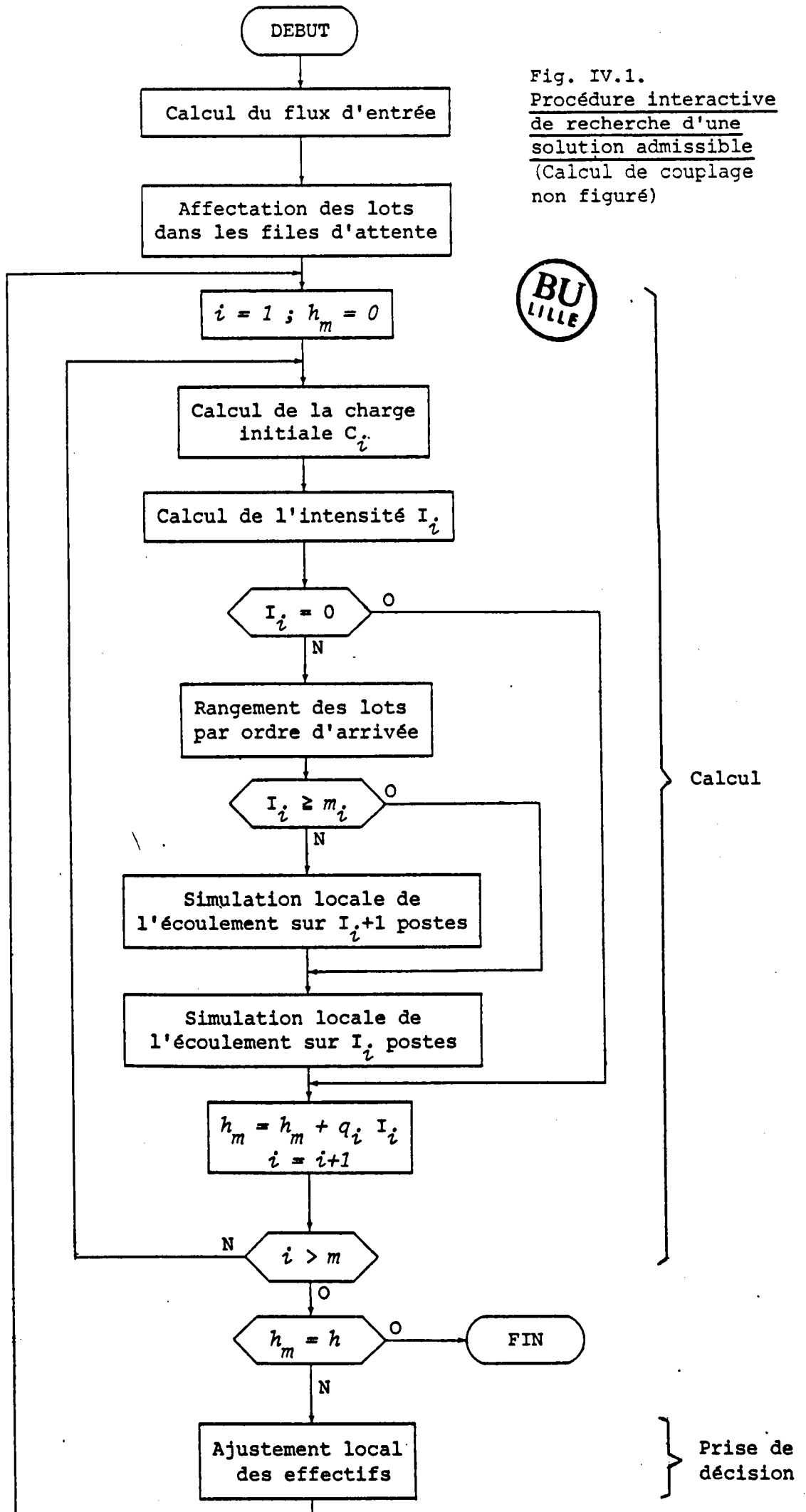
L'utilisation d'un micro-ordinateur permet le choix de rendre l'application autonome au niveau d'un atelier, où, comme c'est le cas ici, de la relier au système informatique de gestion de production. Dans tous les cas, elle doit être reliée à un système de suivi. Précisons que les programmes sont alimentés par quatre types de données :

- les caractéristiques statiques des lots,
- les caractéristiques dynamiques des lots,
- les caractéristiques statiques de l'atelier,
- les caractéristiques dynamiques de l'atelier.

Pour chaque lot en cours, les *caractéristiques statiques* concernent les opérations à effectuer ainsi que les temps opératoires (représentation matricielle). Ajoutons à cela la valeur de l'indice de priorité qui reste constante à partir du lancement du lot dans l'atelier.

Dans le cas où l'application est autonome et dans la mesure où elle est orientée temps réel, ces données doivent être saisies en différé.

Dans notre cas où l'application prolonge le système informatique de planification de la production, ces données sont extraites du fichier gammes et communiquées chaque fois que s'effectue un lancement au tricotage. La configuration de l'ensemble du système informatique est représentée sur la figure suivante (Fig. IV.2.).



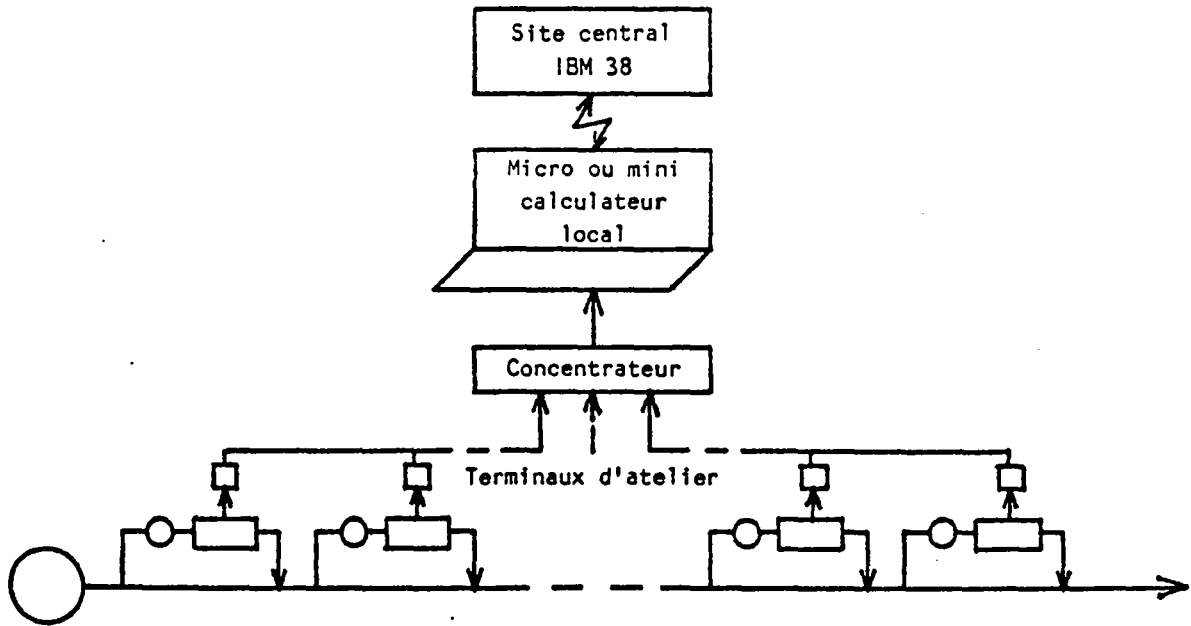


Fig. IV.2. Configuration du système

Les *caractéristiques dynamiques des lots* regroupent les informations suivantes :

- numéro de la dernière file d'attente ou du dernier poste,
- date d'entrée dans la dernière file ou sur le dernier poste (respectivement $a_{k,i}$ ou $e_{k,i}$).

Celles-ci représentent l'état initial de l'atelier en début d'équipe et sont naturellement transmises par le système d'information connecté aux postes de travail.

Les caractéristiques de l'atelier, quant à elles, sont saisies localement, soit lors de chaque modification d'implantation (données statiques), soit avant chaque exécution du programme (données dynamiques).

Précisons que les *données dynamiques* concernent :

- l'effectif disponible durant l'équipe h ,
- le nombre de postes disponibles pour chaque moyen m_i ,
- l'objectif final d'en-cours sur chaque moyen $E_{i,t+1}^{obj}$, s'il doit être modifié,
- la durée de la période (si l'on veut effectuer un calcul sur une demi-période).
- les règles de priorité sur les postes (si elles sont modifiées).

Les *caractéristiques statiques de l'atelier* seront évoquées dans le paragraphe IV.3.1.

IV.2. RECHERCHE D'UNE PROCEDURE D'ESSAI

Une mise en oeuvre pratique de l'application dans l'atelier doit permettre de vérifier les deux points suivants :

- que la solution proposée par le modèle est réalisable et qu'elle n'est pas remise en cause par les aléas,
- que l'on peut concrètement réduire l'en-cours dans l'atelier.

Ces deux points impliquent de poursuivre l'essai en atelier sur une longue période, car, comme nous l'avons déjà mentionné, à niveau d'en-cours élevé, on est assuré que le premier point sera vérifié puisqu'il existe un grand nombre de solutions et que les moyens sont découplés entre eux, et ensuite, un abaissement du niveau d'en-cours ne peut se faire que d'une façon progressive.

