

48/330

Sc N 78/921A

PLANIFICATION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

Application à l'ordonnancement
de chaînes de travaux dans l'industrie
et dans les ateliers



095 046362 1



THÈSE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

Soutenu devant le JURY, le 25 octobre 1978

par

Jacques BERNAD

et Marko PAKER

JURY

M. DEPAIX Président

M. DERNIAME Examineur

M. FOURMENTIN . . Examineur

Nom des Etudiants : BERNAD Jacques
PAKER Marko

Nature de la thèse : Doctorat d'Université



VU APPROUVE et PERMIS D'IMPRIMER

NANCY, le

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I

Nous remercions :

M. Gérard LEVAILLANT qui nous a incités par les réflexions et les recherches qu'il nous a exposées en 1974 à entreprendre ce travail et qui l'a souvent enrichi au cours de nombreuses discussions.

M. Ernest PETRI, dont le souci d'aller au fond des problèmes et de ne jamais oublier les aspects concrets de l'application nous a été très précieux.

M. Jean FOURMENTIN qui a bien voulu nous faciliter de manière pratique les essais que nécessitait notre recherche.

Nous remercions Messieurs DEPAIX
DERNIAME
FOURMENTIN

qui ont bien voulu nous faire l'honneur de composer le JURY

Qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance.

Nous remercions Monsieur DEPAIX, doyen de la Faculté des Sciences, de l'aide qu'il nous a apportée à l'élaboration de cette thèse.

Nous le remercions également des nombreux et précieux conseils qu'il a su nous donner dans le cadre de nos activités professionnelles.

PLANIFICATION ASSISTEE

par ordinateur

Application à l'ordonnancement
de chaînes de travaux dans l'industrie
et dans les ateliers.



THESE

pour l'obtention du titre de .

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

JURY
M. DEPAIX Président
M. DERNIAME Examineur
M. FOURMENTIN Examineur

Soutenu devant le JURY, le 25 octobre 1978

par

Jacques BERNAD
et Marko PAKER

P L A N

	<u>Page</u>	<u>Page</u>
1 - INTRODUCTION	1	
2 - IMPORTANCE DE LA PLANIFICATION		4
3 - DELIMITATION DU PROBLEME		7
3,1 - Objet du présent mémoire		7
3,2 - Autres types de planification		7
3,21 - Typologie des commandes		7
. uniques ou renouvelables		
. datées ou programmées		
. de pièces ou d'assemblages		
3,22 - Fabrication en série de pièces élémentaires		9
3,23 - Assemblage d'un ouvrage unique		9
3,24 - Assemblage en série		9
3,25 - Flux divergents		10
- Flux continus, réseaux maillés		
4 - DEFINITION DES TERMES UTILISES	11	
4,1 - Poste, famille, machines préférentielles		11
4,2 - Commandes, carnet, opérations, gammes		11
4,3 - Opérations interrompues, bloquées, commandes bloquées		12
4,4 - Début au plus tôt, fin au plus tard d'une commande		12
4,5 - Marge libre d'une commande		12
4,6 - Début au plus tôt, et au plus tard, de chaque opération		13
4,7 - Marge libre des opérations		14
4,8 - Jour de début obligé J.O.		15
4,9 - Temps d'exécution, intervalle de manutention		15
4,10 - Chevauchement		16
4,11 - Horaires d'activité des postes de travail		16
4,12 - Masques horaires		17
4,13 - Coefficient d'utilisation des postes de travail		18
4,14 - Différents états d'une opération : bloquée, différée, disponible...		18
4,15 - Planification, planning		19
4,16 - Chargement - Déchargement - Modes de placement		21
5 - DIFFICULTES DU PLANNING D'ATELIER	22	
5,1 - Absence de doctrine claire		22
5,2 - Fluctuations des politiques de planning		24
5,3 - Rapidité nécessaire des réponses aux perturbations		25
5,4 - Grande variété nécessaire du système guidant		25
5,5 - Absence de nécessité physique d'une planification.		25

.../...

	<u>Page</u>	<u>Page</u>
6 - DISPOSITIFS HABITUELS DE PLANNING D'ATELIER	26	
6,1 - Délai de réponse court - Traitement simple		26
6,11 - Absence de support matériel		26
6,12 - Dispositifs "manuels"		27
6,2 - Dispositifs informatiques		34
6,21 - Logiciels standards		34
6,22 - Matériel spécialisé		35
6,23 - Caractères communs		35
6,3 - Conclusions		36
6,31 - Moyens existants		36
6,32 - Recherche d'un moyen nouveau		36
7 - PRESENTATION GENERALE DE L'OUTIL ELABORE	37	
7,1 - Pour la recherche et la formation		37
7,2 - Pour l'exploitation		38
7,3 - Organisation générale		39
8 - PROBLEMES EXAMINES DANS L'ETUDE DE LA PLANIFICATION ASSISTEE	40	
8,1 - Les 2 types d'algorithmes de chargement		40
8,2 - Algorithme du premier type : Recherche des opérations disponibles par les postes de travail disponibles		42
8,21 - Première voie, systématique		42
8,22 - Seconde voie "heuristique"		43
8,3 - Algorithme du second type : Placement par commande sur les postes de travail		44
8,31 - Ordre de priorité des commandes entre elles		44
8,311 - Méthode générale		44
8,312 - Recherche d'une loi de répartition des trous, dans un planning		46
8,313 - Calcul de la latitude moyenne de placement nécessaire au placement d'une opération		57
8,314 - Calcul d'un ordre de priorité d'une commande		59

	<u>Page</u>	<u>Pag</u>
8,32 - Modes de placement d'une commande		61
8,321 - Présentation générale		61
8,322 - Mode régressif		61
8,323 - Mode progressif		66
8,324 - Mode "regresso progressif"		69
8,325 - Mode quelconque (dit "manuel") et utilisation combinée des différents modes		70
9 - ESSAIS EXECUTES ET RESULTATS	72	
9,1 - Plan général et aspect itératif des essais effectués		72
9,2 - Choix des critères de jugement de la qualité des placements		74
9,3 - Génération des jeux d'essais		75
9,4 - Influence des priorités de placement		80
9,5 - Influence des modes de placement		81
9,6 - Influence du taux de charge des machines		83
9,7 - Influence de la constitution du carnet de commande		85
9,8 - Influence de la structure du parc machines (familles)		93
9,9 - Influence de possibilité de faire des heures supplémentaires		94
9,10 - Variation des durées de traitement		95
10 - ENSEIGNEMENTS TIRES DES ESSAIS VOIES DE POURSUITE DES RECHERCHES	97	

DOCUMENTS ANNEXES AU MEMOIRE

- A1 . Description générale des principaux programmes existants.
- A2 . Examen critique du programme "CAPOSS".
- A3 . Présentation détaillée de l'outil utilisé.
- A4 . Mode de placement manuel - Ordinogramme du traitement.
- A5 . Tri d'un carnet de commande pour son examen par le planificateur en vue de fixer les priorités de placement.

La planification dans l'Industrie

1 - INTRODUCTION

Planifier
c'est une
nécessité

Dans une entreprise industrielle, des travaux de nature variée (production, études, entretien-construction etc...) sont à effectuer, il faut les placer dans le temps en fonction de la date désirée pour leur réalisation, et des moyens à mobiliser pour les réaliser.

Ces moyens sont constitués en général d'équipements, de matériels d'une part, et de personnel et d'énergie d'autre part. Avec ces moyens, il faut aussi mobiliser les matières nécessaires à l'exécution du travail.

Dès que des travaux différents sont à exécuter de façon discontinue, dès que pour effectuer plusieurs travaux, on doit employer un même moyen ou que l'on dispose de plusieurs moyens pour effectuer un volume de travaux identiques, il faut exécuter successivement ces travaux, donc en faire le placement dans le temps.

Ce placement, inévitable, peut être improvisé ou raisonné. S'il est raisonné, il consiste à placer dans le temps un ensemble de travaux et à leur affecter un ensemble de moyens.

On a donc un ensemble de travaux (connus ou attendus, définis ou non, à l'instant où l'on veut faire un placement dans le temps) à affecter à un ensemble de moyens (disponibles ou non, de capacité fixe ou variable ou même aléatoire).

La planification est difficile :

- parce que l'on ne dispose pas toujours au moment où l'on veut planifier des informations nécessaires :

- . sur la nature et le délai du travail
- . sur la disponibilité des moyens à mobiliser

- parce que parfois l'on ignore le mode opératoire pour exécuter le travail et, par conséquent, la durée de ce travail

d'où une incertitude sur l'occupation des moyens.

Beaucoup de ces manques d'information ne sont levés (totallement ou partiellement) que peu avant le début de l'exécution.

.../...

Il en résulte la nécessité, suivant les cas réellement traités, d'une souplesse et d'une rapidité de réaction pour améliorer ou seulement obtenir un "gouvernement" de ce flux des travaux. Pour gouverner, il faut prévoir, donc modéliser ce flux de travaux. Encore faut-il que ce modèle soit adaptable et corrigible en temps utile.

Dans l'état actuel des expériences et des connaissances, il n'existe pas de méthode universelle capable de régler tous les problèmes dans les cas de figure posés par la planification. Cette remarque prend toute sa valeur si on tient compte du fait qu'il faut obtenir les éléments de planification en "temps utile".

En effet, le fait qu'un algorithme ou une méthode soit conceptuellement possible ne signifie pas que le temps de traitement de cet algorithme, même avec un ordinateur soit assez court pour que les résultats obtenus conservent quelque intérêt pour celui qui planifie. Le délai de réponse est alors tel que la situation des travaux réalisés entre le moment où le planning a été mis en route et celui où les résultats arrivent a très profondément changé et que tout ou presque est à recommencer.

Sens de la
recherche :
l'assistance
au planifi-
cateur

Le travail que nous présentons s'applique à un domaine de planification que nous spécifions plus loin. Il s'attache à donner au planificateur les moyens de mieux construire en temps utile un planning atteignant les objectifs qu'il se fixe ou qui lui sont fixés. Il ne s'agit jamais de se substituer au planificateur et d'obtenir une automatisation de son travail mais de lui permettre d'effectuer à sa convenance une partie délicate ou fastidieuse de sa tâche en lui laissant à tout instant la maîtrise et, partant, la responsabilité de l'ensemble de la planification, ce qui implique fondamentalement le caractère conversationnel de la méthode employée par l'homme avec la machine mise à sa disposition.

Ce souci d'assistance à l'homme chargé d'une tâche n'est pas seulement un souci d'ordre humain. Il correspond à la prise de conscience que devant un système complexe à gouverner, il faut comme l'ont montré depuis longtemps les cybernéticiens que le système gouvernant soit d'une "variété" au moins égale à celle du système gouverné. C'est la loi d'Ashby. De ce fait, la façon la plus commode et la plus efficace d'obtenir un système gouvernant d'une variété suffisante est de prendre un système homme-machines. Grâce aux capacités de l'être humain, un tel système est plus riche et plus facile à mettre au point qu'un système strictement automatisé et déterminé qui devrait prendre en compte dès sa conception tous les événements et toutes les conditions possibles.

L'expérience acquise par un système homme-machine permet, d'après ce que nous constatons, un progrès plus rapide pour adapter le système au problème posé, par le fait que le système, moins complexe sur le plan machine, est plus aisément modifiable.

.../...

On peut changer ou avoir des hommes différents pour conduire ce système et partant bénéficier des idées et des réactions d'un beaucoup plus grand nombre d'éléments humains que tout système mécanisé prédéterminé.

En restant au stade d'un travail strictement manuel on empêche le planificateur, vu la longueur des manipulations de nombreuses données et les risques d'erreur de manipulation qui y sont attachés, de faire les essais ou les recherches d'une planification réfléchie. Il se tiendra souvent à la première solution trouvée et renoncera à en éliminer la plupart des défauts.

En partant dans un projet de planning complètement prédéterminé, on a toute chance de bâtir un système complexe et lourd à manier, qui ne pourra tenir compte de toutes les contraintes découvertes après sa conception et qui, vu son volume et sa complexité arrivera souvent trop tard pour être efficace.

C'est pourquoi les méthodes et les dispositifs étudiés dans ce mémoire sont fondés sur un "système homme-machine" où l'homme peut converser avec la machine qui l'assiste dans un certain nombre de tâches.

Avec un tel système, nous visons trois buts :

- 1) disposer d'un outil de recherche et de mise au point en matière de planification
- 2) disposer d'un outil de formation pour les personnes devant effectuer des plannings
- 3) disposer d'un outil d'exploitation destiné à faire effectivement des plannings utilisés par un atelier.

.../...

2 - IMPORTANCE DE LA PLANIFICATION

De façon générale, la planification des travaux est importante et nécessaire, qu'il s'agisse de travaux effectués dans un atelier, (travaux d'usinage, de montage ou de réparation) ou qu'il s'agisse de travaux effectués dans des usines ou des bureaux.

Nous analyserons cette importance spécialement dans le cas d'un atelier. Car c'est dans ce domaine plus précis que l'étude et la recherche ont été conduits.

Vis-à-vis de ses "clients", même si ces derniers appartiennent au même groupe industriel ou à la même entreprise, l'atelier doit effectuer un travail à une date donnée : cette date donne le délai dont il faut convenir avec le client et qui sera à respecter.

Il faut donc que ce travail soit exécutable avant le délai convenu et donc entrepris assez tôt pour être réellement exécuté.

Il faut donc prévoir cette exécution dans le temps et en fonction des moyens et des matières à mettre en oeuvre.

Cette prévision est facile et quasi immédiate à faire :

- s'il n'y a qu'un travail à exécuter,
- et si les moyens à mobiliser existent déjà et sont tous complètement disponibles.

Mais très généralement, il faut concilier :

- la prévision du délai et la prévision conjointe de l'exécution avec les prévisions (de délai et d'exécution) d'autres travaux.

D'où l'obligation, la nécessité de procéder à un rangement dans le temps de ces travaux et des différentes tâches les constituant les unes par rapport aux autres.

Ce rangement (que l'on appelle ordonnancement) implique l'affectation de chaque tâche à un poste de travail convenable pour qu'elle y soit exécutable, et la détermination d'une date et d'une durée donnée pour qu'elle soit exécutée le moment voulu.

L'affectation à un poste de travail veut dire qu'on fixe les moyens matériels (machines, outillage) pour faire ce travail, mais aussi qu'un exécutant compétent sera disponible.

A cela s'ajoute que la mobilisation de la matière nécessaire à cette tâche soit effectuée en temps utile, en principe au plus tard au moment où cette matière devra intervenir ou sera consommée.

Les durées de déplacement ou de transfert de poste à poste doivent être connues et prises en compte par la planification.

Même si l'on ne dispose pas, à l'échelon de l'atelier, d'une planification réfléchie et diffusée, il est certain que les actions destinées à la réalisation de la tâche doivent être accomplies. Elles peuvent l'être à contre temps.

L'absence de réalisation de certaines d'entre elles (approvisionnement des matières, absence de l'exécutant, poste ou machine indisponible, etc) empêche l'exécution du travail prévu.

Dans l'atelier, le fait qu'une de ces actions soit différée ou impossible et retarde la réalisation de la tâche a des conséquences fâcheuses.

Ces conséquences se manifestent :

- vis-à-vis du "client" : celui-ci n'aura pas la tâche exécutée (ou le produit attendu) livrée au moment demandé ;
- vis-à-vis de l'atelier lui-même, il y aura sous emploi des capacités de production c'est-à-dire des machines et des ouvriers qui les font marcher.

En d'autres termes :

- les exécutants devront être payés, pour ne rien faire,
- les machines inoccupées ne pouvant produire, n'amortiront pas les investissements consentis pour elles.

Très généralement, on constate :

- que les dérèglements et les retards dus à l'inorganisation ou au manque de planification se répercutent de commande en commande,
- que l'atelier se trouve toujours et de façon chronique en retard par rapport à ses prévisions et à ses délais,
- que les travaux commencés s'accumulent et encombrent les allées de l'atelier et les abords des postes de travail.

Ce qui entraîne des gênes dans l'exécution des manutentions, des recherches de pièces, des manutentions supplémentaires, des pertes de temps dans l'exécution même des travaux par l'exécutant (modes opératoires plus lents et plus compliqués).

Sur le plan financier, l'accumulation des travaux commencés et non achevés se traduit par une augmentation des "en cours", c'est-à-dire par une charge financière, car tout travail non terminé, tout produit inachevé ne peut être vendu, la "valeur ajoutée" apportée par l'atelier ne peut se traduire par une rentrée d'argent.

.../...

On constate enfin que l'incidence des désordres résultant d'une absence ou d'une carence de planification est importante sur le plan humain :

Perte de confiance des clients mais aussi mauvaise ambiance chez les exécutants et souvent aussi chez les responsables (débordés, surchargés, et... inefficaces).

Les exécutants souvent se laissent aller et la négligence apparaît avec la mauvaise qualité qui en résulte sur le produit ou le travail vendu.

Au gâchis des matières s'ajoutent les temps perdus et la mauvaise activité du personnel.

L'esprit de négligence conduit souvent à l'entretien plus ou moins défectueux des matériels et des machines utilisés dans l'atelier. Les accidents matériels et corporels se multiplient et à l'insatisfaction des "clients" s'ajoute celle des gestionnaires et des exécutants eux-mêmes.

Dans nos visites d'entreprises, nous avons pu remarquer que l'action menée sur le plan social s'appuyait fondamentalement sur le bon ordre et la bonne gestion des ateliers. Une planification effectivement conduite et tenue était alors à la base de ce bon ordre et de cette bonne gestion.

En effet, elle permet :

- la prévision en temps utile

(pas trop tôt, ni trop tard)

- . des matières nécessaires, de leur approvisionnement et de leur livraison,
- . du personnel de la qualification convenable,
- . et de son affectation à un poste sur un travail de la date à laquelle le travail ou le produit sera livré (donc du délai accepté ou imposé).

.../...

3 - DELIMITATION DU PROBLEME

3,1 - Objet du présent mémoire

Le présent mémoire a pour objet la planification de travaux d'ateliers, constitués par des commandes émises par des clients extérieurs.

Ces commandes portent sur un ou des objets suivant une suite unifilaire d'opérations de traitement. Nous excluons de notre étude le placement des travaux qui seraient effectués simultanément sur des objets similaires ou des sous-ensembles de ces objets, à des postes de travail ou des machines identiques. (Cependant des "chevauchements" comme définis plus loin § 4,10 sont admis pour deux opérations consécutives). Nous excluons donc les réseaux PERT ou MULTIPERT.

Ces commandes sont reçues à des dates aléatoires, portent sur des quantités aléatoires également et sur des objets connus ou non à l'avance. Elles sont, très généralement à livrer en une seule fois et ne sont pas automatiquement renouvelables.

Ce type de fonctionnement est très fréquent dans l'industrie : ateliers de mécanique générale, de chaudronnerie, d'entretien, bureaux d'études ...

Mais il existe d'autres types de fonctionnement, posant des problèmes de planification qui ne sont pas abordés ici :

3,2 - Autres types de planification

3,21 - Typologie des commandes

Pour en apercevoir la diversité, on peut en établir une classification en analysant certains caractères des commandes reçues par les centres de production.

- Commandes uniques ou renouvelables

- . Nous appelons commande unique, celle qui porte sur un objet (ou un lot d'objets identiques) défini par la commande, et qui a une probabilité nulle ou faible d'être renouvelée sans variation.

Par exemple : une commande d'usine complète, un lot de pièces spéciales de rechange pour une horloge de cathédrale ...

On ne peut lancer la production qu'après réception de la commande.

- . Une commande répétitive est celle dont on peut prévoir, lorsqu'on la reçoit, qu'elle sera reçue à nouveau dans l'avenir.

- Commandes datées ou programmées

- . Nous appelons commande datée celle qui est à livrer en 1 seule fois, à date précisée.

S'il y a une nouvelle commande ultérieure, le centre de production ne peut en prévoir la date.

Par exemple : commande de réparation de carrosserie automobile, faite à un garage.

Là encore, on ne peut sans risque lancer l'exécution avant d'avoir reçu une commande ferme.

- . Une commande programmée est, a contrario, celle dans laquelle une série de quantités et de dates de livraisons successives ont été fixées à l'avance au centre de production.

Par exemple : livraison de pièces de fabrication pour l'automobile.

On peut lancer des fabrications par anticipation en fonction des programmes prévisionnels.

- Commandes de pièces élémentaires ou d'assemblages

- . Dans une commande d'assemblage, le centre de production doit fabriquer diverses pièces (ou lots de pièces) puis les assembler, pour livrer un sous-ensemble ou un produit fini. Il doit pour cela coordonner les fabrications des pièces élémentaires pour qu'elles arrivent toutes, en temps utile, au montage.
- . Dans une commande de pièces élémentaires, chacune des pièces (ou lots de pièces) peut être fabriquée indépendamment des autres.