Or l'ensemble des conditions nécessaires à une expérimentation in-situ n'a pu être requis, notamment sur le plan du matériel informatique ; en effet, même si nous avons pu saisir manuellement l'état de l'atelier, l'informatisation en cours de la gestion de production ne nous permettait pas encore de communiquer aux usines les gammes à partir du fichier central géré par le service Ordonnancement.

Nous avons donc contourné ces problèmes pratiques en adoptant une procédure différente et sans doute plus conforme à la justification économique du système. Il nous semble important en effet, dans notre démarche et dans le contexte d'une entreprise, de pouvoir approcher les performances d'un système avant de l'implanter plutôt que de l'implanter et de constater a posteriori les performances.

Ainsi, après une mesure de l'existant (relevé des performances des deux ateliers de production en fonctionnement) nous avons estimé par simulation l'évolution des paramètres-clés de la gestion de l'atelier en fonction du niveau d'en-cours (mesuré par la valeur moyenne de E_t), l'objectif étant de nous permettre de *situer le point de fonctionnement* de l'atelier dans le cas de l'utilisation du modèle.

Nous avons donc successivement :

- représenté l'atelier réel étudié,
- constitué des jeux de données représentatifs de la production de cet atelier,
- simulé l'écoulement des lots sur un certain nombre de périodes consécutives, en respectant les solutions d'affectation élaborées par le modèle (régulation par les capacités) et en démarrant, lors de chaque simulation, sur des niveaux d'en-cours différents et maintenus constants ensuite.

IV.3. EXPERIMENTATION

IV.3.1. Modélisation de l'atelier

Nous avons reproduit pour nos essais l'atelier réel de finition, en limitant toutefois le nombre de postes à la configuration de l'atelier dans sa phase de démarrage, de façon à réduire les temps de calcul. Nous retrouvons donc toutes les opérations décrites en I.2.1., à l'exception de la confection des collants qui n'est pas encore réalisée dans cette unité :

- Fermeture de pointe	: 6 postes
- Lavage	: 1 poste
- Traitements	: 1 poste
- Formage - Appairage	: 4 postes
- Opérations spéciales	: 4 postes
- Conditionnement	: 4 postes

Dans le modèle de représentation, une file d'attente ne peut desservir qu'un seul moyen. Or physiquement, certaines files d'attente de l'atelier sont communes à plusieurs postes effectuant des opérations différentes. En particulier ici, après le formage, on dispose d'un carrousel constitué de convoyeurs à rouleaux, qui effectue un stockage dynamique des lots et les achemine sur l'ensemble des postes situés en aval.

Il nous a donc fallu décomposer cette file unique en plusieurs files virtuelles dans lesquelles l'avancement des lots reproduit fidèlement l'avancement réel.

D'autre part, lorsqu'on dispose de plusieurs lignes de fabrication parallèles, la gamme opératoire ne suffit plus à connaître, en sortie d'une opération, la file suivante ; nous avons donc précisé ces caractéristiques statiques de l'atelier à l'aide de tables de correspondance.

Pour les six opérations citées et les cinq lieux de stockage intermédiaires des lots, nous obtenons au total, dans la modélisation, onze files d'attente, qui sont représentées sur la figure IV.3.

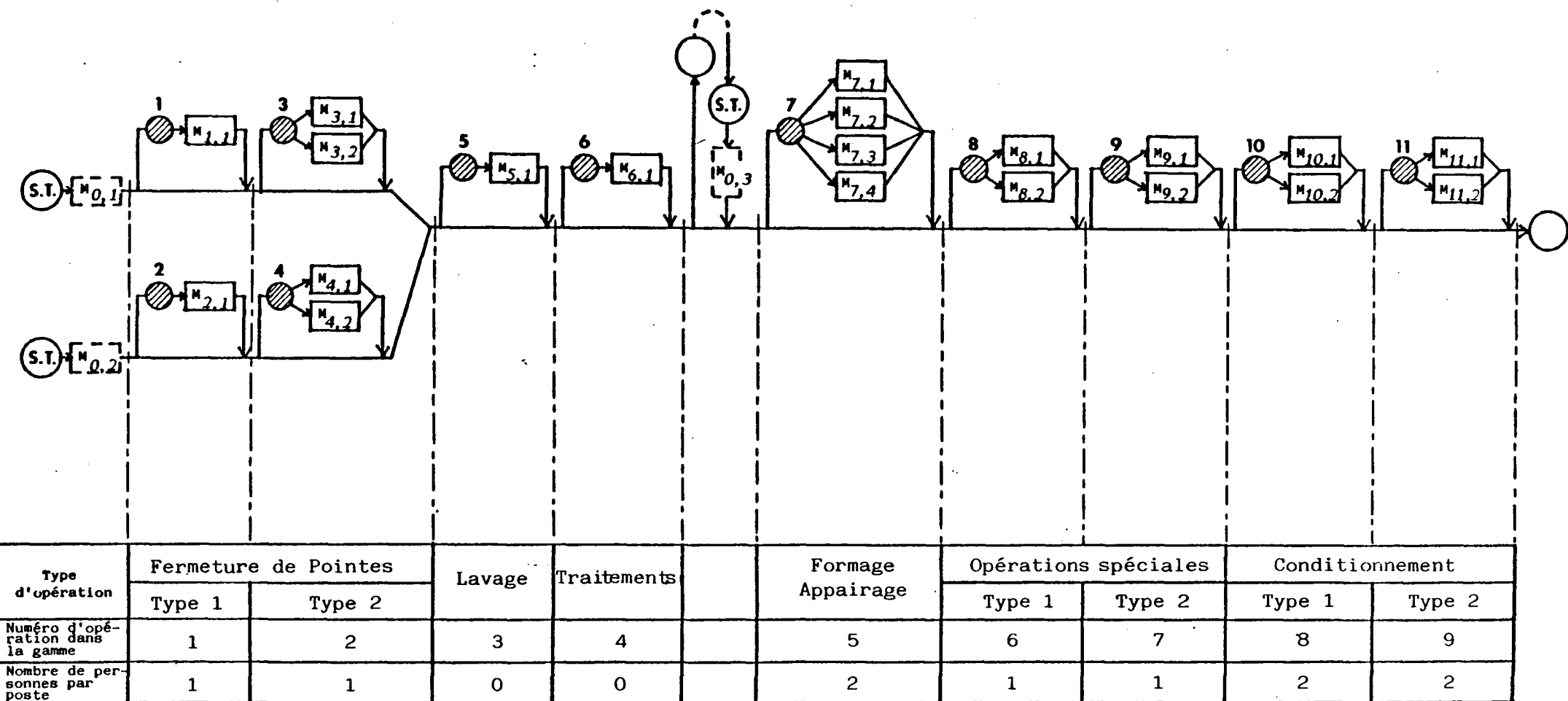


Fig. IV.3. Représentation de l'atelier de finition.

Le modèle utilisant la structure d'atelier à flot unique, il est nécessaire une fois les files créées, de les repérer en respectant une règle de numérotation, de manière à ce que, quels que soient la gamme et le chemin emprunté par le lot, les files rencontrées se succèdent toujours dans un ordre croissant.

On peut noter également un certain nombre de particularités liées aux diverses opérations :

1. *Fermeture de pointes.* Les postes sont disposés sur deux lignes parallèles, chaque ligne étant alimentées par un stock-tampon. Comme il existe deux techniques de couture différentes, chaque ligne dispose de machines des deux types. Le type de couture à réaliser est précisé par la gamme.
2. *Lavage et traitements.* Le personnel affecté à ces deux postes doit être présent, quelle que soit la charge des machines, car il assure d'autres fonctions en parallèle. Ces personnes ne sont donc pas reprises dans le calcul d'intensité ; par conséquent le nombre de personnes indiqué par poste est nul. Cependant il est important de maintenir ces postes dans la simulation pour prendre en compte leur effet sur l'écoulement des lots.
3. *Formage - Appairage.* Les deux opérations sont couplées. On a donc deux personnes par poste pour cette opération.
4. *Conditionnement.* On distingue deux types de conditionnement des produits finis et pour chacun d'eux les machines occupent comme précédemment deux personnes.

L'effectif de chaque équipe est pris égal à 17 personnes.

IV.3.2. Procédure expérimentale

Il nous a fallu trouver une procédure d'expérimentation compatible avec l'usage d'un micro-ordinateur ; nous avons donc choisi de constituer au départ un jeu de données composé d'une série de lots plutôt que de créer un générateur de lots.

Etant limités par la taille-mémoire, et donc par le nombre de lots que nous pouvions y stocker, nous avons augmenté artificiellement ce nombre de lots en réinjectant à l'entrée des stocks tampon les lots sortis. Nous obtenons ainsi un réseau *fermé* de files d'attente, monoclasse, dans lequel les clients (lots) représentent un programme de lancement comparable aux lancements réels en fabrication (cf paragraphe suivant).

Le réseau fermé est figuré sur le schéma suivant. Sont également spécifiées sur ce schéma les procédures particulières de contrôle des flux qu'il a fallu mettre en oeuvre pour réaliser la simulation :

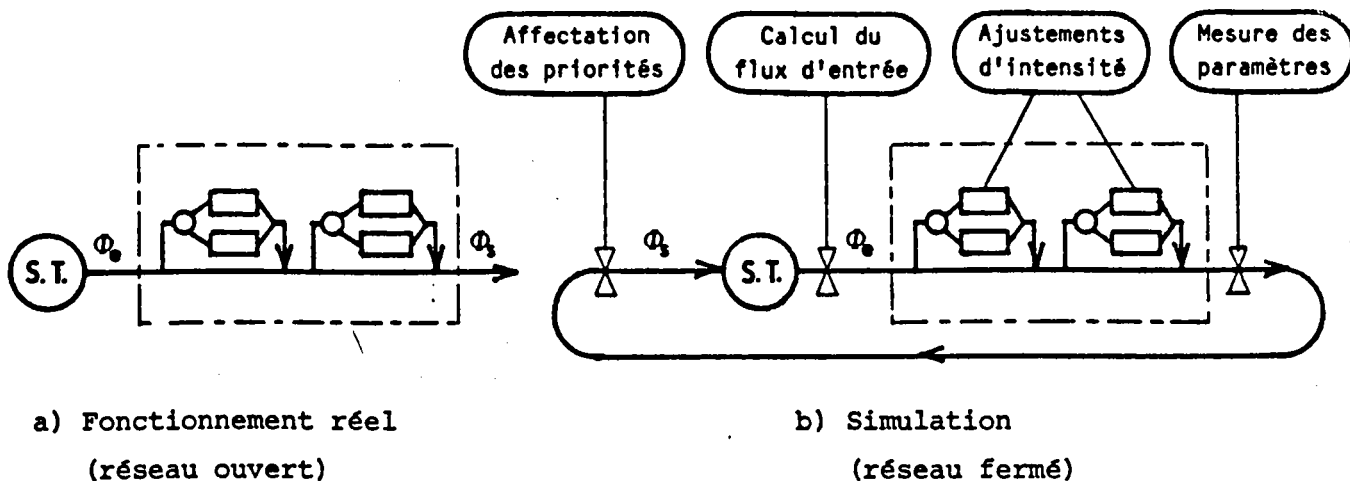


Fig. IV.4.

1. *Affectation des priorités.* Il est nécessaire de simuler ici le calcul des indices de priorité qui sont normalement fournis avant lancement par le service Ordonnancement. De manière à éviter tout phénomène périodique, nous avons généré de façon pseudo-aléatoire une nouvelle priorité chaque fois qu'un lot sortant regagnait le stock tampon.
2. *Calcul du flux d'entrée.* Chaque point de fonctionnement pour lequel on mesure les paramètres est caractérisé par un niveau d'en-cours constant pendant la durée de la mesure. Pour que ce niveau reste constant lorsqu'apparaît une baisse du taux d'utilisation de l'effectif, il est nécessaire de corriger le flux d'entrée.

Rappelons que le flux d'entrée est normalement pris égal à la quantité de travail pouvant être fournie par l'effectif total utilisé à 100 %. Lorsque le taux d'utilisation constaté est inférieur, il faut corriger le flux d'entrée sur la période suivante. Cette correction a été faite par l'intermédiaire du terme δ_ϕ , en ne faisant entrer à chaque période que la quantité de travail réellement effectuée lors de la période précédente :

$$(\delta_\phi)_t = (\delta_\phi)_{t-1} + h \theta (1-U_i^h) \quad (\text{IV.1})$$

3. *Ajustement d'intensité.* De manière à optimiser le déroulement pratique de la simulation, nous avons appliqué la procédure d'ajustement automatique évoquée au paragraphe III.3.1. ; celle-ci consiste à laisser le modèle ajuster la solution initiale en désignant des postes complémentaires dans la mesure où leur taux d'utilisation (U_i^{h+}) est supérieur à une valeur fixée ; dans le cas contraire l'ajustement se fait manuellement.

4. *Mesure des paramètres.* Les principaux paramètres observés sont les suivants :

- niveau moyen d'en-cours total $\bar{E}$
- taux moyen d'utilisation de l'effectif $\bar{U}^h$
- temps attente moyen des lots $\bar{W}$ et écart-type
- temps attente moyen par poste $\bar{W}_p$ et écart-type.

La mesure des temps d'attente plutôt que des temps de passage permet de nous affranchir des variations du temps opératoire moyen.

L'ensemble des paramètres locaux complémentaires est indiqué sur les tableaux IV.6. et IV.7.

IV.3.3. Constitution des jeux de données

Les essais du modèle ont été menés successivement sur deux jeux de données :

- Jeu A : Le premier jeu d'essai sert de référence pour comparer les estimations des paramètres obtenues par simulation aux mesures effectuées en atelier. Il respecte par conséquent globalement la distribution des gammes et des temps opératoires du programme de production sur lequel ont été faites les mesures (cf Fig. IV.5). Comme pour les ateliers réels, nous ne prenons pas en compte dans ce premier jeu les lots qui subissent le cycle de fabrication en deux passages successifs séparés par l'opération intermédiaire de teinture.
- Jeu B : Ce jeu de données prend en compte l'ensemble des lots produits en incluant le circuit de teinture. Le fait que des lots ne subissent qu'une partie du cycle se traduit par une baisse de la moyenne du temps total opératoire et du nombre moyen d'opérations. Nous pourrions ainsi observer la sensibilité de l'atelier à cette modification du programme de fabrication.

CARACTERISTIQUES	JEU A	JEU B
Temps total opératoire moyen	351,4	298,7
Ecart-type	39,2	87,8
Nombre moyen d'opérations	5,15	4,42
Nombre de gammes	26	38
Nombre de lots	108	79

Fig. IV.5. Caractéristiques des jeux de données.

Rappelons que les temps de réglage sont inclus dans les temps opératoires ; les temps de transfert sont négligeables (cf § I.2.3.1.). Nous nous sommes également assurés, pour rester cohérents avec nos hypothèses, que cette distribution des lots n'occasionnait pas de goulot d'étranglement sur l'un des moyens.

Pour chacun des jeux de données, le comportement de l'atelier a été simulé autour de 10 points de fonctionnement, de façon à pouvoir ensuite tracer les courbes caractéristiques de l'atelier à partir de ces points.

Pour chaque point, équivalant à un niveau d'en-cours total $\bar{E}$, la simulation s'est déroulée sur 10 ou 15 périodes successives, après plusieurs périodes d'initialisation servant à ajuster sur chaque moyen le niveau d'en-cours à la valeur souhaitée ($E_{i,t+1}^{obj}$) ; ceci par une action sur le flux d'entrée ou l'effectif. L'effectif total est ensuite constant sur l'ensemble des périodes (17 personnes).

Le nombre relativement faible de périodes de mesure est dû au fait que, dans la zone de fonctionnement étudiée, le recours à une intervention humaine pour décider des ajustements est très fréquent, ce qui allonge considérablement le temps d'exécution d'une simulation. De plus, les corrélations obtenues sur les essais montrent que ce nombre s'avère suffisant.

Les résultats des essais sont reportés dans les tableaux IV.6 et IV.7.

Temps operat. moyen	351.1	352.1	351.2	351.4	351.3	352.2	352.1	352	351	351
ecart-type	39.7	39.6	39.2	39.9	39.7	39.2	39.6	39.3	39.5	39
Temps passage moyen	642.8	758.7	886.9	999.6	1206.3	1409.2	1552.7	1678.9	1808	2480
ecart-type	251.3	318.3	265.8	304.2	347.6	390.5	333.1	383.7	360	460.9
Temps passage maxi	1895	2475	1855	2365	2190	2795	2460	2725	2945	3780
Temps attente moyen	291.7	406.6	535.8	648.2	855	1057	1200.6	1326.9	1457.1	2129.1
ecart-type	251.3	313.7	263.1	305.1	346.3	390.4	329.1	382.1	357.7	460
Tps att. moyen/poste	56.1	79.2	103.3	125.8	165.1	204.6	233.6	257.2	282.6	415.1
ecart-type	48.5	62.8	51.1	60.8	66.9	74.6	63.5	73.3	67.7	92.1
En-cours total moyen	450	754	1178	1518	2034	2765	3137	3510	3992	6117
Taux utilis. effectif	.715	.794	.836	.91	.932	.974	.988	.996	.996	.9997
Nombre periodes	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Nombre lots sortis	180	192	204	222	232	239	231	243	250	252
Nombre iterations	95	86	89	97	71	80	52	39	55	29
En-cours moyen File 1	26	87	156	186	272	458	293	399	461	485
" " 2	14	28	129	188	305	177	344	303	414	467
" " 3	31	91	88	97	129	356	391	494	528	940
" " 4	30	49	161	210	110	251	289	384	462	867
" " 5	0	2	3	5	11	5	4	6	7	5
" " 6	4	6	8	7	11	6	10	13	7	10
" " 7	66	110	126	136	242	310	423	423	513	1160
" " 8	97	122	124	120	167	226	303	346	354	351
" " 9	52	93	90	164	189	89	219	308	336	416
" " 10	59	88	148	225	318	369	454	437	499	637
" " 11	70	78	144	180	280	517	407	397	411	760
Taux utilis. Moyen 1	.696	.77	.788	.85	.846	.867	.933	.933	.867	.867
" " 2	.643	.657	.688	.75	.792	.836	.8	.865	.867	.867
" " 3	.613	.655	.74	.82	.832	.895	.93	.965	.9	.867
" " 4	.657	.778	.808	.832	.89	.929	.962	.93	.932	.967
" " 5	.209	.224	.234	.262	.283	.279	.283	.292	.282	.273
" " 6	.305	.336	.364	.385	.387	.419	.453	.453	.434	.427
" " 7	.489	.555	.579	.635	.644	.675	.693	.679	.681	.683
" " 8	.391	.449	.455	.502	.496	.499	.507	.533	.566	.565
" " 9	.309	.364	.367	.425	.421	.453	.457	.43	.43	.432
" " 10	.386	.429	.476	.479	.518	.543	.533	.53	.567	.633
" " 11	.353	.356	.363	.427	.426	.433	.417	.466	.458	.4