- Combinaisons

- . Ces différents caractères des commandes se combinent selon le tableau suivant, où les symboles sont :

(Unique = U (Datée = D (Elémentaire = E
(Renouvelable = R (Programmée = P (Assemblage = A

REP	OBJET	LIVRAISON	COCR-DIN.	Exemples de production
1	U	D	E	Pièces élémentaires de mécanique générale
2	R	D	E	Fabrications suivies de pièces de mécanique
3	U	P	E	Fab. unitaire avec livraisons échelonnées
4	R	P	E	Fab. de pièces de séries : boulons, ressorts ...
5	U	D	A	Navire, pont, immeuble
6	R	D	A	Montage suivi, en mécanique, chaudronnerie ...
7	U	P	A	Montages unitaires, avec livraisons échelonnées
8	R	P	A	Montage de série : auto, radio, télévision ...

- . Les problèmes de planification dont se préoccupe le présent mémoire correspondent aux repères : 1,2,3 et partiellement 6 et 7; les problèmes sont essentiellement :

- la pleine utilisation des capacités de production des postes de travail
- la prévision et le respect des délais d'exécution des commandes
- la réduction des en-cours de fabrication
- la rapidité de réaction aux aléas extérieurs et intérieurs
- l'amélioration de la productivité (qualité, temps d'exécution).

- Disons quelques mots des problèmes posés par les autres types de production.

3,22 - (Type 4 ci-dessus) : fabrications de pièces unitaires de série : boulons, pièces décolletées, embouties etc...

Compte tenu de l'évolution statistique de très nombreuses ventes unitaires, un service commercial interne fixe périodiquement pour plusieurs mois un programme de production, alimentant un stock de pièces finies, sur lequel sont prélevées les pièces vendues.

Les principaux problèmes de planification posés par ce type de fonctionnement sont dans :

- l'exactitude des prévisions commerciales
- l'équilibrage des capacités des différents postes de production entre eux
- l'adaptation progressive de ces capacités à l'évolution des programmes de production
- la gestion des stocks de matières premières et de pièces finies
- la rapidité de réaction aux erreurs de prévision, et aux aléas intérieurs.

3,23 - (Type 5 ci-dessus) : assemblage d'un ouvrage unique

Par exemple, construction d'un navire, d'une usine, d'un pont ...

L'ouvrage débute et doit être terminé à des dates fixées à l'avance. Les moyens mis en oeuvre peuvent être très variables en qualité et quantité pendant le déroulement du projet.

Les problèmes principaux de planification que pose ce type d'activité sont :

- la détermination des séquences opératoires, des matières et moyens à utiliser, des durées d'opérations et contraintes de succession des différentes opérations
 - le lissage des quantités de moyens utilisés
 - la réduction du délai de fin d'ouvrage
 - la rapidité de réaction aux perturbations d'exécution.
- . Les techniques de planning les plus couramment utilisées dans ce cas sont celles du "chemin critique" (PERT, CPM, Potentiel).

3,24 - (Type 8 ci-dessus) : montage de série

Comme dans le type 4 (fabrication de pièces de séries) un service commercial fixe périodiquement des programmes de montage couvrant plusieurs séries.

Les problèmes de planification sont les mêmes que pour le type (4) mais s'y ajoutent ceux de gestion de nomenclature des ensembles, de coordination des fabrications des pièces élémentaires s'assemblant entre elles, pour constituer les sous-ensembles, puis les produits finis : cette coordination doit éviter à la fois les trop longues durées de stockage de pièces élémentaires et les ruptures de stock paralysant le montage.

.../...

Très fréquemment, l'insertion de modifications de formes ou dimensions des pièces, qui participent à un assemblage, vient compliquer ces problèmes qui sont parmi les plus délicats à résoudre, en planification mécanique.

Nous n'avons abordé, ci-avant, que les principaux types de planifications rencontrées en production d'objets discrets. D'autres types existent encore, justiciables de dispositifs particuliers.

Par exemple :

3,25 - Planification de flux divergents : (aciéries, teintureries de fils).

A l'inverse de l'assemblage, une matière première unique : (Brame ou fil) peut donner des produits finis divers : tôles de diverses largeurs, fils de toutes nuances, etc...

3,26 - Planification de flux continus dans des réseaux maillés (chimie, pétro-chimie, cokeries, transports ...)

La succession des opérations de production subie par un lot à traiter peut être changée en divers points du traitement.

Des méthodes de modélisation et simulation sont parfois employées pour planifier ces types d'activités.

Le lecteur doit donc bien avoir présent à l'esprit que l'objet de notre travail s'applique à un cas particulier de planification rencontré certes très fréquemment, mais qui ne saurait prétendre à l'universalité.

4 - DEFINITION DES TERMES UTILISES

Nous définissons ci-après diverses notions, qui seront fréquemment utilisées :

4,1 - Poste de travail - Famille de postes, machines préférentielles

L'atelier à planifier est constitué d'un ensemble stable de postes de travail (par exemple : 5 tours, 3 étaux-limeur, 6 postes d'ajusteur, 2 d'électricien, ...).

Chacun de ces postes est spécialisé dans un type de travail donné. Toutefois, plusieurs postes peuvent faire éventuellement un même type de travail : cela constitue une "famille" (par exemple la famille des tours).

Dans une même famille certaines machines appelées "machines préférentielles" sont plus performantes que d'autres : on essaiera de les utiliser d'abord : ce n'est que si elles sont trop chargées qu'on fera réaliser le travail sur d'autres machines moins productives de la même famille.

Au total, on appelle "famille de poste" la liste des machines pouvant exécuter les mêmes types d'opérations, classées dans l'ordre décroissant de productivité.

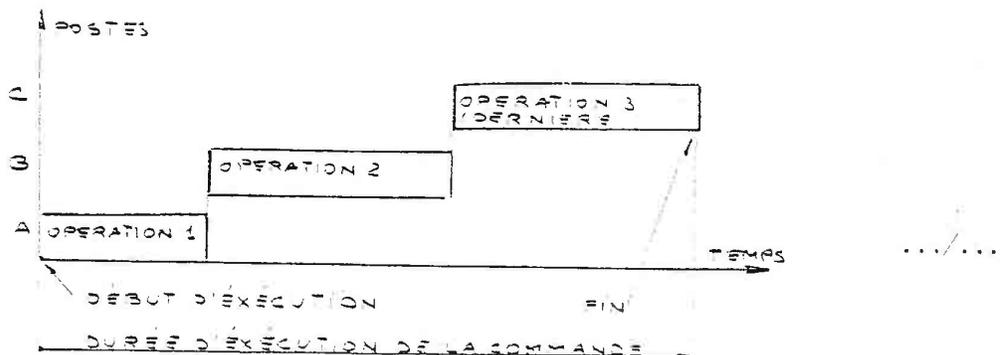
4,2 - Commandes, carnet de commandes en cours, opérations, gammes d'opérations

L'atelier reçoit un flux constamment renouvelé de commandes, venant de clients extérieurs. L'ensemble des commandes reçues, dont l'exécution n'est pas terminée (à l'exception des commandes bloquées, qu'on définit plus loin), constitue le carnet de commandes. Chaque commande porte sur la fabrication (ou la réparation) d'un lot de pièces identiques, obtenue par la réalisation d'une suite ordonnée d'opérations sur les divers postes de travail : cette suite est appelée "gamme d'opérations".

Chaque poste de travail ne peut réaliser en même temps qu'une seule opération.

La réalisation d'une commande de 3 opérations sur 3 postes (A, B, C) successifs peut se représenter comme suit :

Fig. 1



4,3 - Opérations interrompues, bloquées - Commandes bloquées

En cours d'exécution, une opération peut être :

- interrompue volontairement par l'agent de lancement, pour laisser place à l'exécution d'une opération d'une autre commande plus urgente, par exemple. L'opération interrompue sera reprise, sur un poste de travail de la même famille, à une date déterminée au mieux par l'agent de planning, aidé ou non par l'algorithme de placement automatique
- bloquée, jusqu'à une date indéterminée (par une rupture d'outil, une panne de poste de travail, ... par exemple). La commande correspondante est, dans ce cas, retirée du carnet de commande en cours, et placée dans une liste spéciale "commandes bloquées" jusqu'à ce que l'on connaisse la date de reprise possible du travail.

Pour toute opération interrompue ou bloquée, on doit réestimer le temps d'exécution nécessaire pour terminer l'opération, au moment où l'on va la réintroduire dans le carnet de commande.

4,4 - Début au plus tôt (JA), fin au plus tard (FR) d'une commande

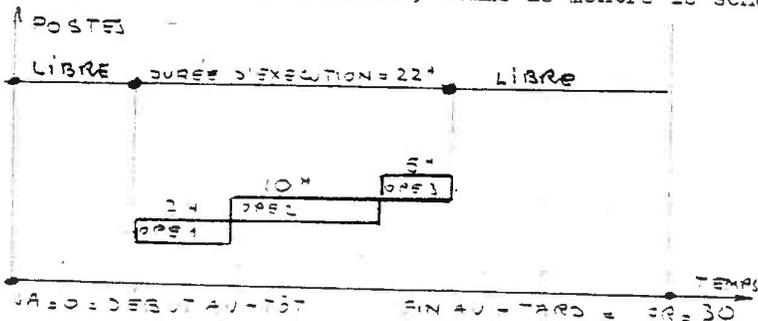
Chaque commande est affectée d'une date de début au plus tôt : celle où sera disponible la matière première, ou encore les pièces à réparer. Il est physiquement impossible de débiter l'exécution de la commande avant la date au plus tôt, repérée ci-après par le symbole JA.

Chaque commande a aussi une date de fin au plus tard repérée ci-après par FR : fixée par des impératifs techniques, ou plus simplement par le souhait du client. Il est fâcheux, mais physiquement possible, de terminer une commande plus tard que sa date de fin au plus tard : on fait subir au client un retard, qui lui est plus ou moins préjudiciable, et l'un des objectifs visé par la planification est de réduire autant que possible ces retards.

4,5 - Marge libre d'une commande

Lorsque le temps séparant le début au plus tôt et la fin au plus tard est supérieur à la durée d'exécution de la commande, il existe une liberté de placement de la commande, comme le montre le schéma ci-après :

Fig. 2



On appelle "marge libre" la quantité "Fin au plus tard" - "Début au plus tôt" - "Durée d'exécution".

Dans le schéma ci-avant :

Marge libre = 30 - 22 = 8 heures.

.../...

4,6 - Début au plus tôt, début au plus tard, de chaque opération d'une commande

La date de début au plus tôt de la commande (cf. § 4,4) est aussi la date de début au plus tôt de la 1ère opération = JA1.

La date de début au plus tôt JA2 de la 2e opération de la commande est JA1 + le temps d'exécution de la 1ère opération T1 + le délai de manutention entre 1 et 2

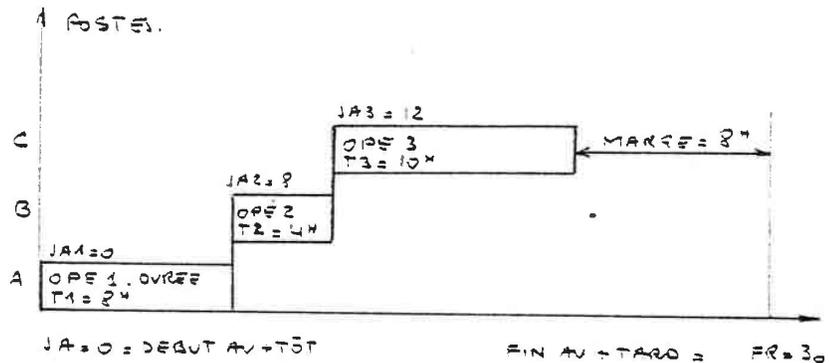
$$JA2 = JA1 + T1 + M(1,2)$$

La date de début au plus tôt de la nème opération de la commande est ainsi :

$$JAn = JA1 + \sum_1^{n-1} Tn + \sum_1^{n-1} M(n-1, n)$$

Cela peut se représenter comme suit : (en groupant dans le schéma les temps d'exécution et de manutention).

R. 3



La date de début au plus tard JRn de la dernière opération de la gamme de la commande est égale à la date de fin au plus tard de cette commande, moins le temps d'exécution Tn de la dernière opération :

$$JRn = FR - Tn$$

La date de début au plus tard de l'avant dernière opération de la gamme est :

$$JR_{n-1} = FR - Tn - T_{n-1} - M(n-1, n)$$

Et ainsi, la date de début au plus tard de la 1ère opération de la gamme est :

$$JR1 = FR - \sum_n^1 T1 - \sum_n^1 M(n-1, n)$$

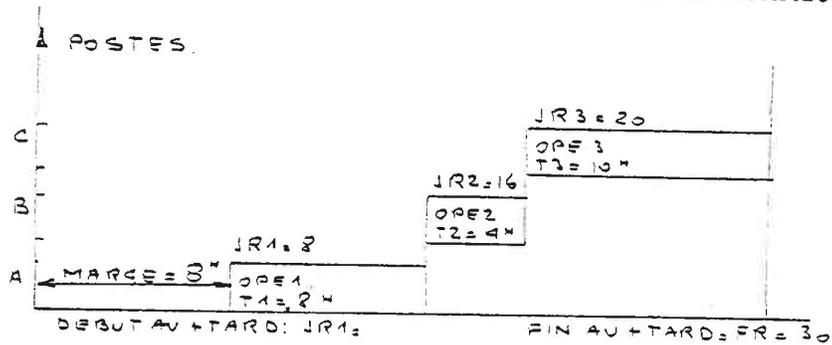
Ou encore, la date de début au plus tard de la ième opération d'une commande de n opérations au total est :

$$JRi = FR - \sum_n^i T1 - \sum_n^i M(i-1, i)$$

.../...

Cela peut se représenter comme suit : (en regroupant comme dans le schéma précédent les temps d'exécution et de manutention).

Fig. 4



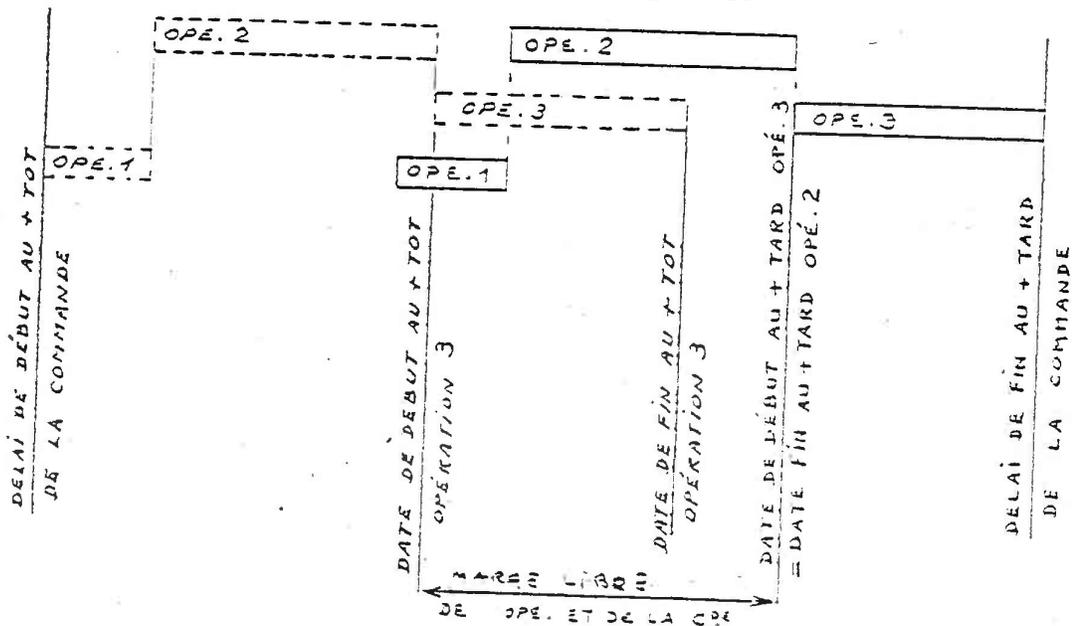
4,7 - Marge libre des opérations

On appelle marge libre d'une opération $JR_n - JA_n$.

On voit que les marges libres de toutes les opérations d'une même commande sont les mêmes, et sont égales à la marge libre de la commande :

- marge libre opération 1 = $JR1 - JA1 = 8 - 0 = 8$ h
- marge libre opération 2 = $JR2 - JA2 = 16 - 8 = 8$ h
- marge libre opération 3 = $JR3 - JA3 = 20 - 12 = 8$ h

Fig. 5

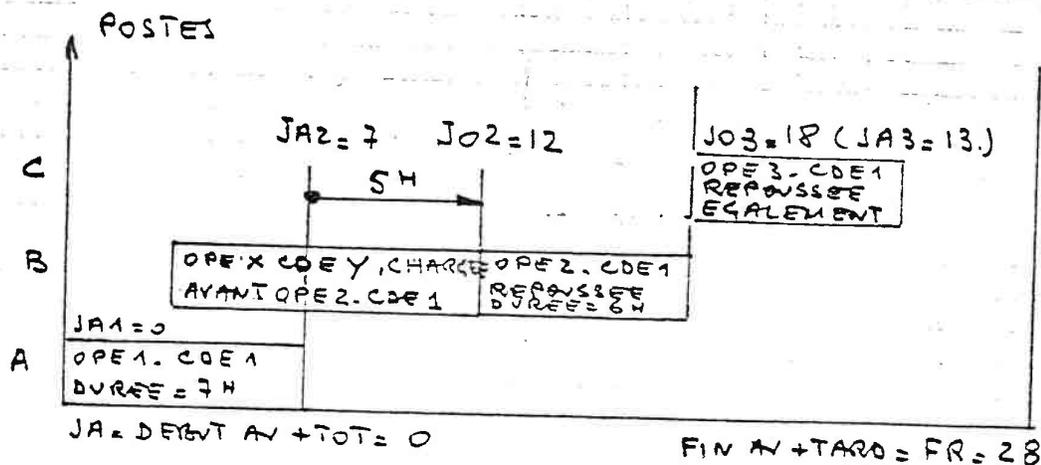


4,8 - Jours de début obligé (J.O.)

Les dates de début au plus tôt (JA) et de fin au plus tard (FR) d'une commande, fixent les dates de début au plus tôt (JA_n) et de début au plus tard (JR_n) de chaque opération, comme nous l'avons vu en 4.6, d'une manière stable liée à la commande.

Lors des essais de chargement des postes de travail, il arrive que les opérations ne puissent être placées exactement à leur JR ou leur JA, car d'autres opérations ont déjà pris la place. On calcule alors, pour les opérations, une date de "début obligé" JOn , liée cette fois aux nécessités d'enchaînement des opérations.

Fig. 6



4,9 - Temps d'exécution - Intervalle de manutention

La réalisation de chaque opération de la commande occupe un poste de travail pendant une durée dite "temps d'exécution", qui comprend la préparation du poste à son nouveau travail (réglage par exemple...), l'exécution de l'opération elle-même, et la remise en ordre du poste après exécution (démontage, nettoyage). Pendant le temps d'exécution de l'opération, le poste ne peut traiter une autre opération.

La durée de l'opération comprend toutes les tâches précitées. La durée d'exécution, fixée par un calcul préalable de préparation du travail, est supposée connue sans aléa.

Après la fin de l'exécution, sur un poste donné, d'une opération, d'une commande, on ne peut, très généralement, entreprendre immédiatement l'opération suivante sur le poste suivant : il faut en effet un délai nécessaire à assurer le contrôle du travail qui vient d'être fait, et la manutention du lot de pièces entre postes.

Ce délai de contrôle et de manutention est appelé ici : intervalle de manutention. Pendant cet intervalle, les postes de travail peuvent traiter d'autres opérations : le temps correspondant à l'intervalle de manutention ne s'ajoute donc pas à la charge des postes, bien qu'il augmente la durée d'exécution de la commande.

.../...