Fig. IV.6. Resultats de la simulation de l'atelier no 1 pour differents niveaux d'en-cours

Jeu de donnees A

Temps operat. moyen	291.1	285.9	288.4	285.8	282.2	277.8	281.1	278.3	272	275.4
ecart-type	89.9	91.4	89.8	90.9	90.4	91.7	91.9	92.5	92.5	93.9
Temps passage moyen	659.6	715.3	855.5	921.6	851.1	995.8	1066.5	1166.5	1467	2575.7
ecart-type	329	360.6	414.7	409.5	348.2	436.8	470.7	494.7	611.5	927.3
Temps attente moyen	368.5	429.4	567.1	635.8	568.9	717.9	785.4	888.2	1195.1	2300.4
ecart-type	284	307.9	369.5	355.6	303.4	375.4	411.5	430.8	546.5	858.8
Tps att. moyen/poste	87.4	98.9	137.4	157.2	144.2	176.2	192	220.1	306.8	597.5
ecart-type	71.2	64.7	93.9	99.4	87.3	100.1	87.9	98	119.1	187.2
En-cours total moyen	723	783	1455	1494	1858	2072	2579	2802	4112	9296
Taux utilis. effectif	.722	.773	.86	.89	.924	.944	.949	.978	.997	.9995
Nombre periodes	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Nombre lots sortis	143	145	162	170	175	178	178	204	199	199
Nombre iterations	50	52	41	44	36	30	31	35	35	23
En-cours moyen File 1	28	47	389	129	97	136	383	421	281	519
" " 2	132	20	87	165	174	178	166	139	225	303
" " 3	83	120	175	182	262	366	433	518	1111	2179
" " 4	46	36	53	84	317	180	384	284	451	1484
" " 5	5	1	7	4	6	2	1	8	8	3
" " 6	6	2	4	2	4	10	5	9	6	9
" " 7	56	66	97	80	163	137	136	253	380	1733
" " 8	112	112	178	172	95	312	160	297	329	444
" " 9	18	131	144	134	132	220	239	324	362	537
" " 10	147	145	167	277	294	335	342	258	485	1101
" " 11	93	106	155	268	318	199	334	294	477	985
Taux utilis. Moyen 1	.669	.678	.557	.789	.861	.792	.674	.7	.793	.9
" " 2	.518	.613	.653	.567	.6	.7	.667	.7	.8	.9
" " 3	.688	.706	.873	.892	.942	.987	1	1	.95	1
" " 4	.652	.737	.806	.833	.887	.904	.946	.99	.995	.95
" " 5	.213	.227	.247	.268	.31	.301	.297	.292	.307	.326
" " 6	.274	.309	.331	.35	.354	.381	.386	.402	.393	.392
" " 7	.492	.555	.629	.644	.657	.704	.702	.692	.724	.725
" " 8	.361	.383	.452	.454	.469	.438	.486	.477	.497	.446
" " 9	.361	.338	.385	.406	.431	.405	.411	.396	.441	.4
" " 10	.383	.442	.505	.494	.511	.492	.53	.576	.55	.55
" " 11	.373	.33	.333	.368	.37	.377	.342	.416	.399	.4

Fig. IV.7. Resultats de la simulation de l'atelier no 1 pour differents niveaux d'en-cours

Jeu de donnees B

IV.4. RESULTATS

IV.4.1. Mesure des performances actuelles

Les premières mesures effectuées ont consisté à relever les temps de passage moyens des lots en atelier de finition dans les deux unités de fabrication, celles-ci étant organisées de manière différente. Les relevés effectués sur une période d'un mois sont reportés sur les histogrammes de la figure IV.8.

En-dehors de l'utilisation d'un outil d'aide à la conduite, on peut déjà constater l'incidence sur les délais du mode d'organisation de l'atelier ainsi que de l'implantation physique puisque pour une production d'articles comparables, on passe, au niveau du temps de passage moyen, de 9 jours dans l'atelier n° 2 à 4,5 jours dans l'atelier étudié.

On constate également que le délai au-delà duquel 95 % des lots sont sortis est, pour l'atelier n° 1, de neuf jours et, pour l'atelier n° 2, de 19 jours.

Il faut toutefois relativiser cet écart par le fait que l'atelier n° 1 travaille en double équipe, l'atelier n° 2 en simple équipe, à l'exception du formage qui s'opère en deux équipes. La comparaison, sur le plan de l'écoulement des flux, est de ce fait assez difficile.

IV.4.2. Résultats de la simulation

Les résultats obtenus par la simulation de l'atelier n° 1 sont résumés par les figures IV.9 et IV.10. Y figure, en fonction du niveau d'en-cours $\bar{E}$, l'évolution des trois paramètres suivants :

- taux moyen d'utilisation des effectifs $\bar{U}^h$
- temps attente moyen $\bar{W}$
- temps attente moyen par poste $\bar{W}_p$

Les variables $\bar{E}$, $\bar{W}$ et $\bar{W}_p$ sont exprimées *en minutes*.

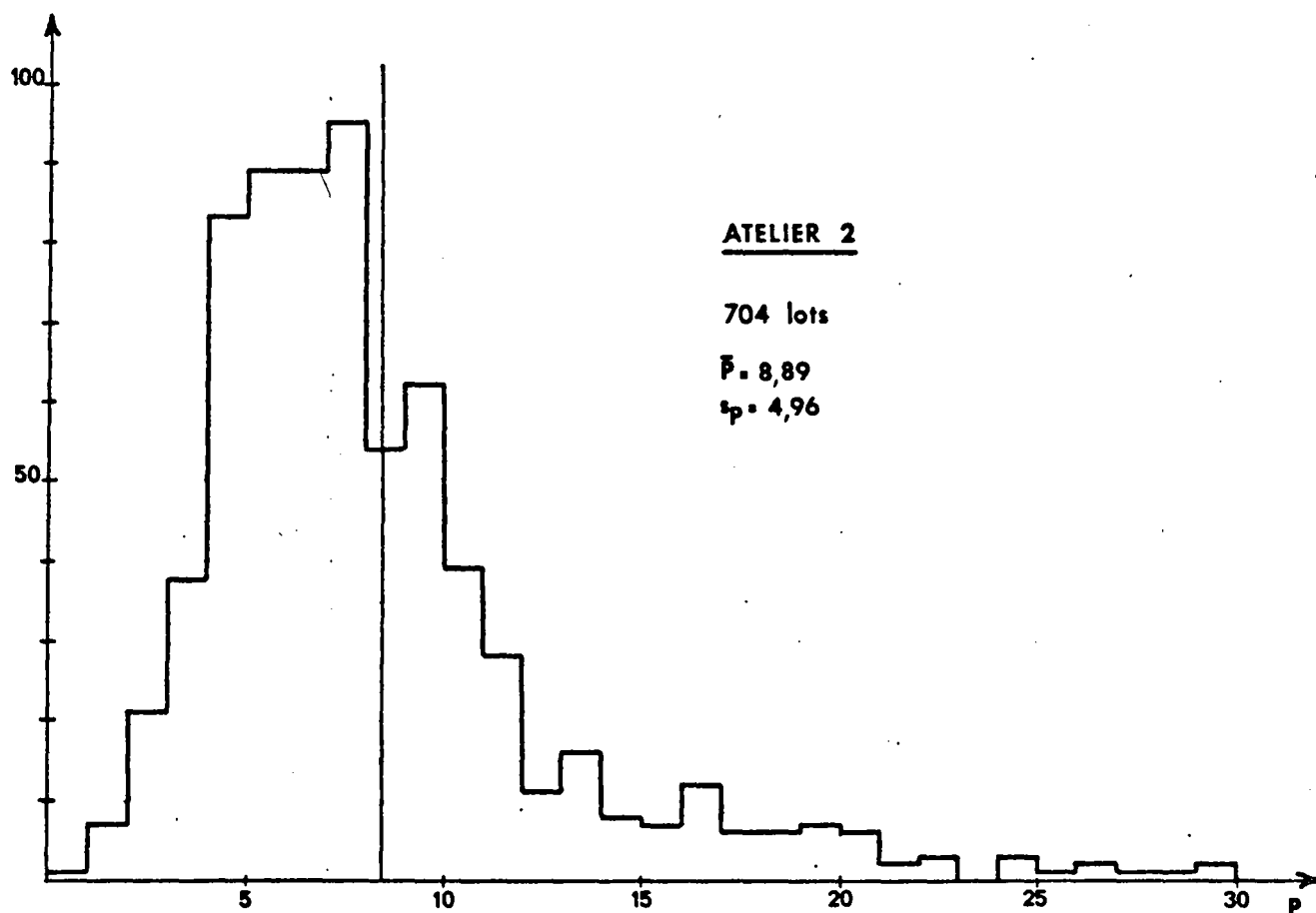
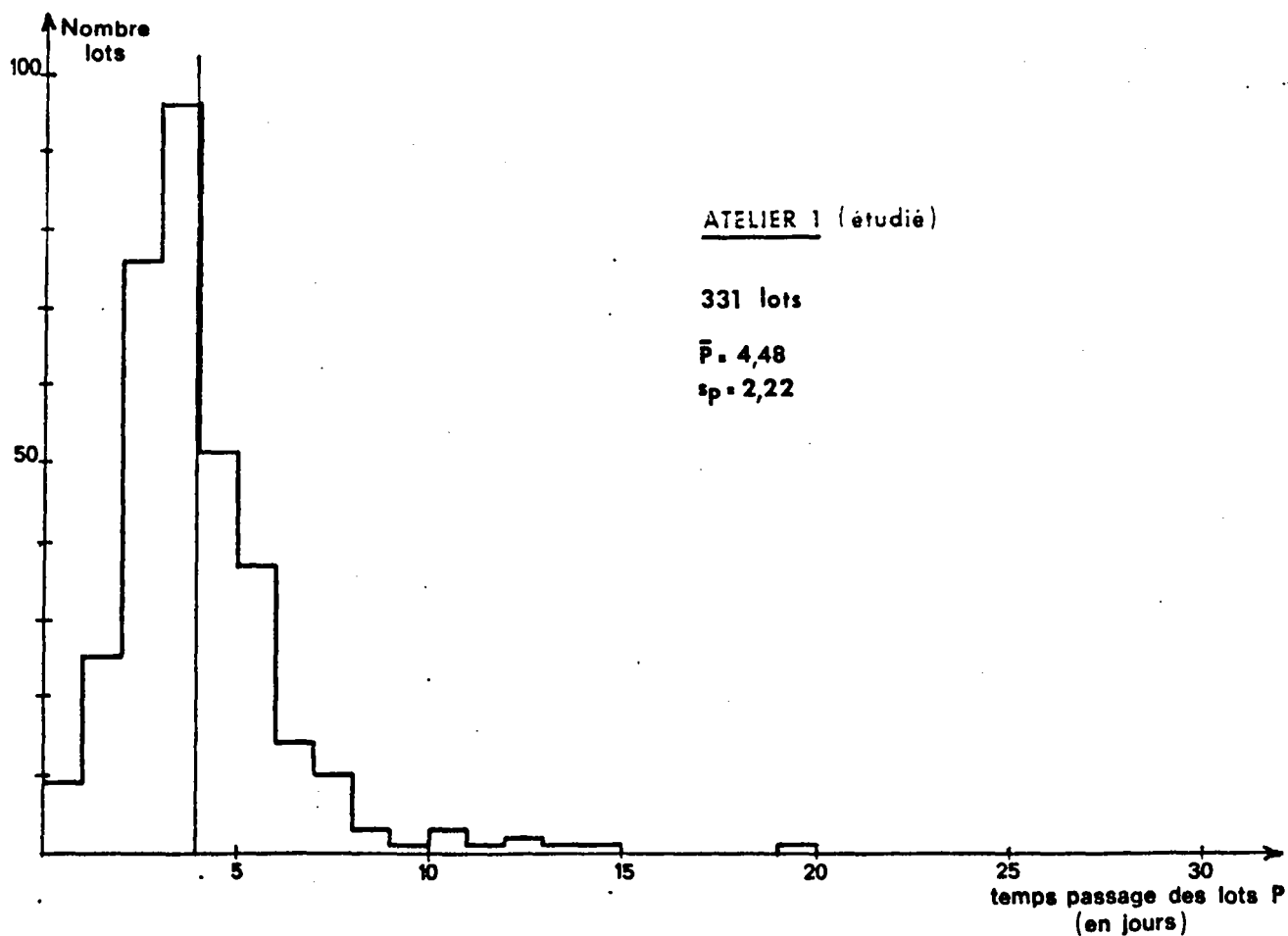


Fig. IV.8. Distribution des temps de passage dans les ateliers de finition.

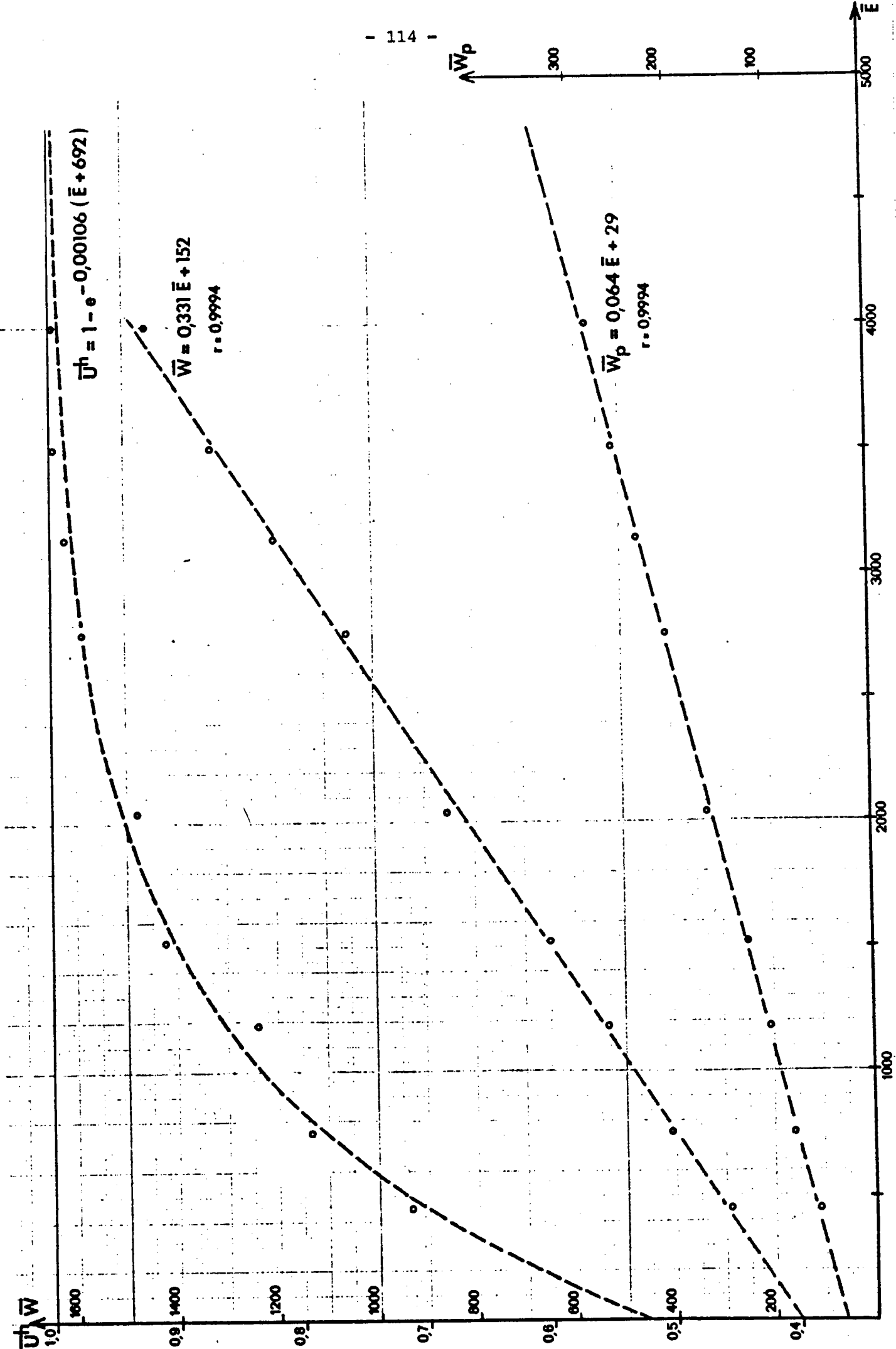


Fig. IV.9. Evolution des paramètres en fonction de l'en-cours total E.
Jeu de données A.