Physiquement, la durée d'un intervalle de manutention entre 2 postes est liée à divers problèmes :

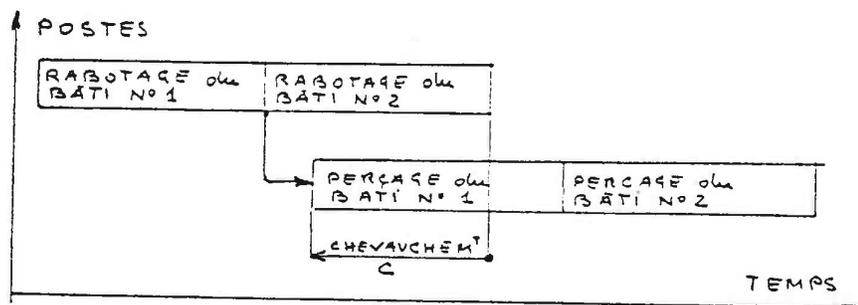
- Nature, volume, poids de la pièce (ou du lot de pièces) à manutentionner.
- Nature des moyens de manutention disponibles.
- Délai de communication des informations aux manutentionnaires, dans l'atelier.
- Nature du poste approvisionné (par exemple on attendra d'avoir accumulé diverses commandes, constituant une charge complète devant un four de recuit, avant de débiter l'opération de recuit elle-même pour toutes ces commandes ensemble).

Dans le programme informatique décrit ici la durée des intervalles de manutention entre opérations est fixée par le préparateur du travail, cas par cas : s'il omet de fixer cet intervalle, le programme adopte "par défaut" une valeur liée au poste à approvisionner.

4,10- Chevauchement

Il peut arriver, exceptionnellement, que l'on puisse physiquement commencer l'opération $n + 1$ sur la machine M_{n+1} , alors que l'opération n sur la machine M_n n'est pas encore terminée : par exemple, supposons qu'une commande consiste dans la fabrication de deux grands bâtis de machine : on rabote le 1er sur le poste M_1 , puis, pendant que l'on rabote le second sur M_1 , on peut percer le 1er sur un poste M_2 ; l'ensemble peut se schématiser comme suit :

Fig. 7



On appelle chevauchement, de l'opération 2 sur l'opération 1, la durée "C" ci-dessus.

4,11 - Horaires d'activité des postes de travail d'un atelier

La pratique la plus courante aujourd'hui est que chaque poste de travail fonctionne 8 h par jour, 5 jours par semaine, fournissant ainsi 40 h de travail par semaine.

Mais d'autres types d'organisations stables sont aussi rencontrés :

- Travail en 3 équipes (dit aussi "en 3 postes", ou "travail posté" ou "travail continu") : le poste de travail, desservi par 3 opérateurs, ou 3 équipes d'opérateurs, se relayant, fonctionne 24 heures par jour. Cela peut se poursuivre 5, 6 ou 7 jours par semaine : on peut ainsi absorber 120, 144 ou 168 h de travail par semaine, au même poste.

.../...

- Travail en 2 équipes : le poste de travail, desservi par 2 équipes, fonctionne 16 heures par jour, généralement 5 jours par semaine, soit 80 heures.
- Travail le samedi : le poste fonctionne 8 ou 9 h par jour, plus 4 heures, 4 heures 1/2, ou 8 ou 9 h le samedi.

Ces divers types d'horaires sont très généralement stabilisés pour de longues périodes, car ils exigent des habitudes de travail, une organisation des opérations, d'approvisionnement en pièces et outillages, un encadrement, etc... peu facilement modifiables. Il est fréquent que divers types d'horaires coexistent dans le même atelier, pour des familles de postes de travail différentes.

Heures supplémentaires : Afin d'absorber rapidement une surcharge de travail, il est de pratique courante de faire exécuter des heures supplémentaires de travail, pendant une période limitée, sur certains postes, alors que les autres poursuivent leur horaire habituel.

4,12 - Masques horaires

La coexistence, dans le même atelier, de postes de travail suivant des horaires différents, y introduit des complications de planification. En effet, la réalisation d'une opération de 24 h demandera 3 jours si elle est exécutée sur un poste travaillant 8 h par jour, 1 jour sur un poste en 3 équipes, etc... De sorte que le calcul de la durée d'exécution d'une commande comportant des opérations passant sur des postes d'horaires divers est rendu plus ardu.

Afin de permettre ce calcul, et la coordination de réalisation des diverses opérations, on utilise, dans le programme informatique étudié ici, l'artifice de "masques horaires" :

1°) On considère que tous les postes travaillent pendant toutes les heures d'ouverture de l'atelier : celles-ci résultent de l'addition des horaires maximum de tous les postes de travail. Par exemple, supposons que l'atelier comporte 3 postes A, B, C :

- . A travaille 8 h par jour, 5 jours par semaine
- . B travaille 2 x 8 h par jour, 5 jours par semaine
- . C travaille 10 h par jour, plus le samedi pendant 4 heures.

Les heures d'ouverture de l'atelier seront donc : 2 x 8 h par jour (poste B) pendant 5 jours, plus 4 heures (poste C) le samedi.

2°) L'échelle des temps, qui permettra de coordonner les diverses opérations, est celle des heures d'ouverture de l'atelier.

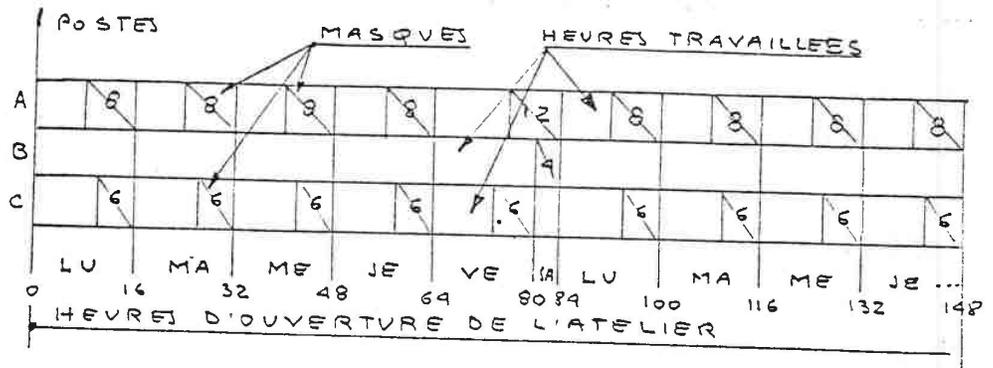
3°) On "occupe" les heures non travaillées des divers postes par des "masques horaires", constituant en quelque sorte des commandes fictives, inamovibles. Par exemple seront occupés par des masques horaires :

- 8 h chaque jour, plus 4 heures le samedi pour le poste A
- 4 h le samedi pour le poste B
- 6 h chaque jour pour le poste C.

Cela peut se schématiser comme suit :

.../...

Fig. 8



De la sorte, l'heure 100 sera bien, pour tous les postes, le 2e mardi, à l'heure d'ouverture de l'atelier. Entre l'heure 0 et l'heure 100 les divers postes auront absorbé :

- A : $6 \times 8 = 48$ h de travail + $(5 \times 8 + 12) = 52$ h de "masques" : Total = 100 h
- B : $6 \times 16 = 96$ h de travail + 4 h de "masques" : Total = 100 h
- C : $6 \times 10 + 4 = 64$ h de travail + $6 \times 6 = 36$ h de "masques" : Total = 100 h

Si donc on planifie une opération de durée 48 h sur A, ou 96 h sur B, ou 64 h sur C, lancée le 1er lundi à 0 heure, le calcul de sa date de fin de chaque opération donnera bien l'heure 100.

4,13 - Coefficient d'utilisation des postes de travail

On appelle "coefficient d'utilisation" d'un poste de travail, entre deux dates D1 et D2 séparées par H heures travaillées, le rapport $\frac{\sum T}{H}$ où $\sum T$ représente le total des temps d'exécution des opérations chargées sur ce poste.

4,14 - Différents états d'une opération : bloquée, différée, disponible, en cours, interrompue

Nous avons vu ci-avant la définition d'une opération bloquée.

Une opération disponible peut être entreprise immédiatement : il ne manque ni matière, ni outillage, ni instructions... La date de début n'est dépendante que de la disponibilité du poste de travail sur lequel elle doit être exécutée.

Une opération différée ne peut être entreprise immédiatement pour la seule raison que l'opération précédente de la gamme n'est pas terminée. Dès que cela sera, elle deviendra disponible.

Une opération en cours est actuellement en cours de réalisation sur un poste de travail.

Une opération interrompue a été commencée et partiellement exécutée, puis abandonnée. Après quoi, elle devient disponible, en attente de reprise. Une opération peut être interrompue et reprise plusieurs fois successives (cela n'est, naturellement, guère souhaitable).

.../...

4,15 - Planification, planning

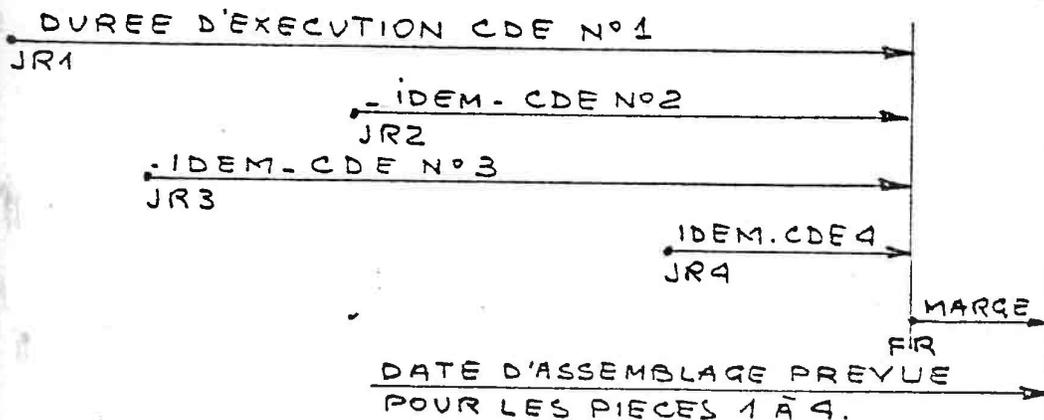
Planifier le travail d'un atelier suppose la réalisation d'un ensemble de tâches, énoncées ci-après.

Les dispositions étudiées dans le présent mémoire ne recouvrent qu'une partie de ces tâches.

Planifier le travail d'un atelier, recevant un flux régulier de commandes portant chacune sur un lot de pièces identiques qui lui sont adressées par des clients extérieurs, suppose que l'on fasse l'analyse des commandes reçues, que pour chaque commande reçue on établisse un "modèle" de son exécution (c'est l'objet de la "préparation du travail"), qu'enfin, pour le flux constitué par l'ensemble des commandes reçues et préparées, on établisse un modèle "de rangement" de ces commandes et de chacune de leurs opérations, ce qui constitue l'ordonnancement des commandes.

La préparation et la planification des travaux consistent à :

- 1 - Définir la gamme d'exécution de la commande, les postes de travail utilisables et les temps d'exécution pour chaque opération de la gamme, les délais de manutention et possibilités de chevauchement, les matières et outillages nécessaires, et fixer les dates de début au plus tôt et fin au plus tard de chaque commande (ou entériner les désirs du client à ce sujet). La préparation technique est complétée par une préparation administrative (attribution d'un n° de commande, de libellés d'opérations).
- 2 - Coordonner le placement dans le temps des commandes de pièces qui s'assemblent : ce travail n'est à faire que si l'atelier réalise des assemblages de plusieurs pièces différentes pour en faire des sous-ensembles ou des produits finis. Les dates au plus tard de fin de chacune des commandes qui concourent à un assemblage sont alors synchronisées ainsi que leur date de début au plus tard, comme l'indique le schéma ci-après :



Les 2 types de travaux ci-dessus (gammes et confection coordonnée de pièces qui s'assemblent) ne sont pas abordés dans ce mémoire. Ils sont supposés être faits préalablement, le premier par la section "préparation du travail", le second par la section planification, en liaison avec les préparateurs. Les dispositions étudiées ici concernent la suite du travail de planification (qu'on appelle parfois : lancement) et qui consiste à :

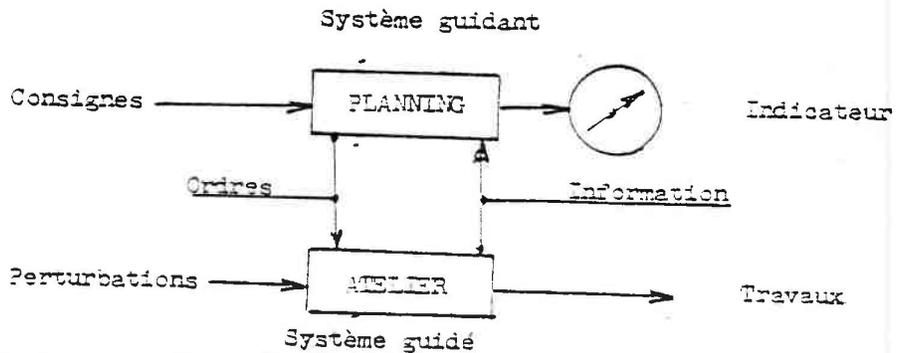
- 3 - Affecter prévisionnellement chacune des opérations de chaque commande aux postes de travail, en établissant un compromis entre 3 objectifs partiellement contradictoires :
 - Eviter les retards d'exécution des commandes.
 - Utiliser au mieux et charger le plus possible les postes de travail.
 - Réduire le volume des travaux en cours.
- 4 - Déclencher l'exécution réelle des travaux selon les plans prévus, en faisant parvenir les ordres aux opérateurs : magasiniers de matières et d'outils, ouvriers, manutentionnaires, contre-maîtres..., sans perte de temps.
- 5 - Enregistrer, à mesure, l'avancement de l'exécution :
 - pour chaque commande,
 - pour chaque poste de travail.

Enregistrer notamment les incidents de toute nature qui perturbent les plans prévus :

 - avances et retards d'exécution,
 - pannes de machines,
 - absences d'ouvriers aux postes prévus,
 - bris d'outils ou de pièces, etc...
- 6 - Modifier, à mesure, les plans initialement prévus, en fonction de ces incidents. Modifications locales ou reprise d'ensemble des plans faits en (3) ci-dessus.
- 7 - Archiver les commandes terminées. Eventuellement, préparer l'exploitation des informations recueillies pour améliorer la marche de l'atelier.

Au total, le système étudié ici est un système guidant qui pilote l'atelier (système guidé) suivant le schéma ci-après :

Fig. 10



Nota : la méthode de planification étudiée a pour but auxiliaire, mais essentiel dans un grand nombre d'ateliers (d'entretien, notamment) d'insérer les nouvelles commandes à leur arrivée dans le planning, sans les reléguer à la suite, mais en essayant de respecter au mieux les délais qu'elles expriment et tout en ne remettant pas tout le planning en cause.

4,16 - Dans le cadre de ce qui vient d'être exposé, nous préciserons les notions suivantes :

4,161 - Chargement - Déchargement d'un planning - Lancement

Charger un planning correspond aux opérations suivantes

- prendre en compte pour le planning une ou plusieurs commandes et placer toutes les opérations de ces commandes sur le planning (en cherchant à respecter les contraintes afférentes à ces commandes).

Décharger un planning correspond à l'élimination d'une opération terminée.

Le lancement consiste à s'assurer que le personnel, les matières, les outillages et les machines nécessaires sont bien disponibles et à donner l'ordre d'exécution. (Habituellement on regroupe pour le lancement toutes les opérations à réaliser ou à démarrer sur une même période (par exemple, une journée).

4,162 - Modes de placement

Ils peuvent s'effectuer de diverses façons sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

Quand on charge une commande, on peut :

- 1 - ou bien partir de la date au plus tôt où cette commande peut être entreprise et exécuter les travaux dans le "meilleur" délai. On charge à partir de la 1ère opération jusqu'à la dernière. C'est ce que nous avons appelé le mode progressif de placement.
- 2 - ou bien partir de la date au plus tard où la réalisation doit être effectuée, c'est-à-dire du délai imparti à la commande ; le chargement se fait à partir de la dernière opération, en plaçant successivement les opérations jusqu'à la première.

C'est ce que nous avons appelé le mode régressif de placement.

- 3 - Nous avons été amenés à considérer un mode de placement combinant les deux approches et appelé régresso-progressif. Sans entrer dans des détails qui seront fournis plus loin nous pouvons dire qu'une première démarche régressive permet de fixer la date au plus tard où la commande peut être entreprise et qu'ensuite le mode de placement progressif permet de bien utiliser les disponibilités du planning en vue de terminer au plus vite la commande une fois lancée.

A ce stade de définition des termes, nous nous limitons aux notions que nous venons de rappeler, seules nécessaires à la lecture des paragraphes qui suivent.

.../...

5 - DIFFICULTE DU PLANNING D'ATELIER

Nous avons fait remarquer, au chapitre 3,14 (§ 3) précédent, que planifier le travail d'un atelier est une tâche complexe, au cours de laquelle doit être établi un compromis acceptable entre des objectifs contradictoires. Cette tâche est rendue encore plus ardue par diverses difficultés :

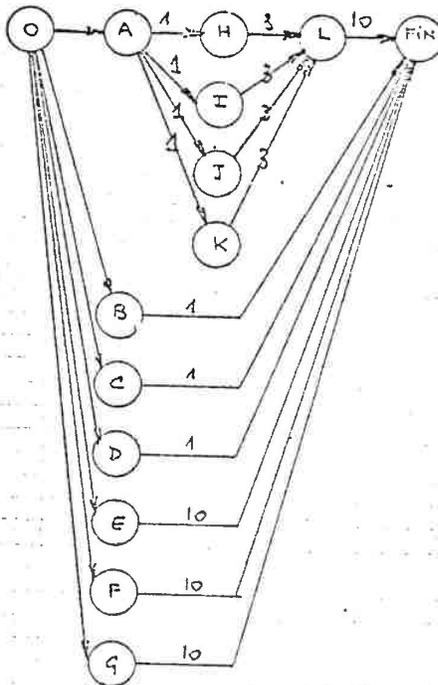
5,1 - Absence de doctrine claire

Pour établir ce compromis, on ne peut se référer à un corps de doctrine stable et solide. Les recherches nombreuses que nous avons faites ont montré qu'aucune étude d'ensemble n'a été faite à ce sujet à ce jour :

On pourrait croire (et l'on a cru longtemps) qu'il existe des algorithmes naturels, c'est-à-dire des procédures pas à pas permettant d'organiser le travail de façon très efficace. Il n'en est rien : certains procédés pour établir un plan d'exécution n'ont pas la même efficacité dans tous les cas d'utilisation : ce n'est que depuis quelques années (vers 1971) que l'étude systématique des performances des algorithmes d'ordonnement des tâches a été entreprise en Amérique du Nord (notamment par Edward G. COFFMAN, Ronald L. GRAHAM de l'Université de Californie, à Santa Barbara, Harry L. LEWIS, Christos H. PAPANIMITRIOU, A. COOK de l'Université de Toronto).

On peut citer un exemple qui se rapporte à la planification selon la méthode du "chemin critique", l'un des algorithmes les plus employés. Pour exécuter le travail schématisé ci-après on distribue les différentes tâches en fonction de leur urgence relative, c'est-à-dire en fonction de la longueur des chaînes de la partie non exécutée du diagramme des contraintes. La chaîne la plus longue s'appelle le chemin critique. On exécute donc toujours en priorité une tâche qui est sur le chemin critique.

Fig. 11



Si l'on suppose ici que l'on ait 4 postes de travail P1, P2, P3, P4 capables d'exécuter les diverses tâches, on voit que l'algorithme du chemin critique conduit à l'organisation ci-après :

Fig. 12

A	H	I	J	K	L
		E		B	
		F		C	
		G		D	
DELAI TOTAL D'EXECUTION = 23					

Alors que le temps d'exécution optimal est de 14 comme illustré ci-après :

Fig. 13

A	H	E
B	I	F
C	J	G
D	K	L
DELAI OPTIMAL = 14		

T.C. HU de l'Université de San Diego a montré que les organisations obtenues par la méthode du chemin critique sont optimales pour les problèmes où tous les temps d'exécution sont égaux, et où chaque tâche a au plus une suivante mais ne le sont pas forcément dans tous les autres cas.

Un autre exemple construit par R.L. GRAHAM (cité dans la revue "Pour la Science" - Mai 1978 - pages 85/96) donne des résultats étonnants :

- un certain travail constitué par une série de 10 tâches, liées par des contraintes de succession, peut être exécuté en 33 heures, par 2 postes de travail
- si l'on diminue d'1 heure la durée de chacune des 10 tâches, le délai total d'exécution devient 36 heures
- et si l'on ajoute un poste de travail, ce délai est porté à 38 heures.

.../...

Ces quelques exemples montrent que les bases de la planification sont encore mal explorées sur le plan scientifique et "a fortiori" mal connues dans les entreprises industrielles.