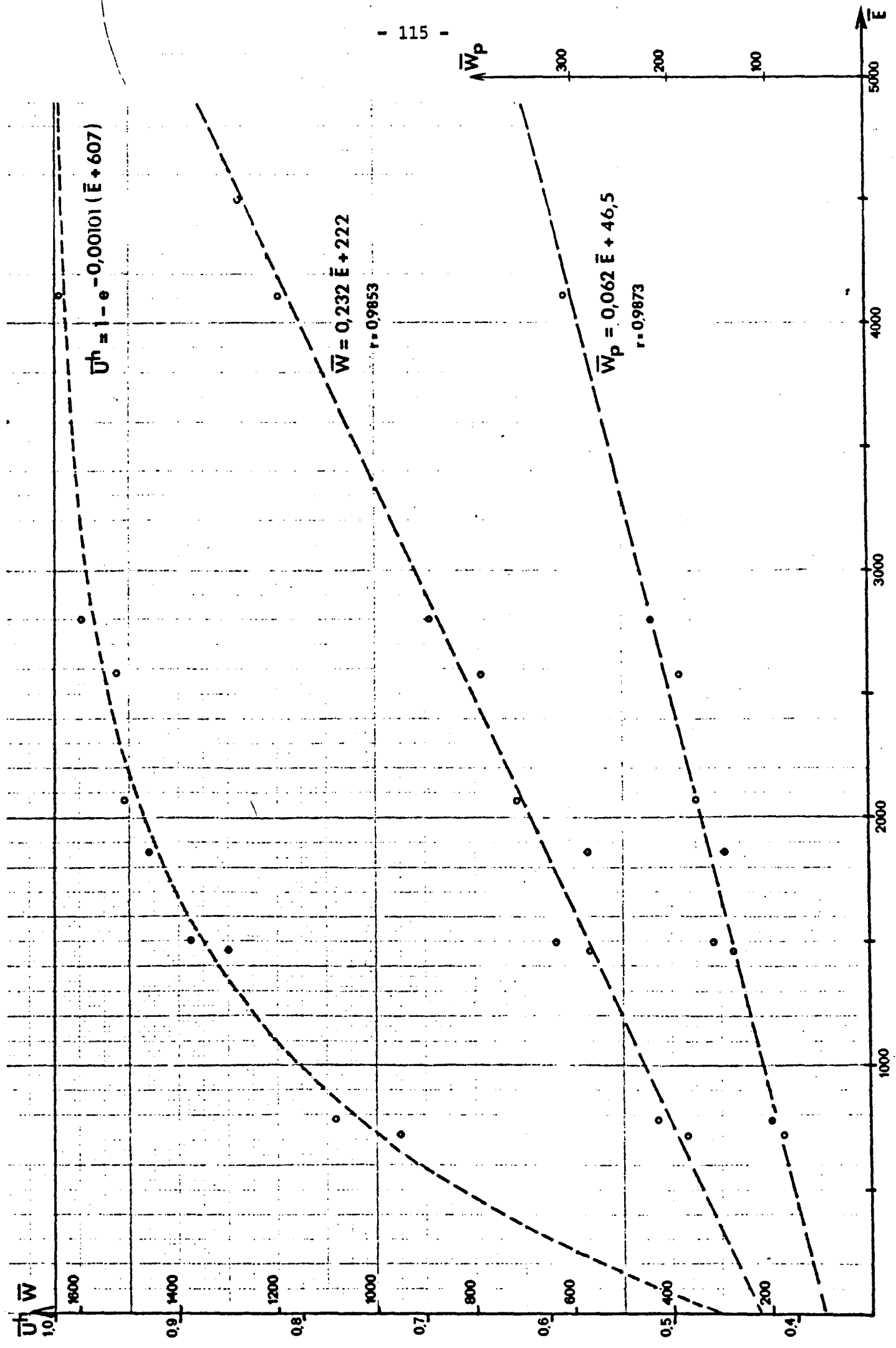


Fig. IV.10. Evolution des paramètres en fonction de l'en-cours total E .
Jeu de données B.

Plusieurs observations peuvent être faites sur l'allure générale des courbes :

1. Il existe une très bonne corrélation (coefficient r voisin de 0,99) entre les temps d'attente moyens et la variable $\bar{E}$. On peut ainsi montrer, partant de cette relation linéaire entre $\bar{E}$ et $\bar{W}$ et de la formule de LITTLE qu'il existe de fait une relation linéaire entre $\bar{E}$ et $\bar{N}$ de la forme :

$$\bar{N} = \alpha \bar{E} + \beta \quad (\text{IV.2})$$

La variation de $\bar{E}$ revient donc bien ici à faire varier le nombre moyen de lots en cours dans l'atelier, ce qui nous permet d'extrapoler la droite pour effectuer la comparaison avec l'existant.

2. En-dessous d'un certain niveau d'en-cours, le taux d'utilisation de l'effectif commence à décroître par le fait des ruptures de charge qui apparaissent sur les postes. La série de points obtenue peut être ajustée à une courbe d'expression :

$$\bar{U}^h = 1 - e^{-a(\bar{E}+b)} \quad (\text{IV.3})$$

3. On peut situer le point de fonctionnement optimal de l'atelier au point de décrochement de $\bar{U}^h$, pour une valeur de $\bar{E}$ égale à 4000 (jeu de données A), c'est-à-dire pour un temps d'attente moyen par lot d'environ 1400 mn, soit 23 h. Dans un fonctionnement en double équipe et en ajoutant le temps opératoire moyen, le temps de passage moyen devient égal à deux jours. L'allure de la courbe de $\bar{U}^h$ montre bien l'intérêt de situer la valeur optimale de $\bar{E}$:

- en effet, au-delà de ce point, l'en-cours supplémentaire ne joue aucun rôle de régulation, il ne contribue seulement qu'à accroître le temps de passage ; on se pénalise donc sur les délais.
- lorsque l'on descend en-dessous de ce point, on se pénalise sur l'activité des personnes par les ruptures d'alimentation des postes de travail.

4. La connaissance du temps moyen d'attente par poste $\bar{W}_p$, pour ce point de fonctionnement, permet un calcul prévisionnel du temps de passage à partir de la gamme opératoire ; ce temps de passage peut alors servir à calculer les indices de priorité.
5. Le temps de passage maximal mesuré est de 2945 mn, soit 49 h, c'est-à-dire moins de 4 jours. On peut montrer, à partir de la valeur de l'écart-type sur $\bar{E}$, en faisant l'hypothèse d'une loi normale (vérifiée sur les mesures de l'existant) que 95 % des lots sortent de l'atelier dans les trois jours ($\bar{P} + 2 s_p = 42$ h).

La comparaison des deux jeux d'essai ne montre pas de différence importante entre l'allure des courbes de $\bar{U}^h$ et $\bar{W}_p$. Seul le temps d'attente total moyen diminue pour le jeu d'essai B, étant donné que le nombre moyen d'opérations est plus faible et que celui-ci est égal au rapport $\bar{W}/\bar{W}_p$:

$$\text{- Jeu A} \quad \frac{\bar{W}}{\bar{W}_p} = 5,17 \quad (\text{pour } 5,15, \text{ cf Fig. IV.5})$$

$$\text{- Jeu B} \quad \frac{\bar{W}}{\bar{W}_p} = 3,90 \quad (\text{pour } 4,42)$$

Notons que la variation du nombre moyen d'opérations par rapport à la valeur initiale pour le jeu B constitue une limite au principe de réinjection des lots dans un réseau fermé puisque les lots ayant les plus courts temps de passage ont tendance à passer plus souvent dans l'atelier.

IV.4.3. Comparaison des performances

Nous montrons par la figure IV.11. l'intérêt d'utiliser le modèle pour améliorer les performances de l'atelier. En effet, comme nous l'avons évoqué précédemment, l'en-cours correspondant à la zone de fonctionnement comprise entre les deux points ne contribue physiquement qu'à rallonger la longueur de chaque file d'attente et n'est pas nécessaire à la régulation des flux.

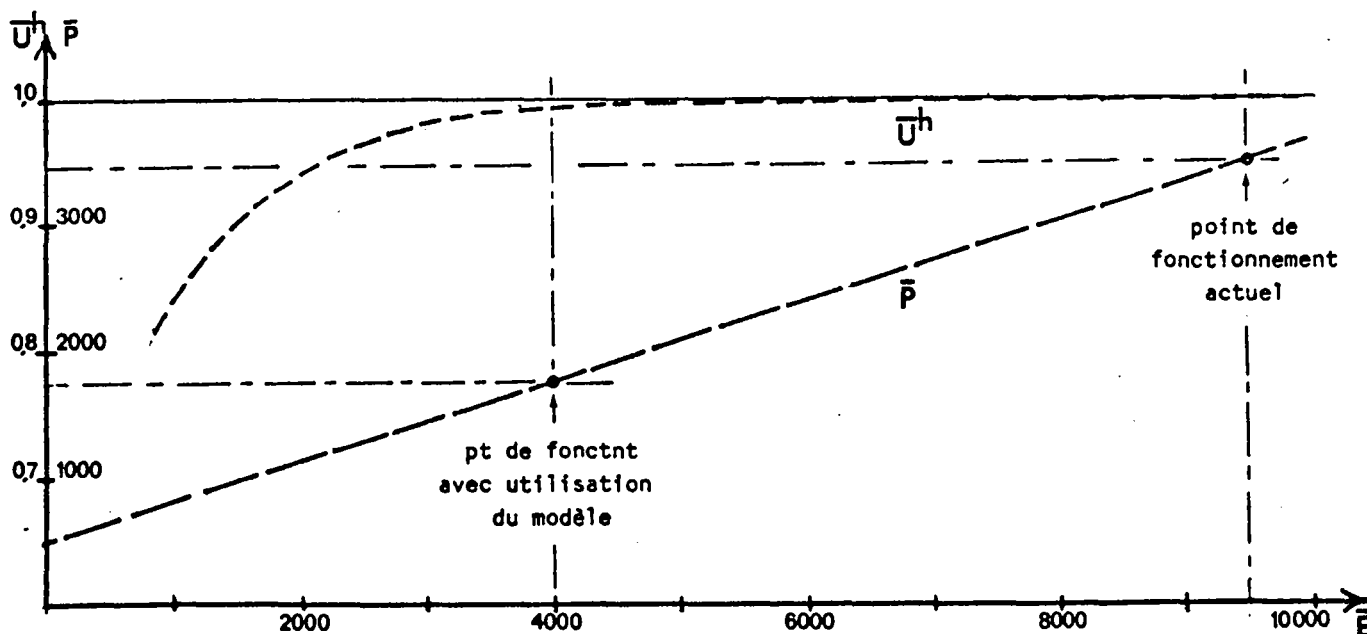


Fig. IV. 11. Comparaison des performances (avec ou sans modèle).

Le délai de passage actuel peut aisément être réduit de la moitié, voire des deux-tiers si l'on tient compte des remarques ci-après :

1. Le point optimal correspondant à $\bar{E} = 4000$ obtenu par simulation peut être déplacé vers la gauche (par translation de la courbe $\bar{U}^h$). En effet, les valeurs locales de $E_{i,t+1}^{obj}$ ont été fixées a priori de façon à couvrir un certain nombre d'heures sur chacun des moyens, sans intégrer la connaissance du procédé liée à la notion d'apprentissage. Il est bien évident, par exemple, que cette valeur peut être réduite pour la fermeture de pointes sans affecter l'activité des personnes puisque la quasi totalité des lots subit de fait cette première opération. Comme les lots injectés dans l'atelier sont immédiatement disponibles pour cette opération en début d'équipe, l'en-cours en fin de période peut être voisin de zéro sur ces postes. Or ce dernier représente dans nos essais près de 45 % de l'en-cours total $\bar{E}$.
2. D'autre part, de par le principe d'affectation des personnes, le comportement de l'atelier doit être amélioré lorsque le nombre de postes et de personnes augmente. Si le régime de production est tel qu'il y a toujours au moins un poste actif par opération aucun lot ne reste plus en attente sur un poste pendant toute une période comme cela pouvait se produire dans nos essais. La dispersion des temps de passage doit ainsi être réduite.

3. Les chiffres apportent également une réponse à une autre question, plus importante d'un point de vue commercial que la mesure directe du délai moyen, et que l'on peut formuler de la façon suivante :

Quel est le délai au-delà duquel on est assuré à 95 % qu'un lot sera sorti ?

Les chiffres sont alors assez parlants puisque ce délai vaut :

Atelier 2	:	19 jours
Atelier 1	:	9 jours
Atelier 1		
+ modèle	:	3 jours

Il est bien évident, d'une part, que les chiffres constatés dans les ateliers peuvent être modifiés par des actions correctives visant à supprimer les lots qui attendent trop longtemps et d'autre part, que les résultats de la simulation se situent dans un cadre déterministe, sans intégrer les retards dus à des raisons techniques (recyclage).

Cependant, l'intérêt d'un outil d'aide à la conduite est précisément d'apporter plus de rigueur dans la gestion des lots et ainsi de mieux cerner les problèmes techniques. La maîtrise d'un procédé de fabrication passe ici essentiellement par la réduction de la dispersion des paramètres de fabrication, tant au niveau des délais qu'au niveau de la qualité.

4. Enfin, un quatrième point mérite d'être évoqué, qui n'apparaît pas dans nos mesures de fonctionnement actuel : ce sont les variations du temps de passage moyen au cours du temps. Dans la mesure où l'on n'exerce pas de contrôle sur le flux d'entrée de l'atelier, les déséquilibres charge/capacité qui peuvent apparaître au cours du temps se traduisent nécessairement par des variations de la quantité de travail en cours et donc par des variations du temps de passage moyen. Lorsque l'on contrôle, au contraire, le flux entrée, les performances atteintes à un moment donné restent plus stables sur une longue période. De plus, les déséquilibres entre charge et capacité sont mis en évidence plus rapidement par un gonflement ou une baisse du stock-tampon et on évite un encombrement éventuel de l'atelier. C'est là un résultat de la décomposition verticale de la procédure qui permet de faire apparaître les problèmes au niveau où ils peuvent être résolus.

IV.5. CONCLUSION

Nous avons montré dans ce chapitre comment la mise en application du modèle sur des jeux d'essai permettait de connaître la réponse qu'il apporte aux trois objectifs fixés au chapitre I, concernant respectivement les en-cours, les délais et l'activité des personnes.

Ces essais ont également montré que les hypothèses qui sous-tendaient la conception du modèle étaient justifiées, en particulier le choix d'une conduite décentralisée puisque même sans ordonnancement au niveau des files, le temps de passage des lots ne varie globalement qu'entre deux et trois jours.

Ayant révélé l'allure des caractéristiques de l'atelier, l'intérêt d'utiliser la méthode est de pouvoir évoluer progressivement de la situation actuelle vers la situation optimale ; la progressivité dans l'abaissement du niveau d'en-cours permettant de résoudre les problèmes adjacents au fur et à mesure de leur apparition.

CONCLUSION GENERALE

Nous présentons dans ces travaux un modèle de conduite dédié à un atelier de bonneterie.

L'ensemble de notre démarche a été guidé par la prise en compte d'un problème industriel concret et des liens avec l'environnement de production.

Une première analyse du système de production nous a permis de caractériser l'atelier de finition et de retenir comme essentiels les principes de fonctionnement suivants :

- Atelier à flot unique (gammes linéaires)
- Equipements surcapacitaires (régulation des flux par les capacités).

ainsi que les objectifs ci-après :

- d'abord une utilisation maximale de l'effectif disponible (personnel polyvalent),
- ensuite une réduction progressive de l'en-cours et un meilleur respect des dates de fin des lots.

Nous avons ensuite analysé les principales méthodes d'ordonnancement en les classant selon la structure du système de décision de manière à choisir un modèle et une méthode capables de s'intégrer dans le système de production existant. En conséquence, nous nous sommes orientés vers une conduite décentralisée et vers l'aide à la décision.

Notre étude se distinguant de la majorité des approches par le fait de gérer les effectifs, la structure du modèle proposée pour répondre au double problème d'ordonnancement et d'affectation se décompose en deux niveaux, un premier niveau de lancement orienté vers les contraintes externes (commerciales) et un second niveau d'affectation dépendant du responsable d'atelier (contraintes internes). Cette décomposition nous a permis en outre de préserver la cohérence entre la procédure de calcul et la structure décisionnelle en place.

Suite aux observations du chapitre II, nous avons également cherché à allier, par le biais d'une procédure de décision multi-critère et interactive, le formalisme d'une méthode au pragmatisme nécessaire à la gestion quotidienne d'un atelier (notamment par la progressivité dans l'atteinte des objectifs).

L'expérimentation du modèle sur micro-calculateur nous a permis, par une simulation de l'atelier réel selon la règle "premier arrivé, premier servi", de :

- caractériser le comportement de l'atelier, en particulier l'évolution du taux d'utilisation de l'effectif en fonction de l'en-cours,
- d'en déduire le point de fonctionnement optimal en cas d'utilisation du modèle et d'estimer les gains de performance (réduction du temps de passage moyen et de sa dispersion).

Dans le cadre de l'implantation d'un système de suivi d'atelier, une expérimentation sur le site industriel devra permettre de valider les résultats obtenus dans un cadre déterministe. En particulier l'analyse de la sensibilité des solutions du modèle aux aléas de fabrication doit permettre d'ajuster localement les niveaux d'en-cours avant d'engager un processus de "tension des flux".

La version actuelle du modèle peut être implantée industriellement à condition de disposer des données transmises par les systèmes de gestion et de suivi d'atelier.

Des améliorations sont cependant réalisables au niveau de l'application elle-même (langage de programmation) ainsi qu'au niveau de l'aide à la décision (possibilité de visualiser graphiquement l'évolution de l'état de l'atelier et mise en évidence des marges de liberté offertes par les solutions du modèle).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MESAROVIC M.D, MACKO D., TAKAHARA Y.,
Theory of hierarchical multilevel systems,
Academic Press, New York, 1970.
- [2] TITLI A.,
Commande hiérarchisée et optimisation des processus complexes
Ed. Dunod, 1975.
- [3] SOENEN R.,
Contribution à l'étude des système de conduite en temps réel en vue de la commande d'unités de fabrication,
Thèse d'Etat, Université des Sciences et Techniques, Lille, 1977.
- [4] CROUHY M.,
La gestion informatique de la production industrielle,
Ed. de l'Usine Nouvelle, 1983.
- [5] BOEBION J., ALMAR A., PUN L.,
Scheduling method synchronizing two lines of activities and minimizing waiting and pass-time,
International Journal of Production Research, vol. 16, n° 4, 1978.
- [6] BELOUIZDAD O.D.,
Contribution à la résolution des problèmes d'ordonnancement de type flot à deux critères,
Thèse de Docteur-Ingénieur, Université P. Sabatier, Toulouse, 1977.
- [7] FAURE R., ROUCAIROL C., TOLLA P.,
Chemins et flots, ordonnancements,
Ed. Gauthier-Villars, 1976.