Les fondements méthodologiques font défaut :

- . Pour établir les lois "physiques" d'interaction des variables de "performance" de la planification :
 - coefficient d'utilisation des postes
 - volume des en-cours
 - délais d'exécution et leur respect (cela a été fait dans quelques cas simples)
- . Pour traduire si possible ces lois en termes économiques
- . Pour établir l'incidence sur les performances du planning de données telles que :
 - nombre d'opérations par commande,
 - durée moyenne et écart type des durées, d'opérations placées sur un même poste,
 - marge libre des commandes,
 - durée moyenne et écart type des durées, d'opération dans une même commande,
 - incidence d'une opération anormalement longue ou d'une machine très chargée sur l'ensemble du planning, etc...

Dans la totalité des cas que nous avons pu observer dans l'industrie, la planification est réalisée sans règle écrite, par des agents de lancement de grade et de formation économique modeste. Les consignes qui leur sont données sont qualitatives et souvent vagues, du type "Réduisez-moi les en-cours au minimum, mais surtout, ne mettez pas en retard les commandes de la société X, ni celles d'Y et Z et utilisez à plein notre aléreuse qui vaut 3 millions".

5,2 - Fluctuations des politiques de planning

Les politiques que traduisent ces consignes varient d'ailleurs en fonction de la conjoncture :

- lorsque le carnet de commande du centre de production est très chargé, le compromis est infléchi vers l'utilisation maximum des capacités des postes de production, au détriment des délais d'exécution et des en-cours.

En période de "basse conjoncture", les industriels cherchent à capter le plus grand nombre possible de commandes, en proposant des délais d'exécution réduits, et en observant plus strictement ces délais, au détriment cette fois du coefficient d'utilisation des postes de production.

Un dispositif convenable de planification doit donc pouvoir s'adapter à divers types de politique, c'est-à-dire permettre d'aller dans le sens d'une optimisation de l'une des trois "performances" de planning (respect des délais "en cours" minimum, bonne utilisation des postes et du personnel).

5,3 - Rapidité nécessaire des réponses aux perturbations

La difficulté dominante du type de planification d'atelier étudié ici, est, de très loin l'aspect mouvant du problème.

Un flux continu de commande est à traiter, renouvelant à chaque heure les données à combiner.

Des commandes urgentes doivent pouvoir être acceptées, sans désorganiser l'activité des postes de travail, ni les délais d'exécution des commandes déjà planifiées.

Il faut faire face aux aléas de l'exécution même :

- Absentéisme (5 à 15 % de la capacité de production est aléatoirement supprimé chaque jour).
- Pannes de machines, bris d'outils.
- Casses, rebuts en cours d'exécution.
- Incertitude sur la date de disponibilité de pièces, matières, outils spéciaux.
- Pour l'entretien : incertitude sur la nécessité de certaines opérations.

Pour intégrer de manière efficace ces changements dans la planification, le temps de réponse du planning doit être court : de l'ordre de la dizaine de minutes, dans les fabrications les plus instables, de l'ordre de la demi-journée, dans les productions stabilisées : si le temps de réponse est trop long, le planning est inadapté à la situation instantanée : cette adaptation est réalisée par des hommes, sans support particulier de réflexion (contremaîtres, chefs d'équipe) et le dispositif perd beaucoup en efficacité ; les ouvriers attendent les ordres de contremaîtres occupés ailleurs, les attentes entre phases d'exécution d'une pièce s'allongent etc...

5,4 - Grande "variété" nécessaire du système guidant

Si l'on se reporte au schéma figure 10 ci-avant, on voit que, selon la loi d'ASHBY, le planning (système guidant) doit avoir une variété supérieure à celle du système guidé (atelier). Or, dans ce dernier sont prises, inmanquablement, un certain nombre de décisions (*) humaines affectant le planning. Par exemple : arrêter ou non immédiatement un outil qui présente des signes d'usure, s'absenter ou non, décider qu'un lot de pièces est acceptable ou non, avec retouche, ou non, dans un cas litigieux etc.

Du fait de ces interventions humaines la variété de l'atelier guidé est pratiquement infinie.

*) c'est-à-dire de conduites non complètement déterminées par des règles préétablies.

En termes plus communs on ne saurait prévoir et régler d'avance TOUTES les situations réelles de l'atelier.

Il s'ensuit que le système guidant (Planning) doit avoir également une variété très grande, quasi-infinie, et donc être, obligatoirement un système comprenant au moins un homme, prenant des décisions de planification.

5,5 - Absence de nécessité physique d'une planification

On indique ci-avant les difficultés d'une planification qui vise à maîtriser un compromis économique entre 3 objectifs principaux.

Il faut souligner que la planification d'activité d'un atelier n'a toutefois pas la nécessité physique absolue : dans un grand nombre de cas, l'absence de planification n'empêche pas de réaliser les travaux. Elle les rendra simplement plus lents et plus coûteux. Par exemple, chacun sait d'expérience qu'une entreprise de plomberie, de peinture, ou un garage, peuvent fonctionner sans aucune planification systématique du travail.

Les bénéfices retirés d'une planification systématique apparaissent de façon peu claire aux industriels, à cause de l'absence de doctrine claire en la matière (signalée en 5,1 ci-avant).

Par contre, le coût de cette planification (salaires de personnels, coûts de moyens informatiques éventuels) est facilement mis en évidence.

L'établissement, ou le maintien, d'une planification systématique du travail est donc perçu, par les entreprises, comme l'engagement de "dépenses certaines, pour un résultat incertain". Ceci explique la faiblesse des efforts déployés par la moyenne des entreprises, et corrélativement, l'état rudimentaire des connaissances en ce domaine.

6 - DISPOSITIFS HABITUELS (*) DE PLANNING D'ATELIER

Ils peuvent être classés en deux groupes, selon qu'on a donné la primauté à la rapidité de réponse, ou à la complexité de l'algorithme de composition des objectifs.

6,1 - Dispositifs à délai de réponse court, traitement simple

6,11 - Absence de support matériel

La planification est faite "à vue", par le contremaître, voire l'ouvrier lui-même : méthode encore dominante dans les activités de dépannage.

Dans ce cas, l'ouvrier découvre lui-même à mesure, les opérations à exécuter, les organise en séquences, et les exécute. Il n'y a pas de délai de transmission d'informations, peu de coût de traitement de celles-ci, mais également peu d'anticipation (chacun a vécu l'expérience d'une intervention de plombier qui retourne chez lui chercher les joints, puis les clés nécessaires...).

Nous nous limitons ici aux dispositifs présentant une certaine efficacité. Il en existe beaucoup d'autres (par exemple à temps de réponse long, et traitement simple, tels que planning "manuel" à 2 échelons...).

.../...

Il n'est pas impossible que ce type de planning soit performant dans le cas où une commande est traitée complètement par un seul poste de travail (le plombier...).

Lorsque plusieurs postes doivent intervenir, ce système ne permet pas de maîtriser les délais d'exécution.

6,12 - Dispositifs "manuels"

De 1890 (Taylor) à 1965 environ, ces systèmes "manuels" ont été les seuls utilisés. Une revue exhaustive de leurs domaines d'application, de leurs conditions de fonctionnement, de leurs dispositions de détail a été faite en 1962 par une équipe de 22 ingénieurs du cabinet-conseil "organisation Paul Planus" (Théorie et pratique du planning - Edition d'organisation - 1962).

Placés dans l'atelier même, ces systèmes comprennent :

- un agent de planning, supposé appliquer un algorithme de placement des opérations, satisfaisant,
- un dispositif matériel (tableau de Taylor, tableau à bandes de carton...) l'aidant dans sa réflexion, puis enregistrant les décisions pour déclencher l'exécution ultérieure,
- un dispositif de classement des dossiers de commande.

L'ensemble est mis à jour à chaque changement de travail, et lors de tout événement imprévu.

Le plus élaboré, dans le domaine traité ici, est le "tableau à bandes de carton", qui fonctionne comme suit :

Tableau de planning à bandes de carton (voir fig. 14 à 17)

- 1 - La préparation du travail étant faite, on découpe pour chaque opération de la commande, une bande de carton de longueur proportionnelle à sa durée (par ex. : 2 cm = 1 heure de travail.

Chaque bande est repérée par le n° de commande, le n° d'opération, le n° de poste de travail exécutant (fig. 15).

Pour "chaîner" les opérations d'une même commande, on inscrit aussi sur la bande les n° des postes exécutant l'opération précédente, et la suivante.

- 2 - L'agent de planning dispose par ailleurs d'un tableau (fig. 14) mural, en métal ou plastique, comportant une série de gouttières horizontales destinées à recevoir les bandes de carton précédentes

Chaque gouttière représente un des postes de travail de l'atelier. En tête (c'est-à-dire à gauche) de la gouttière est repéré le poste de travail (par son nom ou son symbole).

Le "temps" disponible pour le poste de travail est représenté par la longueur de la gouttière selon l'échelle choisie

Les bandes de carton sont placées dans les gouttières, avec leur extrémité gauche correspondant à la date de début prévue de l'opération et la droite à la date de fin prévue de celle-ci.

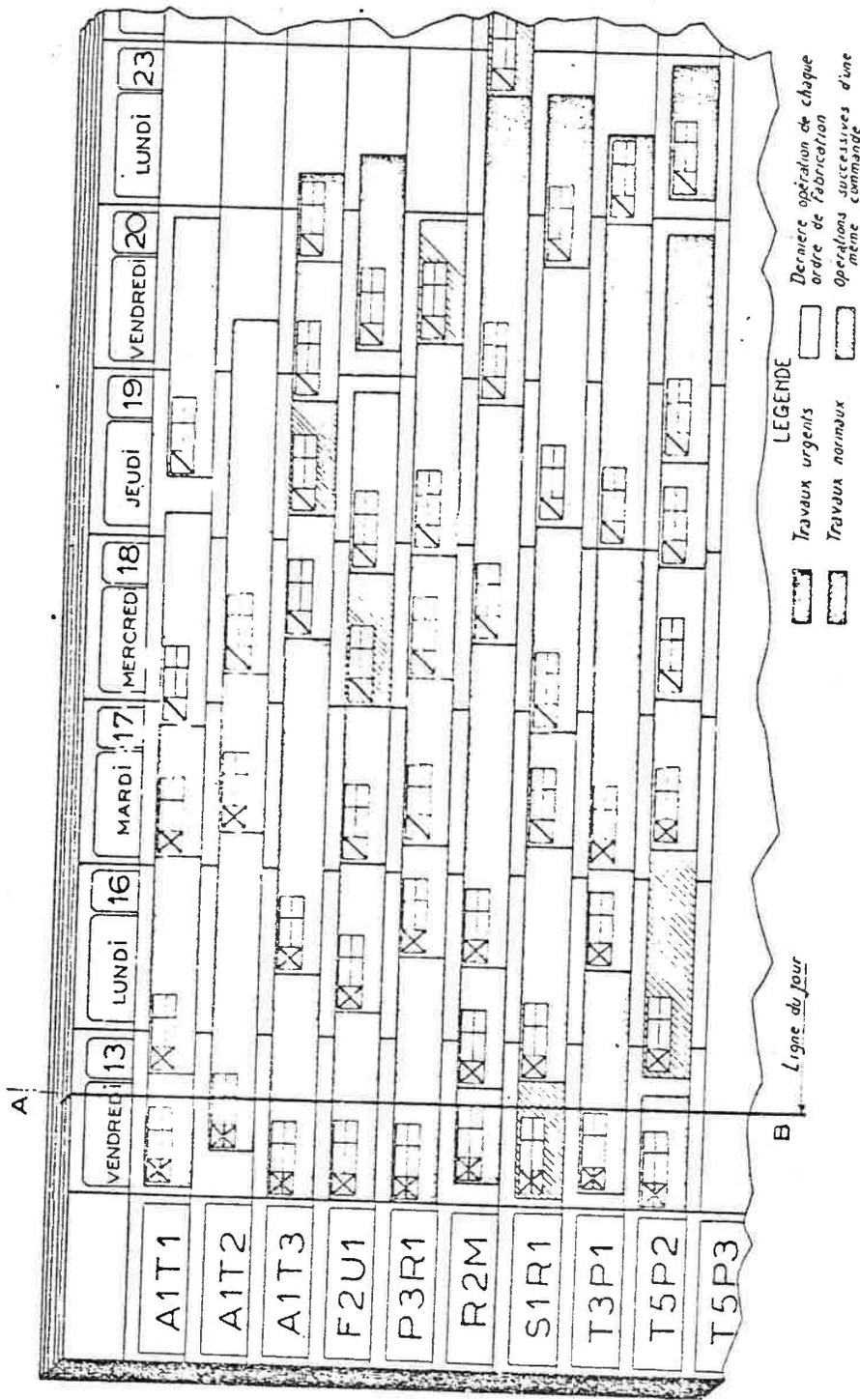


Fig. 38. — Diagramme de charge à rainures et à bandes mobiles. (Schéma de principe).

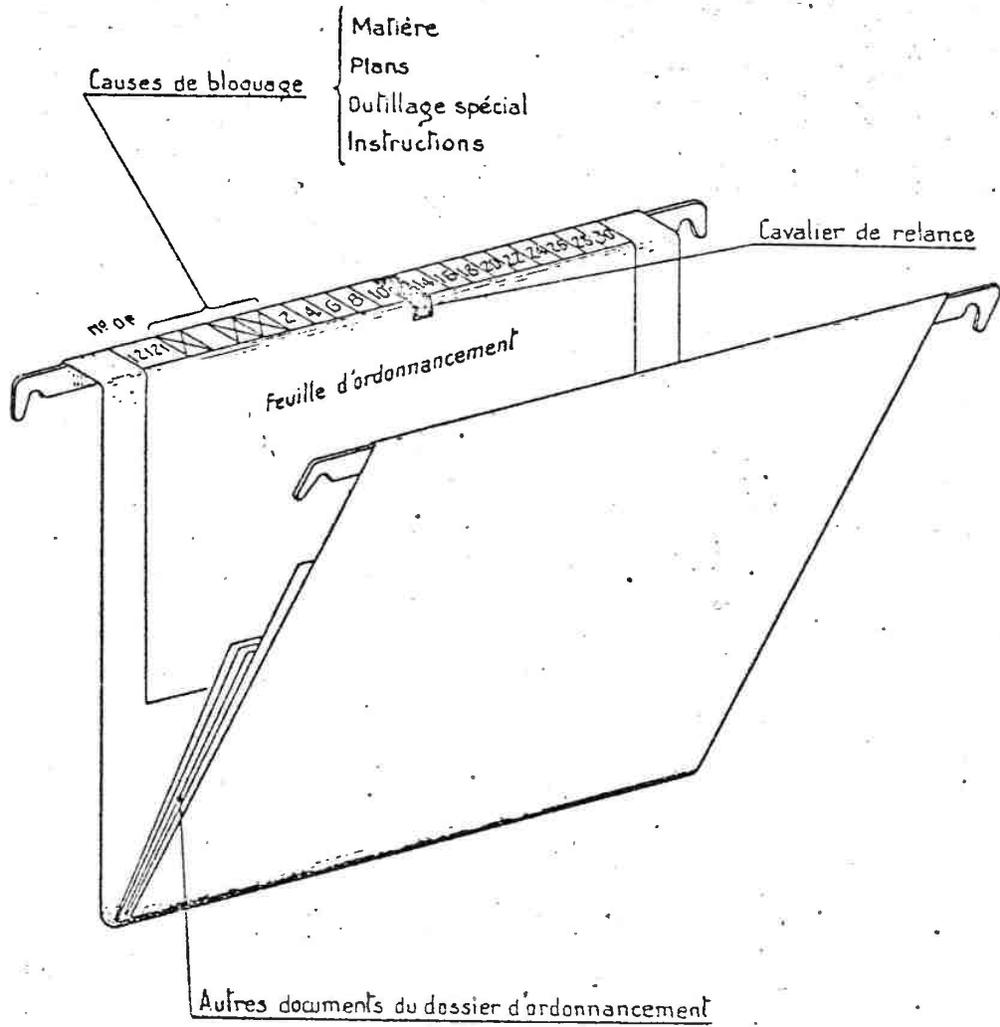
SECTION M1		ORDRE DE FABRICATION	FEUILLE		NUMERO DE DESSIN									
		275	ORDONNANCEMENT		12/4432									
SECT. INTERESSÉES		DESIGNATION DE LA PIÈCE: Arbre de commande de la transmission												
MJ		QUANTITÉ: _____												
TRAVAIL DEM. P. LE: 24/8		DESIGNATION DE LA MATIÈRE: acier rond 70 Kg. Ø 40 Long 0m. 580												
TRAVAIL TERMINE LE: _____														
MAT. OU PIÈCE REÇUE LE: _____		SYMB. DE LA MATIÈRE	QUANT. DEMANDÉE	UNITE	DEM. POUR LE	POUR SECTION								
		M.H.R. 40	5,90	M	Au/S	M2								
TEMPS PRÉVU	DESSIN	LISTE OUTIL	INSTRUCT	OPÉRATION			POSTE DE TRAVAIL			MOUVEM	OPÉRAT	VERIF INTERM	VERIF FINALE	OBSERVATIONS
				N°	DESIGNATION	SYMB.	TYPE	N°						
15				20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
150				1	Sciage	S C S I R		1			X	X		
1200	X	X	X	2	Tournage	T R T 5 P		2			X	X		Vérification terminée
750	X	X	X	3	Fraisage	F S F 2 U		1			X	X		
220	X			4	Traçage	T G A I T		3			X	X		
400	X	X	X	5	Percage	P C P 3 R		1			X	X		Operation commencée
400	X	X	X	6	Rectification	R F R 2 M					X	X		Mouvement terminé
en 1/100 d'heures														

MARGE RÉSERVÉE AU COLLAGE

FEUILLE D'ORDONNANCEMENT M1 M4 R

Fig. 25. — Feuille d'ordonnancement (Format réel : 17,5 × 24,5).

Fig. 17



— Dossier d'ordonnement suspendu.

C'est lorsqu'il place les bandes de carton sur le tableau que l'agent de lancement met en oeuvre l'algorithme de composition des 3 objectifs, cités plus haut.

L'agent de lancement visualise ainsi :

- . L'enchaînement prévu des opérations successives de la même commande (l'extrémité 2 gauche de la bande d'opération n° 2 est placée autant que possible à la verticale de l'extrémité droite de la bande d'opération n° 1, mais ne peut être à sa gauche).
- . L'occupation des postes de travail.

Les parties de gouttières non occupées par des bandes correspondant au chômage du poste.

- 3 - Par ailleurs, une feuille d'ordonnancement (fig. 16) est classée en dossier suspendu, par n° de commande, avec les autres documents de fabrication de cette commande (fig. 17). On y enregistre à mesure l'avancement de l'exécution des opérations successives.
- 4 - Cette exécution est déclenchée par l'agent de lancement, remettant à chaque ouvrier qui se présente au guichet du bureau de planning le dossier de fabrication et le bon de travail correspondant à la nouvelle opération à entreprendre (qu'il repère sur le tableau de planning). Les heures de début et de fin de chaque opération sont reportées sur les feuilles d'ordonnancement et bons de travaux. On obtient ainsi un contrôle précis d'avancement.

Lorsqu'il est bien appliqué, ce dispositif permet la planification "manuelle" la plus précise possible.

Toutefois, ce système est lent et coûteux. Des mesures de temps faites par nous dans une dizaine d'entreprises montrent que (selon la disposition relative des tableaux, meubles de classement des dossiers, guichet de communication avec les ouvriers, la nature des informations à transcrire, le nombre de postes de travail desservis et la complexité des règles de placement appliquées), les temps de traitement principaux varient comme ci-dessous :

- Placer une opération nouvelle sur le tableau (et mettre à jour la feuille d'ordonnancement) : 2 minutes, à 5,4 minutes.
- Exécuter un échange d'opérations avec un ouvrier (horodater et mettre à jour tableau et dossiers) : 0,5 à 1,5 minute.
- Calculer chaque semaine le coefficient de charge des machines : 1,5 à 2 minutes par poste de travail.
- Si l'on appelle n le nombre d'opérations à traiter, et p le nombre de postes de travail, et si l'on considère qu'un agent de planning présent 8 heures, travaillera environ 6 h à la planification (le temps résiduel étant consacré à des missions diverses, besoins personnels...) soit 360 minutes, l'effectif d'agent de planning nécessaire dans un atelier est compris entre

$$\frac{2,5 n + 0,3 p}{360} \quad \text{et} \quad \frac{6,9 n + 0,4 p}{360}$$

.../...

Le prix de revient d'un agent de lancement, en 1978, est d'environ 5 500 F par mois. De sorte que le prix de revient de planification d'une opération est de l'ordre de 1,90 à 5,15 F, soit de 2 à 5 % du coût de main-d'oeuvre d'exécution.