- [8] LITTLE J.D.C.,
A Proof for the Queuing Formula $L = \lambda W$,
Operations Research, vol. 9, n° 3, 1961.
- [9] ROY B.,
Algèbre moderne et théorie des graphes,
Ed. Dunod, 1970.
- [10] CONWAY R.W., MAXWELL W.L., MILLER L.W.,
Theory of Scheduling,
Addison Wesley, 1967.
- [11] MANNE,
On the Job-shop Scheduling Problem,
Operations Research, vol. 2, 1960.
- [12] ERSCHLER J., ROUBELLAT F., THOMAS V.,
Une approche pour l'ordonnancement en temps réel d'atelier,
Congrès A.F.C.E.T. Automatique, Nantes, 1981.
- [13] ERSCHLER J.,
Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement,
Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1976.
- [14] COUZINET-MERCE C.,
Etude de l'existence de solutions pour certains problèmes d'ordonnancement,
Thèse de docteur-ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse 1979.
- [15] FONTAN G.,
Notions de dominance et son application à l'étude de certains problèmes d'ordonnancement,
Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1980.
- [16] KING J.R.,
Scheduling and the Problem of computational complexity,
Omega, vol. 7, 1979.
- [17] TAKEDA K., SHIMOYASHIRO S., NAKAMURA N., MOROI S.,
A decentralized control method for on-line shop-floor expediting systems,
A.P.M.S. Conference, Bordeaux, 1982.
- [18] JOHNSON S.M.,
Optimal two and three-stage production schedules with set-up times included,
Naval Research Logistics Quarterly, vol. 1, 1954.
- [19] JACKSON J.R.,
An extension of Johnsons's results on Job-lot Scheduling,
Naval Research Logistics Quarterly, vol. 3, 1956.
- [20] PALMER D.S.,
Sequencing jobs through a multi-stage process in a minimum total time, a quick method of obtaining a near optimum,
Operational Research Quarterly, vol. 16, n° 1, 1965.

- [21] CAMPBELL H.G., DUDEK R.A., SMITH M.L.,
A heuristic algorithm for the n-job, m-machine sequencing problem,
Management Science, vol. 16, n° 10, 1970.
- [22] GUPTA J.N.D.,
A functional heuristic algorithm for the flow-shop scheduling problem,
Operational Research Quarterly, vol. 22, n° 1, 1971.
- [23] DUMAS P.,
Méthode d'ordonnancement paramétrique d'un atelier,
Thèse de docteur-ingénieur, Université de Paris VI, 1974.
- [24] MAXWELL W.L.,
State of the art in job-shop sequencing,
Production and Inventory Management, vol. 10, n° 3, 1969.
- [25] NANOT Y.R.,
An experimental investigation and comparative evaluation of priority disciplines in Job-Shop-Like-Queuing Networks,
Management Sciences Research Report, n° 87, 1963.
- [26] CHENG E.T.C.,
A combined approach to due-date scheduling,
A.P.M.S. Conference, Bordeaux, 1982.
- [27] NELSON R.T.,
Labor and machine limited production systems,
Management Science, vol. 13, n° 9, 1967.
- [28] NELSON R.T.,
A simulation of labor efficiency and centralized assignment in a production model,
Management Science, vol. 17, n° 2, 1970.
- [29] ROY B., VINCKE P.,
Multicriteria analysis : Survey and new directions,
European Journal of Operational Research, vol. 8, 1981.
- [30] BEL G.,
Méthodes et langages de simulation pour la production automatisée : principes, choix, utilisation,
Congrès A.F.C.E.T. Automatique, Besançon, 1983.
- [31] LATECOERE L.,
Contribution à l'étude d'un système d'ordonnancement adaptatif dans une entreprise textile,
Thèse de 3e cycle, Université de Bordeaux I, 1975.
- [32] PUN L.,
Des outils pour l'analyse des systèmes industriels d'intelligence artificielle,
Le Nouvel Automatisme, mai 1984.

NOTATIONS UTILISEES

$A/B/C/D$	Notation de CONWAY. Voir page 29.
$a_{k,i}$	Date d'arrivée du lot l_k dans la file d'attente du moyen M_i .
$b_{k,i}$	Indice d'affectation du lot l_k sur le moyen M_i .
C_i	Charge initiale du moyen M_i au cours de la période.
d_k	Durée opératoire totale du lot l_k .
$d_{k,i}$	Durée opératoire du lot l_k sur le moyen M_i .
$d_{k,i,t}^+$	Durée opératoire pour achever le lot l_k sur le moyen M_i à l'instant t .
$d_{k,i,t}^-$	Durée opératoire déjà effectuée sur le lot l_k par le moyen M_i à l'instant t .
e_k	Date d'entrée dans l'atelier du lot l_k .
$e_{k,i}$	Date de début d'opération du lot l_k sur le moyen M_i .
$\bar{E}$	En-cours moyen (valeur moyenne de E_t).
E_t	En-cours total à l'instant t (travail total à effectuer sur les opérations immédiates).

$E_{i,t}$	Quantité de travail en attente devant le moyen M_i à l'instant t .
$E_{i,t}^{obj}$	Objectif d'en-cours en fin de période $t-1$ sur le moyen M_i .
$E_{i,t}$	Ensemble des lots en attente ou en cours sur le moyen M_i à l'instant t .
$f(k)$	Valeur de l'indice de priorité du lot l_k .
F	Quantité totale de travail en-cours dans l'atelier.
F_e	Quantité totale de travail déjà effectuée sur les lots en cours.
F_r	Quantité totale de travail restant à effectuer sur les lots en cours.
$F_{i,t}$	Quantité de travail en attente dans la file du moyen M_i à l'instant t .
$F_{i,t}$	Ensemble des lots présents dans la file d'attente du moyen M_i à l'instant t .
h	Effectif total disponible.
h_m	Effectif total affecté par la solution initiale du modèle S_m .
i	Indice caractérisant un moyen (ainsi que sa file d'attente).
I	Intensité totale de l'atelier (nombre total de postes actifs).
I_i	Intensité du moyen M_i durant la période, obtenue par le modèle.
I_i^f	Intensité du moyen M_i caractérisant la solution finale (admissible).
k	Indice caractérisant un lot.
K_i	Couplage total du moyen M_i avec les moyens avals.
$K_{i,j}$	Couplage entre le moyen M_i et le moyen M_j (défini pour $j > i$).
l_k	Lot d'indice k .
m	Nombre total de moyens (ou files d'attente).
m_i	Nombre de postes appartenant au moyen M_i .
M_i	Moyen d'indice i .
N	Nombre total de lots en cours.
$\bar{N}$	Nombre moyen de lots en cours.
p_k	Temps de passage du lot l_k dans l'atelier.

P	Temps total de passage de l'ensemble des lots à ordonnancer.
$\bar{P}$	Temps de passage moyen des lots.
$P_{i,t}$	Quantité de travail pour achever les lots en cours sur M_i à l'instant t .
$P_{i,t}$	Ensemble des lots en cours d'exécution sur les postes de M_i à l'instant t .
q_i	Nombre de personnes par poste sur le moyen M_i .
R	Retard total de l'ensemble des lots à ordonnancer.
$\bar{R}$	Retard moyen des lots.
s_k	Date de sortie du lot l_k (fin de la dernière opération).
$s_{k,i}$	Date de fin d'exécution du lot l_k sur le moyen M_i .
s_p	Ecart-type sur temps de passage des lots.
s_w	Ecart-type sur temps d'attente des lots.
S_m	Solution d'affectation initiale proposée par le modèle.
S_f	Solution d'affectation finale vérifiant l'admissibilité.
t	Indice caractérisant la période débutant à l'instant t .
$\bar{U}$	Taux moyen d'utilisation des moyens.
U^h	Taux d'utilisation de l'effectif total.
$\bar{U}^h$	Taux moyen d'utilisation de l'effectif total.
U_i^h	Taux d'utilisation de l'effectif sur le moyen M_i .
U_i^{h+}	Taux d'utilisation de l'effectif sur I_{i+1} postes du moyen M_i .
w_k	Temps d'attente total du lot l_k .
$\bar{W}$	Temps moyen d'attente des lots.
X_i	Quantité de travail entrée sur le moyen M_i au cours de la période.
X_i	Ensemble des lots entrant sur le moyen M_i durant la période.
Y	Activité totale de l'atelier durant la période.
Y_i	Activité du moyen M_i (quantité de travail effectuée).
Y_i	Ensemble des lots sortis du moyen M_i durant la période.

Y_i^+	Activité du moyen M_i pour $I_i + 1$ postes.
Y_j^i	Activité du moyen M_j pour $I_i - 1$ postes sur le moyen M_i .
δ_h	Ecart entre effectif disponible et effectif calculé par le modèle.
δ_ϕ	Terme de correction du flux d'entrée.
λ	Taux d'arrivée des lots.
ϕ_e	Flux d'entrée dans l'atelier, exprimé en quantité de travail.
Φ_e	Ensemble des lots entrant dans l'atelier.
θ	Durée de la période.