Par exemple, pour un petit atelier de mécanique, de 20 postes, traitant 50 opérations par jour, l'effectif sera compris entre 0,4 et 1 agent.

Pour un grand atelier de 200 postes, et 400 opérations par jour, l'effectif devrait être compris entre 3 et 8 agents. Des difficultés importantes apparaissent, dans la coordination du travail entre ces divers agents, dans la dimension des matériels et locaux de planning. On pallie à ces difficultés :

- soit, en divisant l'atelier en sections planifiées chacune par un seul agent, mais généralement au prix d'une augmentation des durées de passage entre sections ;
- soit en réduisant la partie planifiée de l'activité de l'atelier à celle des postes très chargés (dits "goulots"), le coefficient d'utilisation des autres étant mauvais, ainsi que les délais d'exécution des commandes ;
- soit en réduisant cette partie planifiée aux opérations à exécuter dans le mois, voire la semaine. Le coefficient d'utilisation des machines est bon, mais le calcul précis du délai d'exécution des commandes en cours durant plus d'un mois, et celui des nouvelles commandes, est alors impossible. On remédie partiellement à cela en calculant des délais "moyens probables" tenant compte du nombre d'opérations, des délais moyens inter-opérations et de la charge moyenne des postes de travail.

Bien d'autres variantes de systèmes manuels existent. Tous présentent, à des degrés divers, les mêmes avantages et les mêmes limites que le "tableau à bande de cartons".

Concernant leurs avantages, nous avons constaté dans une dizaine de cas, qu'introduits dans des ateliers jusque là, non planifiés, ces systèmes ont apporté des améliorations importantes :

- augmentation de productivité, supérieure ou égale à 25 % ;
- réduction des en-cours de 50 % ;
- taux de respect des délais doublé...

Concernant leurs limites, on peut noter :

- l'aspect rudimentaire de l'algorithme de composition des 3 objectifs : coefficient d'utilisation des postes, limitation des retards, limitation des en-cours ;
- l'importance des travaux de pure manipulation et d'écriture ;
- la limitation d'emploi pratique à des ateliers d'une cinquantaine de postes traitant une centaine d'opérations par jour.

.../...

6,2 - Dispositifs informatiques

Les machines mécanographiques électromécaniques, ont été utilisées dès 1945 pour aider à la planification de fabrications, lorsque le volume d'informations à traiter était important, et le délai de réponse possible long. Ainsi, en 1951, avons nous mis en place, à l'Arsenal de Roanne, un dispositif mécanographique de comptabilité prévisionnelle des charges des postes de production, en fonction des programmes de fabrications envisagés pour les divers matériels à produire en 1 an.

Mais aucun problème de "lancement" n'a été traité sur ces machines.

Peu après l'entrée des ordinateurs dans l'industrie, on a appliqué leurs possibilités à la résolution de problèmes plus complexes de planification. Ainsi, de 1961 à 1963, nous avons établi un système de programmation des commandes aux Aciéries, et une programmation du train à bandes, à la Société Lorraine de Laminage Continu (SOLLAC), utilisant les ordinateurs IBM 1401 et 1620. Il fallait encore opérer en "langage machine" pour obtenir des temps de traitement acceptables.

Le temps de réponse permis était en effet inférieur à 8 heures, et le programme était fait chaque nuit, pour le lendemain.

A mesure que les langages informatiques sont devenu plus simples à utiliser, que les performances technologiques des ordinateurs se sont développées en même temps que baissait leur coût, des programmes de lancement ont été établis, d'abord par les constructeurs de matériels informatiques, puis (après que la décision ait été prise par les constructeurs de facturer séparément matériel et logiciels), par les sociétés de service en informatique.

6,21 - Logiciels standards

Le "Centre d'expérimentation des packages", association regroupant le CERCHAR, EdF, BSN, la RATP, etc... créée en 1972, a constitué une banque des principaux programmes standards existant à ce jour en France dans ce domaine. Ce sont les suivants :

- Programmes établis par des constructeurs :

PICS	IBM
CLASS	"
CAPOS	"
ORACLE	C II
PSC	Honeywell-Bull
UNIS	"
OPT	Control Data
SFC	NCR
FICS	

.../...

- Programmes établis par des sociétés de service

OLGA	Université de Grenoble
GENI	SAMM
PRODUCTION	SEMA
PACS	P.A. Conseils
PROMPT	ARIES
WASP	CISI
TZAR	Production

Cette liste n'est pas exhaustive. Elle contient toutefois la majorité des logiciels standards de gestion de production ayant déjà été appliqués dans plusieurs entreprises, portables, et documentés correctement.

On trouvera en annexe 1 quelques détails sur chacun de ces programmes.

6,22 - Matériel spécialisé

Par ailleurs, un matériel électronique spécialisé, qui utiliserait selon son constructeur une logique non séquentielle mais "arborescente", a été présenté en 1974 : coûteux (300 000 F en 1976), il ne semble pas donner de résultats exceptionnels et ne s'est pas généralisé.

6,23 - Caractères communs de ces moyens informatiques

Ces divers dispositifs existants présentent, tous, les caractères suivants :

- 1 - Ils exigent des moyens informatiques importants, donc difficilement implantés dans les ateliers mêmes.
- 2 - Ecrits pour le traitement par lots ("BATCH"), ils ont des temps de réponse longs : de l'ordre de quelques jours à une semaine. Il en résulte que le traitement informatique sophistiqué s'applique à des données de base périmées, en permanence. Il est censé fournir un cadre "optimisé" qui sera adapté au réel par des hommes dans l'atelier même : par exemple programme informatique hebdomadaire et lancement réel chaque heure par des moyens humains.
- 3 - La politique de lancement est figée par le type d'algorithme adopté qui fixe les "fonctions" optimisées. Modifier cette politique revient à modifier profondément les programmes.

L'efficacité économique plus grande que devrait permettre un traitement sophistiqué, est le plus souvent reperdue par l'inadaptation au réel instantané, des informations traitées : l'algorithme informatique le plus complexe ne pouvant couvrir la variété des situations réelles d'atelier.

.../...

Aussi, les différents programmes existants exigent pour fonctionner que des marges importantes soient laissées entre la fin d'une opération et le début de la suivante (marges au moins égales au temps de réponse du système). Et l'on est toujours obligé de maintenir, dans l'atelier même, une organisation humaine qui adapte les programmes reçus à la réalité quotidienne et reconstitue la "variété" requise.

6,3 - Conclusions

6,31 - Moyens existants

Les deux catégories de dispositifs ("manuelles" et "informatiques") vues ci-dessus apportent une aide appréciable à la planification du travail d'atelier. Elles ont toutefois des lacunes :

- les méthodes "manuelles" entraînent un travail matériel important, ne permettent de planifier vraiment qu'à horizon réduit, ne permettent pas d'optimiser vraiment le chargement d'un carnet de commande. Par contre, exercées sur les lieux de travail même, elles permettent d'opérer sur des informations exactes.
- les méthodes "informatiques" classiques ont des temps de réponse trop longs. Elles entraînent des attentes importantes entre opérations, et sont rigides en raison de la complexité des programmes "d'optimisation" mis en oeuvre. Elles ne peuvent résoudre tous les "cas particuliers" qui naissent chaque jour dans les ateliers, ou les modifications rapides de carnets de commande.

6,32 - Recherche d'un moyen nouveau

Aussi nous a-t-il paru indiqué de chercher à développer un système qui :

- 1 - constitue un instrument de recherche et de compréhension du problème ;
 - 2 - soit un instrument d'exploitation industrielle ;
 - 3 - en vue de cette exploitation permette la formation des personnes s'occupant de planning.
- . Ces trois objectifs exigent une conception "conversationnelle" des programmes.
- . L'objectif d'exploitation industrielle impose que ce système :
- 1 - Puisse être implanté dans l'atelier même, et puisse être mis en oeuvre par les agents de planning de l'atelier, eux-mêmes, sans intermédiaire, après une formation raisonnable.

.../...

- 2 - Exécute les tâches de chargement et déchargement des opérations et de mise à jour des dossiers machine et commandes, automatiquement, selon un algorithme suffisamment simple pour :
 - Etre traité sur un ordinateur industriel (dit encore : mini-ordinateur), dans l'atelier même.
 - Obtenir un temps de traitement très bref (ne dépassant pas quelques dizaines de minutes) de l'ensemble des commandes en cours, autorisant l'essai de diverses solutions successives de lancement de certaines commandes, par exemple, ou le placement de commandes urgentes.
 - Autoriser l'application de diverses politiques de lancement (chargement régressif ou/et chargement progressif, par exemple).
- 3 - Décharge toutefois l'agent de lancement des tâches administratives ou de manipulations habituelles :
 - Calcul des délais d'exécution de chaque opération, de la commande entière.
 - Recherche des machines capables d'exécuter chaque opération, recherche des "trous" disponibles pour ces opérations.
 - Mise à jour des dossiers lors du chargement, du lancement réel, de la fin réelle de chaque opération, etc...
- 4 - Permette, et facilite, les interventions directes de l'agent planificateur, pour résoudre les cas particuliers, mieux que ne peut le faire un programme d'ordinateur.

7 - PRESENTATION GENERALE DE L'OUTIL ELABORE

Il est conçu de la façon que nous exposons ci-après dans l'idée de satisfaire notre premier souci de recherche, préalable à ceux de formation et d'exploitation (nos objectifs de formation et d'exploitation se classent et se précisent au fur et à mesure que nos recherches avancent).

Il utilise un mini-ordinateur.

7,1 - Pour la recherche et la formation

Pour effectuer les recherches; et compte tenu du fait que nous ne disposons pas de suffisamment d'éléments, relevés dans les usines et les ateliers, qui traduisent la variété et la complexité des choses que l'on y trouve habituellement, nous avons été conduits pour explorer les possibilités de l'outil de planification présenté, à générer des "jeux d'essais", par l'ordinateur, en utilisant des processus aléatoires pour fixer divers éléments, par exemple ; le nombre d'opérations par commande, la durée d'une opération etc...,

.../...

et en se donnant les valeurs moyennes de chacun de ces éléments, ainsi que la forme de la distribution désirée. (L'ordino-gramme de génération de ces jeux d'essais est donné au § 9,3).

7,2 - Pour l'exploitation

Dans ce domaine, il vise à assister l'agent de lancement, en réalisant automatiquement une partie des tâches, et en facilitant les interventions humaines. Et pour cela :

- Placer automatiquement l'ensemble des opérations d'un carnet de commande sur l'ensemble des postes le travail les exécutant, de manière à :
 - . Réduire la durée totale d'exécution de chaque commande en coordonnant les périodes de passage de ses opérations successives sur des divers postes.
 - . Les délais d'exécution ayant été fixés, les respecter (ne les changer que dans des cas précis, en nombre limité).
 - . Accepter, notamment, sans remise en cause profonde de l'agencement du planning, une certaine proportion de commandes imprévues et urgentes.
 - . Obtenir un coefficient d'occupation des machines satisfaisant (notamment ne pas provoquer de nombreux petits "trous de charge", inutilisables).
- Permettre au commis de lancement des essais successifs rapides de divers arrangements d'ensemble du planning. Et pour cela :
 - . Permettre de modifier l'ordre de priorité de prise en compte d'une ou plusieurs commandes, conduisant à un réarrangement partiel du planning, certaines commandes conservant impérativement leur place antérieure.
 - . Permettre de réarranger totalement le planning, pour tenir compte par exemple de l'arrivée d'une commande importante et urgente, de l'arrêt total imprévu d'une machine etc...

Dans ce but, le programme doit impérativement aboutir à un temps de traitement très bref, afin de permettre l'essai successif en temps utile de plusieurs solutions et non de quelques unes seulement.

- Permettre au commis de lancement des interventions "manuelles" au niveau d'une commande, d'une opération ou d'une machine
 - . Pour modifier la date de déclenchement ou la durée d'exécution prévue d'une opération. Le programme doit s'assurer que le chargement envisagé est possible, sinon avertir le commis de lancement des conséquences pour les autres opérations. Le chargement effectué, le programme doit calculer le nouveau délai de commande, et mettre à jour le dossier de celle-ci.

- . Pour modifier le délai de début possible ou de fin d'exécution acceptable d'une commande, en tester les conséquences et mettre à jour le dossier comme ci-dessus.
 - . Pour enregistrer l'avancement de chaque opération (différée, disponible, en cours, interrompue, terminée)...
 - . Pour tester le délai d'exécution possible d'une nouvelle commande envisagée, sans l'entrer dans le fichier des commandes en cours.
 - . Pour modifier la disponibilité d'un poste de travail (par suite d'absence temporaire du titulaire ou au contraire, d'heures supplémentaires...).
- Editer les résultats utiles au commis de lancement, et ceux là seulement

Pas de listing systématique. Le commis de lancement doit pouvoir :

- . visualiser sur écran, ou sur une table traçante
- . faire imprimer les informations concernant :
 - une opération ;
 - une commande (en carnet, ou terminée depuis x jours) ;
 - un poste de travail ;

ou

- l'ensemble des commandes et opérations en carnet (ou terminées depuis x jours) ;
- l'ensemble des postes de travail.

7.3 - Organisation générale

Le programme comprend :

- 1) Des modules "utilitaires" : création de fichier machine, de calendrier etc...
- 2) Un module de placement des commandes qui permet de faire le placement d'un lot de commandes suivant l'un des trois modes de placement retenus, déjà décrits :
 - mode Régressif
 - mode Progressif
 - mode Régressoprogessif
- 3) Un module de placement qui permet de placer chaque commande une à une :
 - en placement progressif
 - en placement régressif
 - et en placement régressoprogessifet ce, cette fois à partir d'une opération quelconque de la commande

.../...

A titre d'exemple, le planificateur peut décider de placer d'abord une opération qui n'est ni la première ni la dernière, parce qu'elle passe sur un poste relativement très chargé, et à partir du placement choisi, il place en régressif (ou en régressoprogressif) les opérations antérieures à celle qu'il vient de placer, et, en progressif les opérations postérieures à celle placée la première.

Une telle manière de faire est plus souple et plus étendue dans son application que celles retenues dans le premier module de placement qui partent obligatoirement de la première ou de la dernière opération.

De plus, ce deuxième module de placement strictement conversationnel autorise un vaste programme d'essai commande par commande sans détermination a priori de règles de priorité (ci-après définies) sans imposer le même mode de placement pour une suite de commandes.

- 4) Aux deux modules de placement ci-dessus définis s'ajoutent un ensemble de modules de calcul des priorités de placement permettant de fixer l'ordre de placement en déterminant les critères que l'on retient et l'ordre de ces critères.

Rappelons que le mot priorité employé pour qualifier ces modules ne s'applique jamais à des "urgences" ou à des délais. Il s'agit seulement de définir la priorité de placement des commandes, c'est-à-dire l'ordre des commandes pour leur présentation successive au chargement du planning.

Ces modules de priorité sont employés pour un lot de commandes dont le chargement et le placement se font normalement sans interruption du traitement par l'ordinateur.

Les modules de priorité introduisent de nombreux tris avec des intervalles dont les bornes peuvent varier au gré de ceux qui effectuent les essais.

- 5) Enfin les modules destinées à faciliter la recherche : générateur de jeux d'essais, analyse des placements.

8 - PROBLEMES EXAMINES DANS L'ETUDE DE LA PLANIFICATION ASSISTEE

8,1 - Les deux types d'algorithmes de chargement

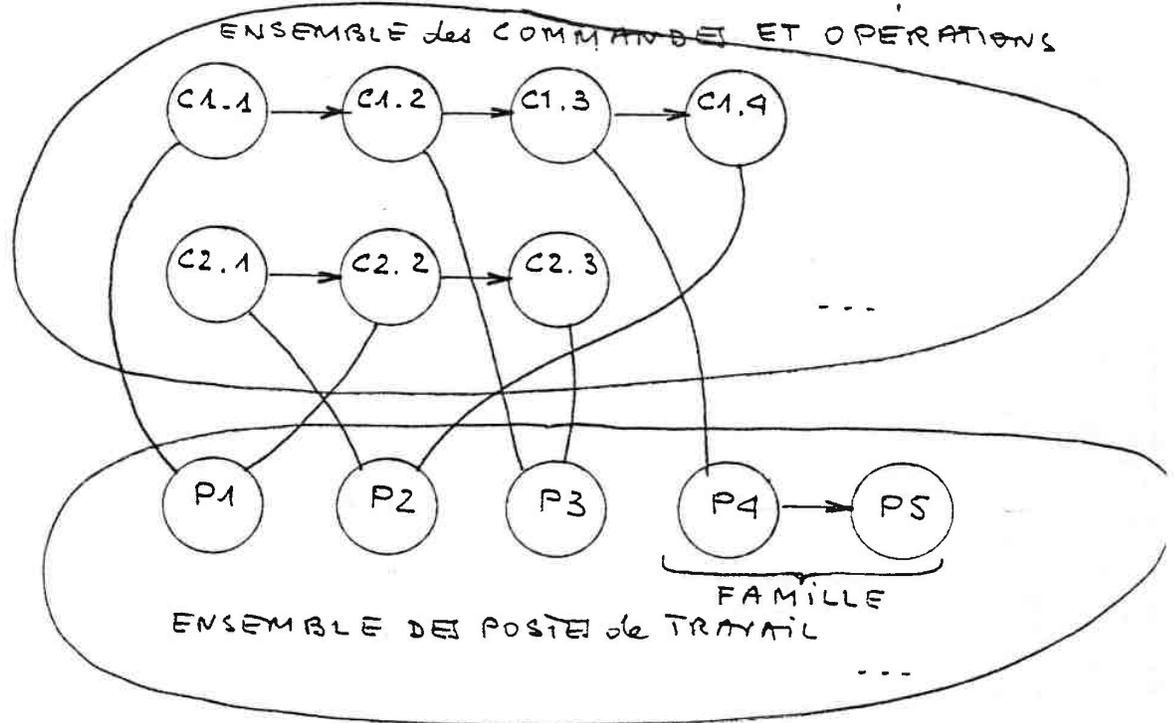
- Charger un carnet de commande sur les postes de travail d'un atelier revient à faire correspondre les éléments de 2 ensembles :
- . Celui des commandes, qui comporte des contraintes de succession temporelles entre les opérations d'une même commande.

.../...

. Celui des postes de travail indépendants ou liés par des contraintes de "préférence décroissante" dans une même famille.

- Cela peut se schématiser comme suit :

FIG. 18



- La loi de correspondance est telle que toute opération doit être affectée à 1 poste et 1 seul, et que deux opérations différentes ne puissent être affectées au même instant au même poste.
- On peut "a priori" faire l'application de l'un des ensembles dans l'autre dans un ordre quelconque. Deux catégories d'algorithmes systématiques apparaissent :
 - 1 - Rechercher successivement toutes les opérations à exécuter par un même poste : (Il faut pour cela déterminer préalablement un ordre de priorité entre machines et un ordre de priorité entre commandes).
 - 2 - Affecter successivement toutes les opérations d'une même commande aux divers postes puis traiter la commande suivante. (Il faut pour cela choisir préalablement un ordre de priorité entre les commandes).

.../...

. Nous avons, dans la présente recherche, développé un algorithme du 2e type, après avoir testé, par des essais manuels, les possibilités d'algorithmes du premier type. Toutefois, il n'est pas certain que ce choix soit le meilleur pour toutes les configurations des ensembles "commandes" et "postes", et nous avons entrepris l'approfondissement des recherches d'algorithmes du premier type. Les résultats ne peuvent encore être dégagés à ce jour. Décrivons toutefois rapidement un algorithme du premier type :

8,2 - Algorithme du premier type : recherche des opérations disponibles, par les postes de travail disponibles :

8,21 - Première voie systématique :

. Le principe en est le suivant :

- Un rang de priorité est attribué à chaque commande : par exemple fonction de sa date de fin, ou de sa marge libre, ou d'autres critères, ou combinaison de critères.
- Chaque opération de la commande est affecté de cette même priorité.
- Les opérations de toutes les commandes exécutables sur le même poste de travail (ou la même famille de postes de travail) sont classées, en fonction de leur priorité sur une même liste : il existe aussi une liste pour chaque famille de poste de travail.
- Les postes de travail sont classés également par priorité : par charge totale décroissante, par exemple.
- Lors du début de chargement, la 1er poste de la 1ère famille "examine" sa liste de priorité, et se charge de l'opération qui est à la fois :
 - . De la plus haute priorité.
 - . Disponible (au sens du § 4,14 ci-avant).
 - . Dont l'heure de disponibilité est \leq à l'heure de début.
- Le programme calcule alors l'heure de disponibilité de l'opération suivante de la même commande, et l'inscrit dans la case "ad-hoc" de celle-ci.
- Le 2e poste de la famille examine à son tour la liste, et se charge d'une opération etc...
- Tous les postes de toutes les familles se chargent aussi d'une opération.
- L'heure est incrémentée d'une unité.
- Le cycle recommence avec une 2e opération pour chaque poste...
- Lorsqu'un poste de travail ne trouve aucune tâche disponible à entreprendre dans sa liste de priorité, il inscrit un repère de disponibilité pour l'heure correspondante.

.../...

- . Ce cycle, décrit ci-dessus dans une exploration progressive des heures, peut aussi être conduit en régressif : le programme débute à l'heure de début d'opération au plus tard la plus élevée du carnet, et le compteur d'heures est décrémenté à chaque cycle.
- . Toutefois, le programme est rendu plus complexe par le fait que certaines opérations n'ont pas été chargées alors que l'heure du cycle est inférieure à leur JA : toutes les opérations de la commande correspondante sont alors effacées des diverses machines où elles étaient déjà chargées, et elles sont placées à nouveau en "progressif", à l'aide d'un algorithme chargeant la totalité de la commande.
- . Cet algorithme est analogue à celui utilisé par certains constructeurs d'ordinateurs pour maximiser le débit des processeurs de la machine.
- . Nous l'avons expérimenté, en "régressif" à l'aide d'un "tableau à bandes de carton" avec un jeu d'essai de 60 commandes et 10 machines, également chargées : les commandes de plus forte priorité étaient celles dont la date de fin au plus tard était la plus élevée, puis dont la marge libre par opération était la plus faible.
- . Les résultats de cet essai n'ont pas été satisfaisants : 26 % des commandes ne pouvaient être placées dans le mode régressif choisi, donc n'auraient été acceptées, en "progressif" qu'avec retards. Ceci pour des coefficients d'utilisation de postes de travail variant de 52 à 71 % avec une moyenne de 59 %.

8,22 - Seconde voie heuristique

- . Nous entreprenons actuellement des essais de cette méthode, à l'aide d'une combinaison de moyens informatiques et graphiques.
- . Les opérations de chaque commande sont triées par poste de travail par l'ordinateur, qui imprime un listing par poste où figure pour chaque opération : son numéro et celui de la commande, ses JAn , et JRn , sa marge libre totale ($JRn - JAn$) et une fraction de cette marge libre, attribuée par le planeur (par ex. : $\frac{JRn - JAn}{\text{Nbre d'opér.}}$)
- . L'ordinateur calcule également la charge par poste de travail.
- . Le planeur choisit le 1er poste à charger. Sur une feuille de papier quadrillé :
 - Il porte le temps en abscisse et des lignes libres en ordonnée, reporte graphiquement les positions dans le temps de toutes les opérations à charger sur cette 1ère machine : Durée de chaque opération, JAn , JRn et fraction de marge libre attribuée.
- . Ce graphique lui permet de charger "au mieux, à vue" les opérations sur le poste, en essayant de consommer le moins de marge libre possible.
- . Chaque décision est enregistrée dans l'ordinateur, qui charge le poste de travail, et calcule immédiatement le JOn des opérations liées à l'opération chargée.

.../...

- . Le planeur peut effacer facilement une décision déjà enregistrée afin de rectifier, d'améliorer et de parvenir par "essais et erreurs" à une solution qui lui paraît satisfaisante.
- . Il passe au 2e poste à charger etc...
- . On voit qu'il n'y a pas ici d'algorithme fixe pour l'attribution de priorité par machine, ni pour l'attribution de priorité par commande ou opération, ni pour le chargement lui-même : tout est conduit par décisions humaines. L'ordinateur prend en charge seulement les calculs secondaires. Une amélioration possible serait le remplacement de la feuille quadrillée par un écran graphique.
- . L'expérimentation de cette méthode n'est pas suffisamment avancée à ce jour pour que ses conclusions puissent être dégagées.

8,3 - Algorithmes du second type : Placement successif de chaque commande sur les postes de travail

C'est un algorithme de ce type que nous avons particulièrement développé. Rappelons qu'il suppose l'élaboration de règles d'attribution de priorité de placement :

- . Entre commandes.
- . Entre opérations d'une même commande.
- . Eventuellement entre machines (familles).

8,31 - Ordre de priorité de placement des commande entre elles

Le choix de cet ordre de priorité est important, pour obtenir un chargement satisfaisant de l'ensemble des commandes. En effet, le programme va placer une commande entière à la fois sur le planning. (Toutes les opérations de cette commande étant placées successivement). De plus, lorsqu'une commande a été ainsi placée, elle n'est plus dérangée pour permettre le placement des suivantes, afin d'éviter de déstabiliser le planning : on voit donc que l'ordre de placement des commandes est très important. Les premières chargées ont toutes chances de l'être très bien. Les dernières doivent s'insérer dans les "trous" laissés par les opérations déjà en place, et risquent des retards.

On doit donc utiliser un algorithme d'attribution de priorité, qui vise à placer en premier les commandes difficiles à "caser", et en dernier les faciles.

8,311 - Méthode générale

Il convient donc d'étudier les éléments influant sur la difficulté de placement d'une commande : une commande C est composée de N opérations O. Elle doit être placée sur le planning entre sa date au plus tôt JA et sa fin au plus tard FR, avec une marge libre = $FR - JA - (\sum \text{Durées opérations} + \sum \text{Durées de manutentions})$. Une opération de durée D, peut être exécutée sur M machines faisant partie d'une même famille.

Ce qui guide notre recherche, c'est de mieux appréhender la faisabilité d'un placement correct des opérations et des commandes d'un carnet. Nous développons ci-après l'approche qui se fonde sur la probabilité de trouver un "trou" convenable pour placer une opération. Nous pensons en examiner plus tard d'autres qui permettraient de mieux caractériser le carnet de commandes (cf. § 9,6 et 9,7).

Lors du placement d'une commande en mode progressif par exemple, on place successivement les opérations en commençant par la première. On essaye de placer chaque opération à partir d'une heure t de début au plus tôt imposée par le placement de l'opération précédente. La probabilité de trouver sur la famille de postes de travail concernés un "trou" convenant au placement de l'opération dans la marge de temps compris entre t et $(t + \Delta t)$ est fonction du nombre de postes de la famille, de leur charge, de la durée de l'opération à placer et de Δt .

Il s'agit de déterminer l'influence relative de chacun de ces paramètres sur la marge moyenne nécessaire à trouver un trou convenable au placement de l'opération. La somme des marges moyennes nécessaires au placement des différentes opérations composant la commande est égale à la marge moyenne nécessaire au placement de la commande. Cette marge moyenne "prévisionnelle" comparée à la marge libre de la commande permet de préjuger de la facilité de placement de cette commande et donc de lui affecter une priorité.

La démarche générale est la suivante :

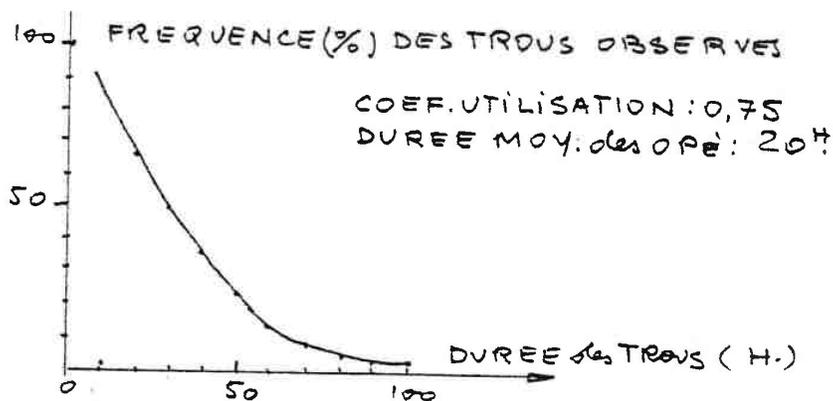
- Rechercher la probabilité de présence d'un trou de durée convenable au placement d'une opération sur une "ligne-machine" et pour cela rechercher d'abord la loi de distribution des trous dans un planning (§ 8.312)
- En déduire, par le calcul, l'intervalle de temps dans lequel on trouvera en moyenne un trou de durée convenable compte tenu de la charge de la machine : cet intervalle de temps est appelé "marge moyenne consommée dans le placement d'une opération" (§ 8.313)
- Chaque opération de la commande consomme ainsi une certaine marge. La somme de ces marges est comparée à la marge libre de la commande ; on en déduit si la commande doit être placée, alors que la charge des machines est faible, ou peut l'être lorsque la charge est forte ; c'est-à-dire qu'on détermine un ordre de priorité de placement des commandes sur le planning (§ 8.314)
- Nous détaillons ci-après ces différentes étapes et donnons un exemple numérique.

.../...

8,312 - Recherche d'une loi de répartition des trous dans un planning

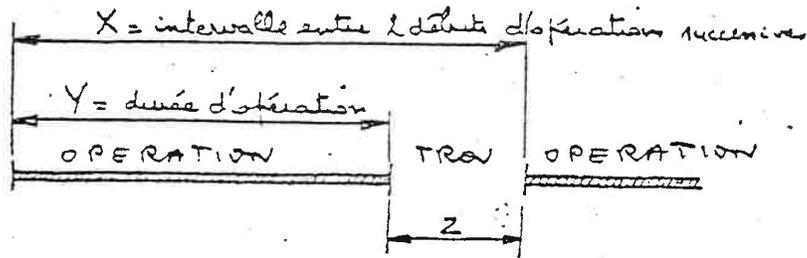
- . Les essais réalisés ont permis de constater des lois de répartition des trous par durée : l'allure des courbes de répartition est donnée ci-après :

Fig. 20



- . En nous appuyant sur le calcul ci-après développé par Monsieur le Professeur DEPAIX, nous avons comparé les résultats d'essais, à ceux donnés par ce calcul : l'allure des courbes obtenues par le calcul et de celles des résultats d'essai apparaît assez voisine. Nous effectuons des tests pour essayer de mesurer leur corrélation.

Fig. 21



X suit une loi de densité $f_X(x)$ sur l'intervalle $[0, \theta]$

Y suit une loi de densité $f_Y(y)$ sur l'intervalle $[0, \theta]$

Hypothèse X et Y sont deux variables indépendantes

Problème posé

déterminer la loi de distribution de $Z = X - Y$ conditionnée par le fait que X doit être supérieur à Y , en qu'on notera

loi de $X - Y / X > Y$

— Désignons par $f_Z(z)$ la densité de cette loi conditionnelle.

On a par définition

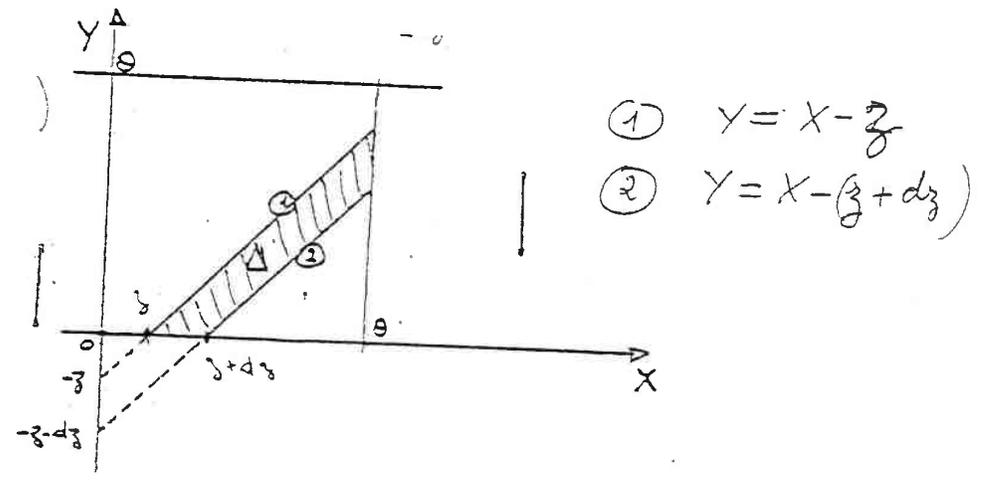
$$\begin{aligned} f_Z(z) dz &= P(z < Z < z + dz / X > Y) \\ &= P(z < X - Y < z + dz / X > Y) \end{aligned}$$

On sait que $P A / B = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$

donc que $f_Z(z) dz = \frac{P(z < X - Y < z + dz \text{ et } X > Y)}{P(X > Y)}$

1°) Calcul de
 $P(z < X - Y < z + dz \text{ et } X > Y)$
 dans l'intervalle $(0, \theta)$

Fig. 22



$z > 0 \rightarrow \Delta \equiv$ domaine étudié

$$P(z < X - Y < z + dz \text{ et } X > Y) = \iint_{\Delta} g(x, y) dx dy$$

$g(x, y) =$ densité du couple $=$ produit de densités marginales
 (car X et Y sont indépendants.)

d'où $P(z < Z < z + dz \text{ et } X > Y) = \iint_{\Delta} f_x(x) \cdot f_y(y) dx dy$

$$= \int_z^{\theta} f_x(x) dx \int_{x-z-dz}^{x-z} f_y(y) dy$$

$$f_y(x-z) dz$$

(application du théorème de la moyenne (4.2) sous de 2 intégrales sur infinitésimales voisines)

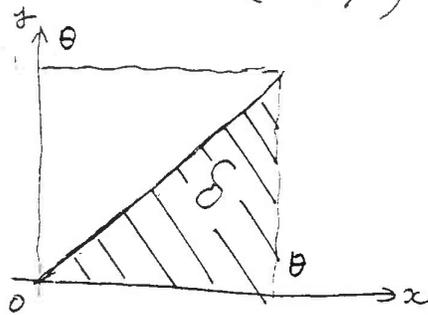
$$= dz \int_z^{\theta} f_x(x) f_y(x-z) dx$$

d'où la densité conditionnelle de z

(1) $f_z(z) = \frac{1}{P(X > Y)} \int_z^{\theta} f_x(x) \cdot f_y(x-z) dx$ si $0 < z < \theta$
 $= 0$ si $z > \theta$ ou $z < 0$

2°/ Calcul de $P(X > Y)$

Fig. 23



l'événement $\{X > Y\}$ est représenté par δ donc

$$P(X > Y) = \iint_{\delta} f_X(x) f_Y(y) dy dx$$

$$= \int_0^{\theta} f_X(x) dx \underbrace{\int_0^x f_Y(y) dy}_{F_Y(x)}$$

en désignant par $F_Y(x)$ la fonction de répartition de la loi de probabilité de Y

Donc [de (1)]

$$f_Z(z) = \begin{cases} \frac{\int_z^{\theta} f_X(x) f_Y(x-z) dx}{\int_0^{\theta} f_X(x) F_Y(x) dx} & \text{si } 0 < z < \theta \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

Remarque, on peut écrire également

$$P(X > Y) = \int_0^{\theta} f_Y(y) dy \underbrace{\int_y^{\theta} f_X(x) dx}_{F_X(\theta) - F_X(y)}$$

ou $(1 - F_X(y))$

$$(2) P(X > Y) = 1 - \int_0^{\theta} f_Y(y) F_X(y) dy$$

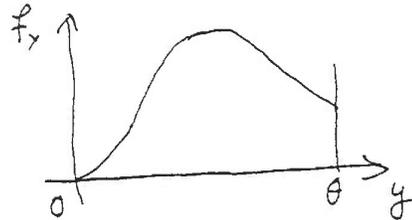
Hypothesis

X suit une loi de répartition uniforme de densité

(3)
$$f_X(x) = \frac{1}{\theta}$$

Une densité empirique de Y écart de la forme

Fig. 24



on propose d'utiliser

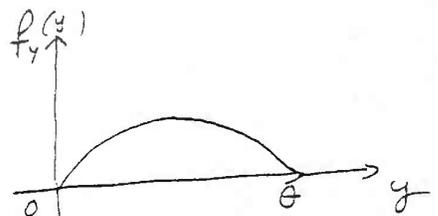
(4)
$$f_Y(y) = \begin{cases} K y^{p-1} (\theta - y)^{q-1} & \text{avec } p > 0 \\ & q > 0 \\ & \text{si } 0 < y < \theta \\ - \text{sinon } f_Y(y) = 0 \end{cases}$$

Ce modèle permet d'approcher une loi tronquée avec 3 paramètres θ, p, q .

Si on pose

$p = 2$
 $q = 2$
 $B(2, 2) = \frac{1}{6}$

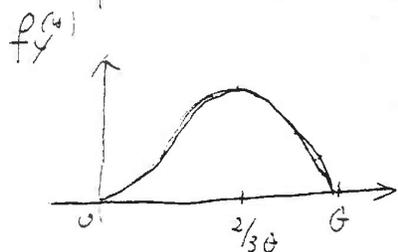
$$f_Y(y) = \frac{6y(\theta - y)}{\theta^3}$$



$p = 3$
 $q = 2$

$B(3, 2) = \frac{1}{12}$

$$f_Y(y) = \frac{12y^2(\theta - y)}{\theta^4}$$



Détermination de K

Par définition; on a $\int_0^{\theta} K \cdot y^{p-1} \cdot (\theta - y)^{q-1} dy = 1$

soit en posant $y = \theta t$

$$\int_0^1 K \theta^{p-1} t^{p-1} (\theta - \theta t)^{q-1} \theta dt = 1$$

$$K \theta^{p+q-1} \int_0^1 t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt = 1$$

$B(p, q)$

fonction bêta de 2^e esp

on a $B(p, q) = \frac{\Gamma(p) \cdot \Gamma(q)}{\Gamma(p+q)} = \frac{\overset{\text{si } p, q \text{ entiers}}{(p-1)! (q-1)!}}{(p+q-1)!}$

(5) On a donc $K = \frac{1}{\theta^{p+q-1} \cdot B(p, q)}$

Calcul de $P(X > Y)$

$$\text{Ici } F_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \\ \frac{x}{\theta} & \text{si } 0 < x < \theta \\ 1 & \text{si } \theta \leq x \end{cases}$$

[2] a (5) donc $P(X > Y) = 1 - \int_0^{\theta} \frac{1}{\theta^{p+q-1} B(p, q)} y^{p-1} (\theta - y)^{q-1} \frac{y}{\theta} dy$

$$= 1 - \frac{1}{\theta^{p+q} B(p, q)} \int_0^{\theta} y^p (\theta - y)^{q-1} dy$$

En posant $y = \theta t$ dans l'intégrale, on obtient

$$\begin{aligned} P(X > Y) &= 1 - \frac{1}{\theta^{p+q} \cdot B(p, q)} \int_0^1 \theta^p t^p (\theta - \theta t)^{q-1} \theta dt \\ &= 1 - \frac{1}{B(p, q)} \int_0^1 t^p (1-t)^{q-1} dt = 1 - \frac{B(p+1, q)}{B(p, q)} \\ &= 1 - \frac{\Gamma(p+1) \Gamma(q)}{\Gamma(p+q+1)} \cdot \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p) \Gamma(q)} = 1 - \frac{p}{p+q} = \frac{q}{p+q} \end{aligned}$$

que p et q soient entiers ou non.

$f_z(z)$ devient

$$f_z(z) = \frac{p+q}{q} \times \frac{1}{\theta} \int_z^\theta \frac{1}{\theta^{p+q-1} B(p,q)} \cdot (x-z)^{p-1} (\theta-x+z)^{q-1} dx$$

et en posant $x = z + t(\theta-z)$

$$f_z(z) = \frac{p+q}{q} \times \frac{1}{\theta} \int_0^1 \frac{1}{\theta^{p+q-1} B(p,q)} t^{p-1} (\theta-z)^{p-1} (\theta-t(\theta-z))^{q-1} (\theta-z) dt$$

Hypothèse q entier \rightarrow d'où

le développement suivant la formule du binôme

$$[(-t(\theta-z) + \theta)]^{q-1}$$

$$f_z(z) = \frac{p+q}{q} \frac{(\theta-z)^p}{\theta^{p+q} B(p,q)} \cdot \int_0^1 t^{p-1} \left(\sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^\lambda (-1)^\lambda (\theta-z)^\lambda t^\lambda \theta^{q-1-\lambda} \right) dt$$

$$= \frac{p+q}{q} \sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^\lambda (-1)^\lambda \frac{(\theta-z)^{p+\lambda}}{\theta^{p+1-\lambda} B(p,q)} \underbrace{\int_0^1 t^{p+\lambda-1} dt}_{\frac{1}{p+\lambda}}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \text{d'où } f_z(z) &= \frac{p+q}{q} \frac{1}{B(p,q)} \sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^\lambda \frac{(-1)^\lambda (\theta-z)^{p+\lambda}}{\theta^{p+1-\lambda}} \\ &= 0 \text{ sinon} \end{aligned} \right.$$

si $0 < z < \theta$

$$f_z(z) = \frac{1}{\theta} \frac{p+q}{q} \frac{1}{B(p,q)} \left(1 - \frac{z}{\theta}\right)^p \sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^\lambda \frac{(-1)^\lambda}{p+\lambda} \left(1 - \frac{z}{\theta}\right)^\lambda$$

Si p est entier, on obtient une loi polynomiale

Rappel de l'hypothèse sur y

$$f_y(y) = \frac{1}{\theta^{p+q-1} B(p,q)} y^{p-1} (\theta-y)^{q-1} \text{ si } 0 < y < \theta$$

$$E(z^\mu) = \frac{p+q}{q} \cdot \frac{1}{B(p,q)} \sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^{\lambda} \frac{(-1)^\lambda}{p+\lambda} \frac{1}{\theta^{p+\lambda+1}} \int_0^\theta z^\mu (\theta-z)^{p+\lambda} dz$$

Si $z = \theta v$

l'intégrale s'écrit

$$\int_0^1 \theta^\mu v^\mu (\theta - \theta v)^{p+\lambda} \theta dv$$

$$E(z^\mu) = \frac{p+q}{q} \frac{1}{B(p,q)} \sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^{\lambda} \frac{(-1)^\lambda}{p+\lambda} \theta^\mu B(\mu+1, p+\lambda+1)$$

Si $\mu = 1$

$$E(z) = \theta \frac{p+q}{q} \frac{1}{B(p,q)} \sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^{\lambda} \frac{(-1)^\lambda}{p+\lambda} B(2, p+\lambda+1)$$

$$\text{or } B(2, p+\lambda+1) = \frac{\Gamma(2) \Gamma(p+\lambda+1)}{\Gamma(p+\lambda+3)} = \frac{1}{(p+\lambda+2)(p+\lambda+1)}$$

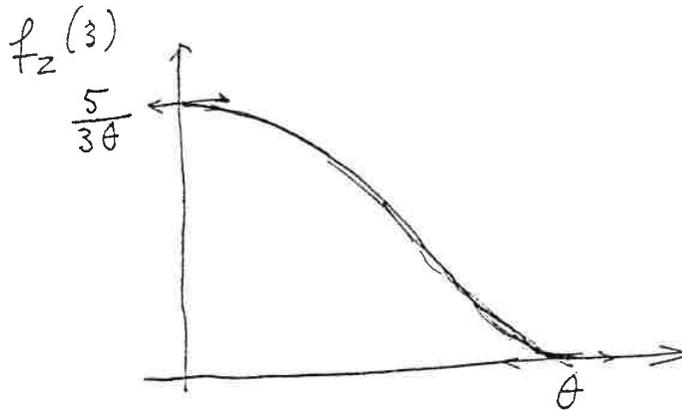
$$E(z) = \theta \frac{p+q}{q} \frac{1}{B(p,q)} \sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^{\lambda} \frac{(-1)^\lambda}{(p+\lambda)(p+\lambda+1)(p+\lambda+2)}$$

En posant $p=2$
 $q=3$

$$B(2,3) = \frac{1}{12}$$

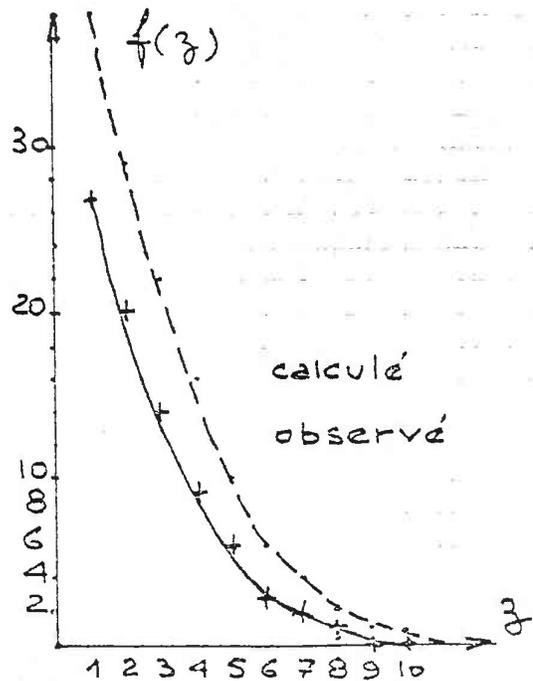
$$f_z(z) = \frac{5}{3} \times 12 \left(\frac{1}{2} \frac{(\theta-3)^2}{\theta^3} - \frac{2(\theta-3)^3}{3\theta^4} + \frac{1}{4} \frac{(\theta-3)^4}{\theta^5} \right)$$

$$= \frac{5}{3} \cdot 12 \frac{(\theta-3)^2}{\theta^3} \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{3} \frac{(\theta-3)}{\theta} + \frac{(\theta-3)^2}{4\theta^2} \right)$$



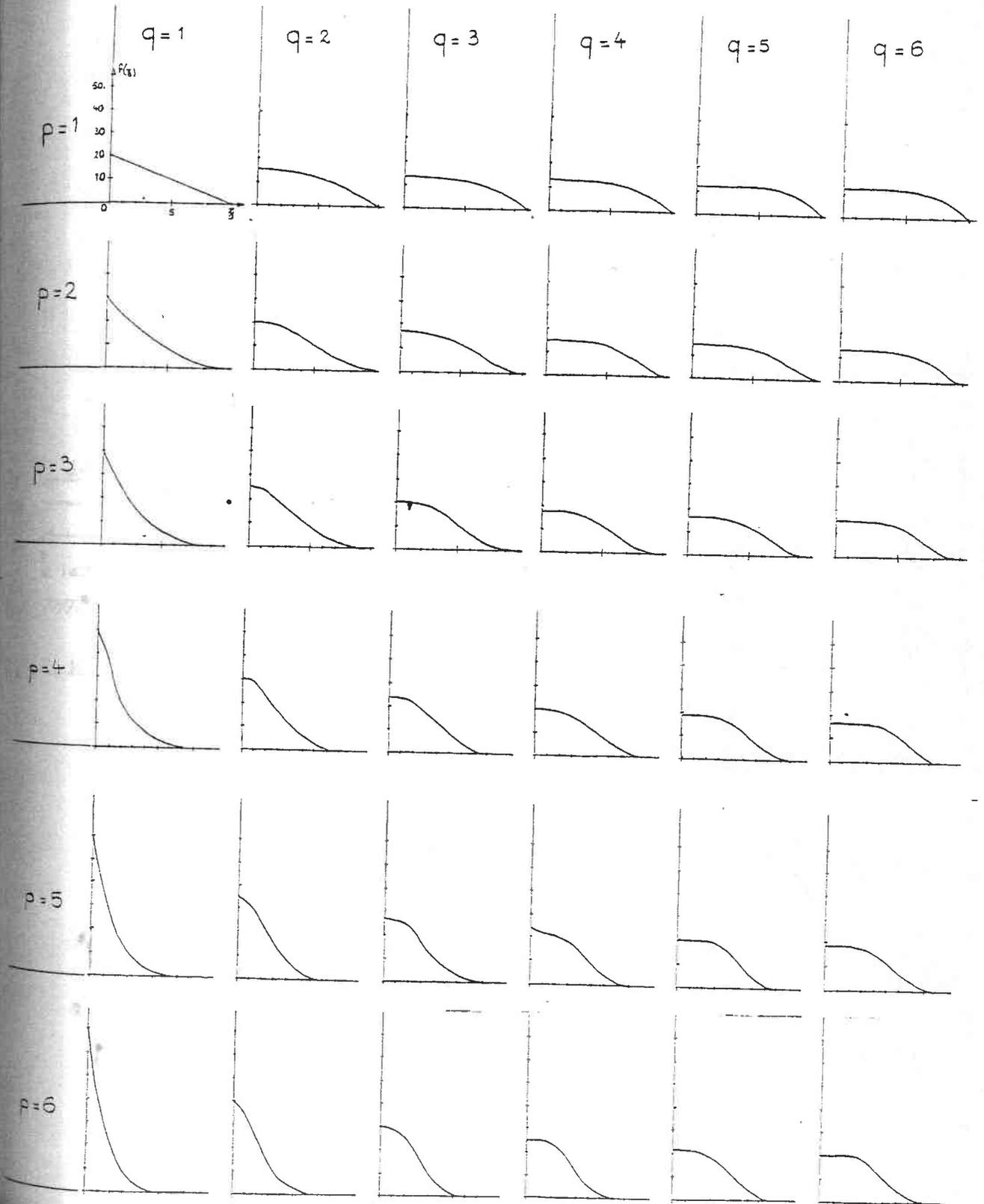
- Un programme de calcul de $f(z)$ permettant de choisir p et q quelconques, a été établi (voir ci-après).
- Avec $p=3$ et $q=1$ on obtient une distribution théorique très voisine des distributions observées. Exemple ($\theta=11$).

z	f(z)	
	Observée	Calculée
10	1	0
9	1	0
8	2	1
7	4	2
6	6	3
5	10	6
4	16	9
3	22	14
2	29	20
1	38	27



Évolution de $f(z)$

Nous avons construit des familles de courbes, pour des valeurs combinées de p et q allant de 1 à 13. Ce sont des courbes uniformément décroissantes pour les valeurs de p et $q \ll$



8,313 - Calcul de la latitude de placement moyenne consommée dans le placement d'une opération

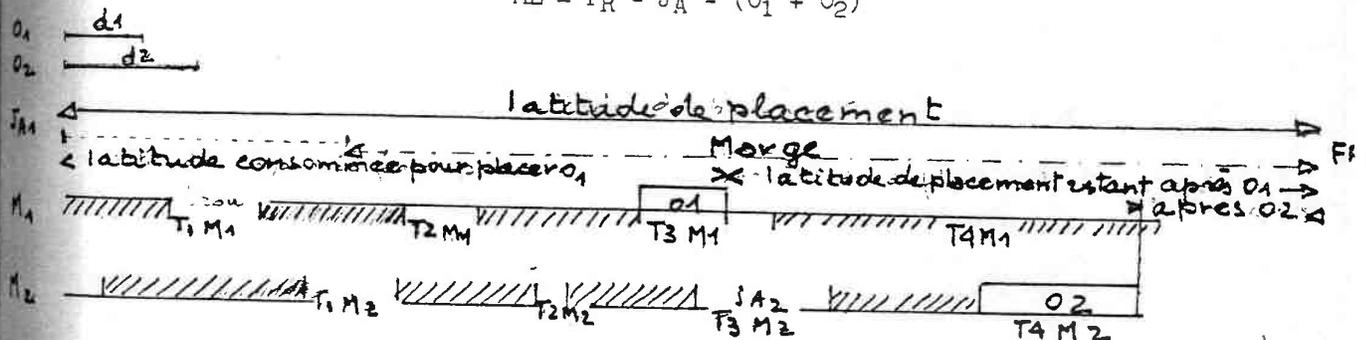
Pour guider le chargement d'un planning, c'est-à-dire chaque placement d'une opération d'une commande, il a paru utile de calculer les chances de placer une opération dans un planning déjà chargé, donc composé pour chaque machine, d'une succession d'opérations placées et de "trous".

Cette voie de recherche a pour objet de se faire une idée de la difficulté de placement d'une opération et de la "perte de marge" qui en résultera lorsque ce placement est possible.

Soit une commande composée de 2 opérations O_1 et O_2 à placer entre les dates J_A et F_R (date de début au plus tôt de O_1 et date de fin de la commande) sur 2 machines M_1 et M_2 dont le chargement se présente comme suit entre les dates J_A et F_R .

Nous appelons latitude de placement $F_R - J_A$ la marge ML est égale à la latitude de placement diminuée des durées d'opérations.

$$ML = F_R - J_A - (O_1 + O_2)$$



Nous examinons le cas du chargement en "mode progressif" donc en chargeant d'abord O_1 , puis O_2 , à partir de J_A (un raisonnement analogue peut être fait en "mode régressif").

Essayons de placer O_1 . Essayons d'abord le 1er trou (T_1 de M_1) puis le 2e trou (T_2 de M_1), le placement est impossible, trou trop petit.

Essayons le trou T_3 de M_1 , nous pouvons placer O_1 et nous la plaçons, au plus tôt, puisque nous sommes en mode progressif. O_1 se termine à une date qui est le J_{A2} de l'opération O_2 .

A partir de ce J_{A2} , essayons de placer O_2 : échec sur T_3 de M_2 , succès sur T_4 de M_2 .

.../...

La date de fin d'exécution J_{R2} de O_2 est antérieure à la date de fin d'exécution désirée F_R .

Dans notre exemple, la latitude de placement n'a pas été complètement consommée.

Si on considère un planning déjà chargé avec un lot de commandes, on peut chercher la probabilité de placer une opération de durée D sur ce planning.

Ceci revient à chercher la probabilité de placer une opération de durée D dans un trou de longueur D_t

$$P(D_t > D) = 1 - F_z(D)$$

avec les hypothèses que nous avons faites pour représenter la fonction F cf. pages 50 et suivantes

$$F_z(D) = \frac{p+q}{q} \frac{1}{B(p,q)} \sum_{\lambda=0}^{q-1} C_{q-1}^{\lambda} \frac{(-1)^{\lambda}}{(p+\lambda)(p+\lambda+1)} \left(1 - \frac{D}{\theta}\right)^{p-\lambda+1}$$

Si on se reporte au graphique que nous venons de présenter, on voit que lorsque, à partir du J_A de l'opération, on effectue un premier placement, ce J_A peut se trouver soit au milieu d'un trou, soit au milieu d'une opération : la probabilité d'apparition de ce début au plus tôt peut être considérée comme suivant une loi uniforme sur $(0 - \theta)$.

On montre alors que pour le 1er essai de placement la perte de latitude de placement est en moyenne égale à :

$\frac{D_0 + D_{tm}}{2}$ où D_0 est la durée moyenne des opérations de l'ensemble des commandes

D_{tm} est la durée moyenne des trous.

Pour chaque placement tenté après le 1er essai, la perte de latitude de placement est, en moyenne, égale à $D_0 + D_m$.

Appelons π la probabilité de placer l'opération de durée D au 1er essai.

On voit que la probabilité de réussir un placement au bout de K essais est :

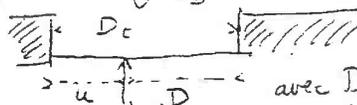
$$(1 - \pi) \cdot (1 - \pi)^{K-2} \cdot \pi$$

.../...

Nous calculons $\bar{\pi}$ qui est la probabilité de réussir au 1er essai.

Soit $f(z)$ la fonction de répartition des trous
 $\pi = P(U + D < D_t)$

$$\pi = \int_0^\theta dz \int_0^{z-D} f(z) \frac{1}{\theta} du = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta F(z-D) dz$$

$F(z-D)$, primitive de $f(z-D)$  avec $D_t = D + u$
 u uniforme sur $0, \theta$

Le calcul de π' a déjà été fait.

$$\pi' = F_z(D)$$

Nous en avons donné plus haut une expression.

Il est possible de déterminer les paramètres p et q de cette expression en sachant que, θ étant donné, au plus égal à la durée D_t du planning, une des conditions est fournie par la moyenne $E(z)$.

$$E(z) = \frac{\theta (q + 1)}{2 (p + q + 1)}$$

Nous disposons donc de π et de π' pour effectuer le calcul du nombre d'essais R probables nécessaires pour placer une opération de durée D .

$$E(n) = \sum_{k=2}^{\infty} K (1 - \pi')^{k-2} \frac{1}{\pi'}$$

Le calcul montre que cette expression vaut $\frac{1}{\pi}$

Si on tient compte du premier placement :

$$E(n) = \frac{1 - \pi}{\pi} = K$$

nous obtenons ainsi le nombre K d'essais probables pour placer l'opération de durée D .

On peut alors pour chaque commande calculer la latitude de placement utilisée.

On peut alors pour chaque commande calculer la latitude de placement utilisée.

Pour le 1er essai de placement, on consomme

$$\frac{D_0 + D_{tm}}{2}$$

.../...

Dtm étant la durée moyenne des trous.

Pour les autres essais, on consomme Do + Dtm.

Lorsque K essais doivent être faits, la consommation de la latitude de placement est :

$$\frac{D_o + D_{tm}}{2} + (D_o + D_{tm}) (K - 1) = \frac{D_o + D_{tm}}{2} (2 K - 1)$$

Pour un calcul approché (et dans la mesure où l'on peut considérer les trous comme indépendants), on peut ajouter les latitudes de placement consommés par chaque opération d'une commande pour avoir la latitude de placement consommée par le placement de la commande.

$$\Delta T = \sum_{\text{opérations}} \frac{(D_o + D_{tm})}{2} \times (2K - 1)$$

afin de comparer cette expression à la latitude de placement $F_R - J_A$ offerte.

Cette latitude $F_R - J_A$ pouvant être augmentée d'une valeur R attribuée par le planificateur comme "durée de retard admissible".

La latitude de placement ΔT nécessaire comparée à $F_R - J_A - R$ exprime un critère de placement :

$$\Delta T - (F_R - J_A - R)$$

que l'on peut employer pour fixer l'ordre de priorité de placement de commandes sur un planning déjà chargé.

Nota : En vue de recouper les démarches précédemment décrites avec les caractéristiques globales d'un planning, nous avons voulu calculer la durée moyenne d'un "trou" en fonction de la charge moyenne du planning (Cm) sur une période de planification Dp.

Un calcul établit que, sous réserve que les "trous" puissent être considérés comme indépendants, la relation ci-après est vraie

$$(1 - C_m) \times D_p = E(N) \times E(D_t) = N \times D_{tm}$$

avec Dt durée d'un trou
Dtm durée moyenne d'un trou
N nombre de trous.

8,32 - Modes de placement d'une commande

8,321 - Présentation générale

Le programme exécute automatiquement un certain nombre de manoeuvres, que chercherait à faire un bon agent de planning.

S'il n'obtient pas un résultat satisfaisant, il le signale à l'agent de lancement, et lui fournit des informations et des possibilités d'intervention directes, aussi nombreuses que possible, pour améliorer ce résultat.

Les manoeuvres automatiques sont, en résumé, les suivantes :

- . Classement relatif de chaque commande dans l'ensemble du carnet de manière à charger d'abord les commandes qui sont considérées comme les plus difficiles à placer et ensuite les plus faciles : cela aboutit au calcul automatique d'un ordre de priorité des commandes comme nous l'avons vu précédemment, priorités que l'agent de lancement peut connaître, et modifier à volonté
- . Chargement des commandes, une à une, sur les postes de travail. Pour cela, 4 modes sont possibles, au choix de l'agent de lancement :
 - régressif
 - progressif
 - "régresso-progressif"
 - "manuel"

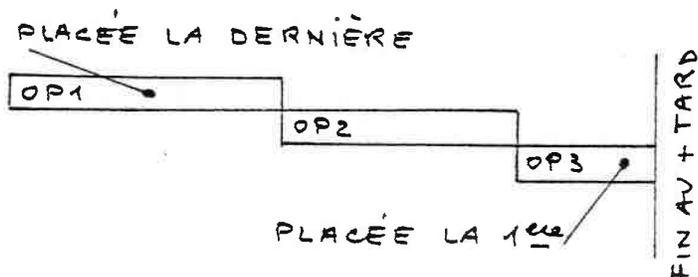
Ces manoeuvres sont les suivantes :

8,322 - Chargement régressif

Il vise à réduire au maximum les stocks de pièces en attente d'assemblage.

Les manoeuvres exécutées par le programme sont les suivantes dans ce cas :

- 1) Il place les opérations, "en régressif", à partir de la date au plus tard de la dernière opération et ceci, sans intervalle inutile entre opérations.
Chaque opération débute ainsi à son "jour au plus tard J.R."



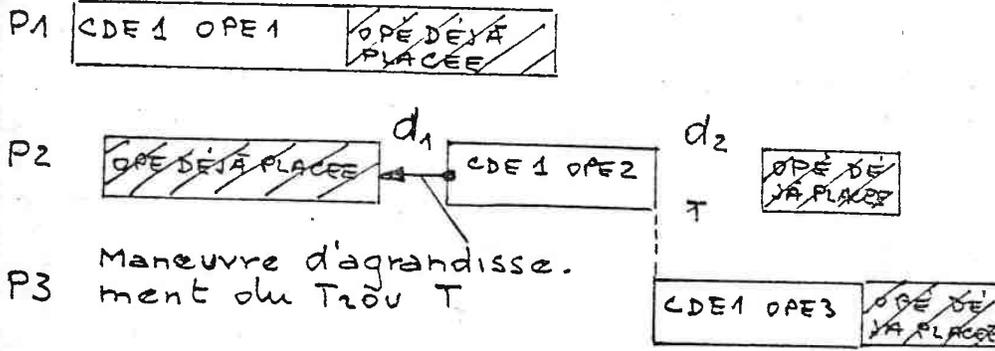
.../...

- 2) Si ce placement "au plus tard" d'une opération n'est pas possible sur le 1er poste de la famille, il essaye les autres postes de la même famille. Il retient le poste qui donne le début le plus tardif.
- 3) Si, même après la manoeuvre (2), il n'arrive pas à placer chaque opération à son J.R., il essaye à tout le moins de la placer entre son "début au plus tôt" (JA 1) et sa fin au plus tard, en resserrant au maximum le délai d'exécution.
- 4) S'il n'arrive pas à placer la commande dans cet intervalle, il reprend le placement en régressif, mais en essayant d'insérer des opérations d'une durée T dans des trous de durée $t < T$. Cela revient à admettre que les postes de travail concernés feront T - t heures supplémentaires pour exécuter l'opération ou encore, à admettre que l'évaluation des temps d'exécution permet d'escompter la réalisation du travail à ce poste dans le temps t, et non T. (1)
- Le rapport $\frac{t}{T}$ peut être fixé à l'avance, pour chaque type de poste.
Par exemple : $\frac{t}{T} \geq 0,8$.
- 5) Si la commande ne peut encore être insérée entre JA 1 et JR, il teste les opérations pour lesquelles un "chevauchement" a été admis par le commis de lancement, et tente à nouveau le placement en régressif, avec ce chevauchement, et en utilisant la manoeuvre (4).
- 6) Enfin, si aucune de ces manoeuvres ne réussit, il place la commande "en progressif" à partir de son jour de début au plus tôt JA en utilisant les manoeuvres (4) et (5) ; mais, dans ce cas, la commande subira un retard de fin d'exécution.
- 7) Enfin, lorsque toutes les opérations sont placées, le programme procède à "l'agrandissement des trous", de tous les postes de travail concernés par la commande.

"L'agrandissement des trous" est une manoeuvre visant à remplacer 2 trous, de durée d1 et d2, situés de part et d'autre d'une opération, par un seul trou, de durée d1 + d2 situé soit à droite, soit à gauche de cette opération. En effet, cela augmente la probabilité de pouvoir placer une opération ultérieure.

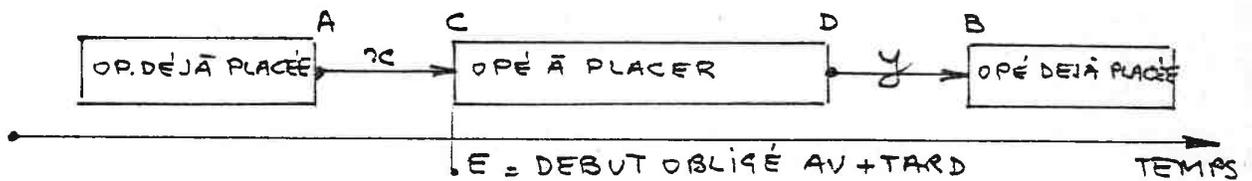
Cet agrandissement des trous peut intervenir dans le cas suivant :

L'évaluation des temps d'exécution peut être obtenue avec plus ou moins de précision, suivant que l'on prend ou non en compte certains aléas du travail, que l'allure du personnel exécutant peut ou non varier de façon sensible, que les bases de temps servant au planificateur ont été établies sur une mesure sérieuse du travail, sur des observations fragiles et imprécises ou encore sur des estimations non vérifiées.



L'opération 2, placée en régressif, crée 2 trous de durée d_1 et d_2 . En la faisant glisser vers la gauche, on ne modifie pas la date de fin de la commande 1, mais le trou T est agrandi : sa durée devient $d_1 + d_2$.

Au cours des manoeuvres de placement, le programme doit non seulement reconnaître s'il est possible ou non de placer une opération dans un trou, mais si ce placement est possible, il doit reconnaître le "cas topologique" afin de permettre de reconnaître les "trous" et les opérations du poste de travail : les "cas topologiques" sont les suivants :

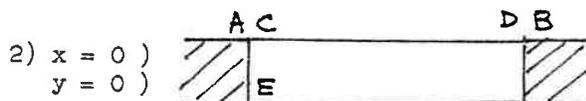


On pose : $C - A = x$

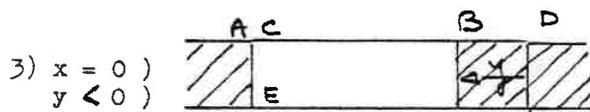
$B - D = y$

Les "cas topologiques" de placement sont les suivants :

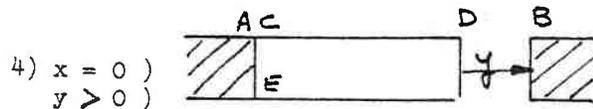
1) $x < 0$: Placement impossible car on commencerait plus tard que la date au plus tard.



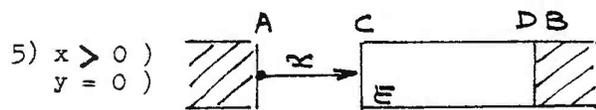
Cas n° 1 de placement :
l'opération remplit complètement le trou



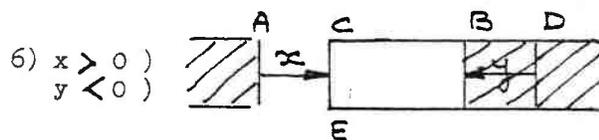
Trou trop petit : placement impossible



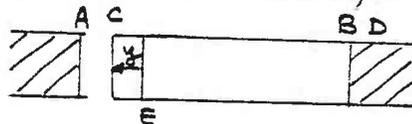
Cas n° 2 de placement :
reste un trou à droite



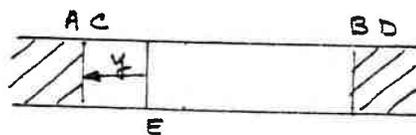
Cas n° 3 de placement :
reste un trou à gauche



6.1) . Si $|x| > |y|$: le trou est assez grand, mais il faut reculer l'opération vers la gauche, de y : cas n° 4 de placement

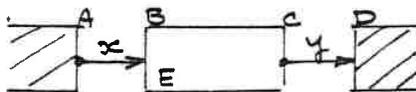


6.2) . Si $|x| = |y|$: le trou est juste assez grand, il faut reculer l'opération vers la gauche, de y : cas n° 5 de placement



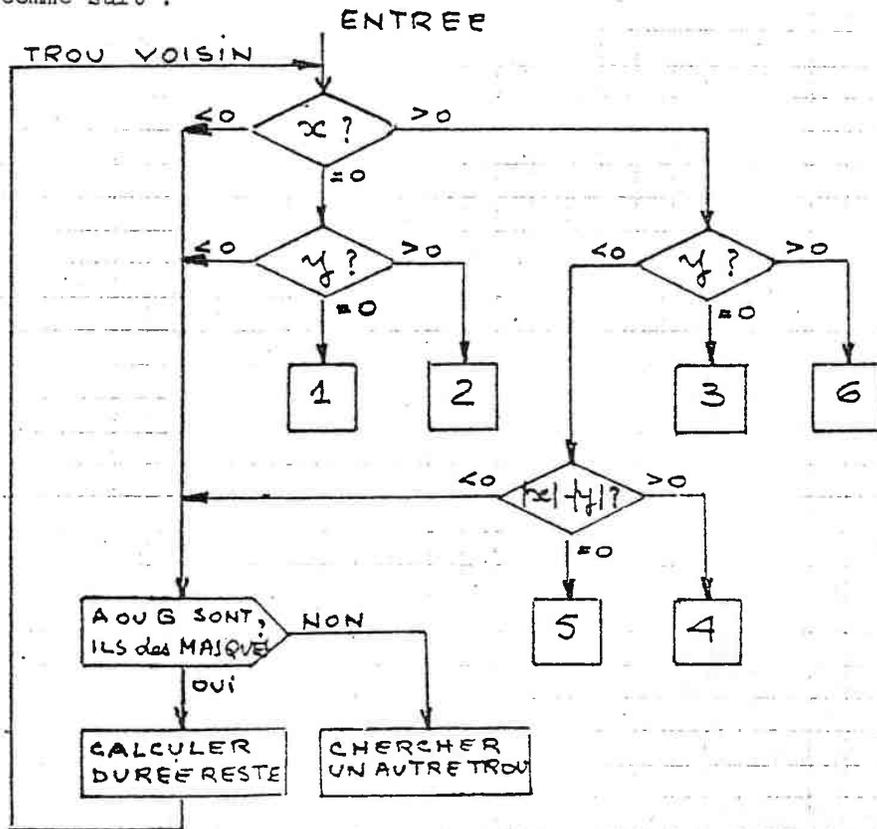
6.3) . Si $|x| < |y|$: trou trop petit - placement impossible.

7) $x > 0$)
 $y > 0$)



Cas n° 6 de placement :
 reste un trou à droite
 et un à gauche.

Les tests de placement peuvent alors être organisés
 comme suit :



On voit qu'il faut 2 tests, dans les cas 1, 2, 3 et 6 et 3 tests dans les cas 5 et 4 pour vérifier si un "trou" peut accueillir une opération, et le "cas topologique" correspondant.

.../...

8,323 - Chargement progressif

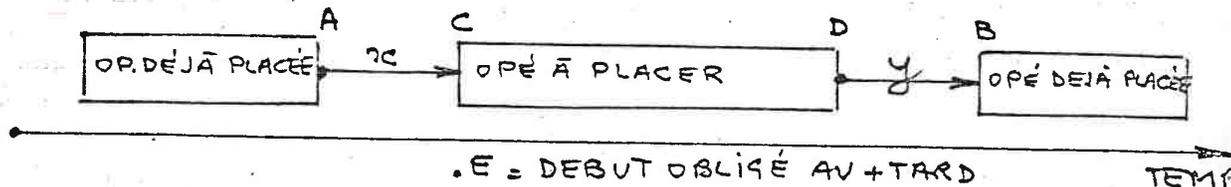
Ce type de chargement est utilisé dans 2 cas :

- de manière "subie" lorsque l'essai de chargement régressif d'une commande aboutit à ce qu'une des opérations ne puisse être chargée avant son J.A. (comme vu plus haut) : on abandonne alors l'essai de placement en régressif, pour placer en progressif à partir du J.A. 1 : la commande subira un retard ;
- de façon délibérée, pour charger au plus vite les postes de travail, quitte à subir une augmentation d'en-cours de produits finis en magasins.

Les manoeuvres réalisées automatiquement par le programme sont de même nature que dans le chargement "régressif" (voir 8,322) :

- Placement en progressif à partir de la date au plus tôt de la 1ère opération
- Essai éventuel de divers postes d'une famille pour trouver la date de placement la plus faible possible
- Essai de placement dans des trous plus petits (avec heures supplémentaires)
- Essai de chevauchement .
- Enfin, agrandissement des trous.

Là aussi le programme doit repérer les "cas topologiques" de placement, qui sont les suivants :



On pose : $C - A = x$
 $B - D = y$

Les "cas topologiques" de placement sont les suivants :

1) $y < 0$: Placement impossible, car on devrait débiter plus tôt que la date au plus tôt.

2) $y = 0$) $x = 0$) Cas n° 1 de placement : l'opération remplit complètement le "trou"

3) $y = 0$) $x < 0$) Trou trop petit, placement impossible

4) $y = 0$) $x > 0$) Cas n° 3 de placement : reste un trou à gauche

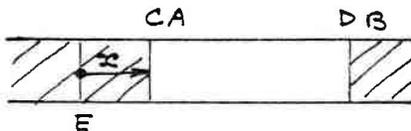
5) $y > 0$) $x = 0$) Cas n° 2 de placement : reste un trou à droite

6) $y > 0$) $x > 0$) Cas n° 6 de placement : reste un trou à droite et un à gauche

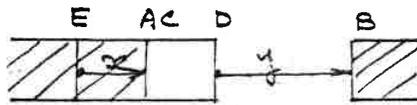
7) $y > 0$) $x < 0$)

7.1) . Si $|x| < |y|$: trou trop petit, placement impossible.

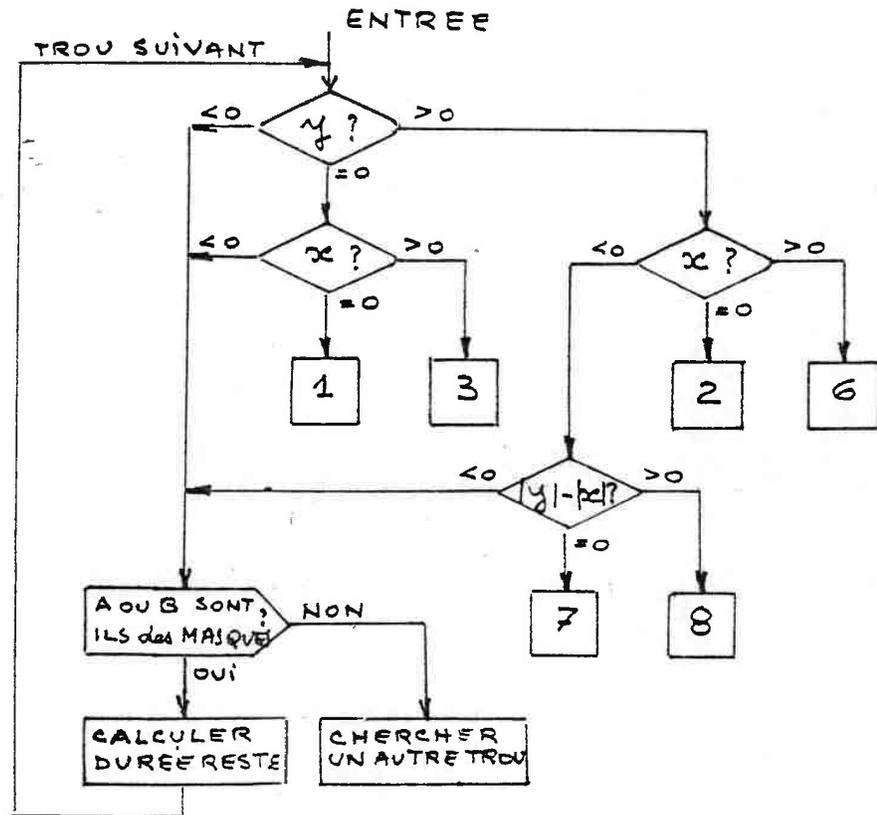
7.2) . Si $|x| = |y|$: le trou est assez grand, mais il faut repousser l'opération vers la droite, de x : c'est le cas n° 7 de placement



7.3) . Si $|x| < |y|$: trou assez grand. Il faut repousser l'opération de x vers la droite : c'est le cas n° 8 de placement



Les tests de placement peuvent alors être organisés comme suit :

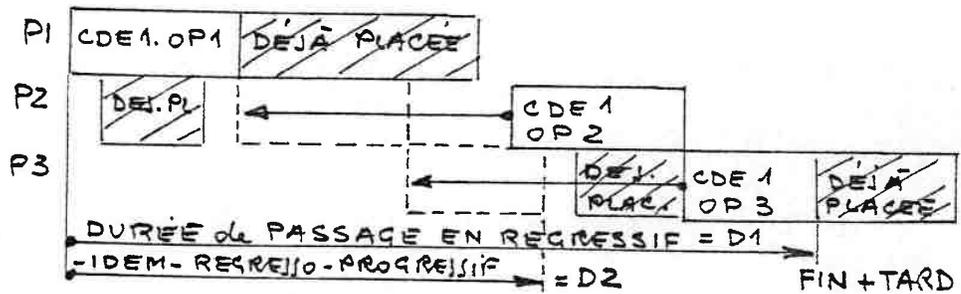


On voit qu'il faut 2 tests, dans les cas 1, 2, 3 et 6 et 3, dans les cas 7 et 8 pour déterminer le "cas topologique" de placement.

.../...

8,324 - Chargement "régresso-progressif"

Lorsqu'on charge une commande en régressif, toutes les opérations sont placées le plus tard possible : il peut arriver que cela entraîne une durée de passage dans l'atelier qui soit inutilement longue : exemple : il est impossible de commencer l'opération 1 plus tard.



Par contre, il serait possible d'avancer les opérations 2 et 3 à la position dessinée en pointillé : la durée de passage en atelier est réduite à D2, réduisant l'encombrement dans l'atelier (en contrepartie d'une augmentation d'en-cours de pièces finies au magasin, susceptible d'être préférée à l'encombrement en atelier).

Dans le chargement "régresso-progressif", on calcule la date de placement au plus tard de l'opération n° 1 de chaque commande, permise pratiquement par les trous du planning. A partir de cette date, on charge en progressif.

En régressif, le test de détection de la possibilité de placement d'une opération dans un trou est simple, car il n'y a pas à repérer le "cas topologique" de placement : il suffit de tester si le trou est supérieur ou égal à la durée d'opération.

Lors du placement en progressif, par contre, on applique la batterie de test vue plus haut.

8,325 - Chargement "manuel" et utilisation combinée des différents modes de placement

Ce mode de placement est essentiellement conversationnel, puisque le planificateur peut construire pas à pas son planning et effacer une partie du placement si celui-ci lui paraît mal se combiner.

Il consiste à placer une opération quelconque d'une commande, à une date choisie par le planificateur et à effectuer le reste du placement de cette commande avec l'assistance de l'ordinateur suivant l'un des modes de placement qu'applique celui-ci, par exemple :

- suivant le mode régressif pour les opérations antérieures à celle placée
- suivant le mode progressif pour les opérations postérieures à celle placée (si l'on cherche toujours dans ce cas la réduction des en-cours).

Ce mode manuel de placement est particulièrement souple pour des essais et des recherches, puisqu'il laisse au planificateur une grande latitude dans ses choix :

- le choix de l'opération à placer la première
- le choix de la date à laquelle l'opération sera commencée
- le choix des modes de placement des opérations antérieures et postérieures à celle placée initialement.

Ces choix peuvent être différents, pour chaque commande à placer.

Le placement manuel autorise une exploitation combinée des autres modes de placement. Un traitement préalable du carnet de commandes est particulièrement intéressant à faire dans ce cas, encore que ce traitement préalable ne soit pas lié au placement manuel.

Ainsi, il est possible de diviser les commandes en plusieurs lots et de procéder aux placements successifs de ces lots et ce, suivant des modes différents, par exemple :

- placer en régressif les commandes à délai relativement lointain
- placer suivant le mode manuel les quelques commandes qui, ayant beaucoup d'opérations, font appel à la machine la plus chargée
- enfin placer en progressif le reste des commandes (à délais relativement plus proches).

Bien d'autres essais peuvent être envisagés en procédant comme nous venons de l'indiquer.

Ce mode de placement est, naturellement, bien moins rapide que le placement automatique. L'ordinogramme que nous avons utilisé pour ce mode de placement est donné en annexe, ainsi que l'ordinogramme du programme utilisé pour trier un lot de commandes, suivant certaines caractéristiques, en vue de l'affectation des priorités de placement.

Au total, le programme donne la possibilité d'utiliser les 4 modes précédents, selon le schéma ci-après.

9 - ESSAIS EXECUTES ET RESULTATS

9,1 - Plan général et aspect itératif des essais exécutés

Il était nécessaire de procéder à des essais, donc d'élaborer des jeux d'essais, tout d'abord pour tester le bon fonctionnement informatique du programme, naturellement.

Divers autres buts ont été poursuivis :

- relever les temps de traitement des algorithmes automatiques en fonction :
 - . du nombre d'opérations)
 - . du nombre de commandes)
 - . du nombre de machines)
 - . de la charge des machines)
 -)
- constater l'encombrement du programme en mémoire centrale
- tester divers algorithmes de calcul des priorités de placement des commandes. Comparer les algorithmes sur des jeux d'essais différents
- tester les performances des divers algorithmes automatiques de placement : régressif, progressif ...
 - . nombre de commandes en retard
 - . répartition des retards et des avances
 - . coefficient d'utilisation des machines
 - . répartition des trous restants
- tester l'utilité de diverses sophistications : agrandissement des trous, heures supplémentaires ...
- prévoir les "conditions limites" au-delà desquelles le planning assisté n'est plus utilisable, par exemple :
 - . charge maximale des machines
 - . marge minimale des commandes.

La variété des essais à réaliser, dans un but de recherche, et dans un but d'exploitation, nous a conduit à construire divers programmes :

- génération de jeux d'essais, répondant à des lois fixées
- analyseur de jeux d'essais
- analyseur de résultats de placement.

.../...

De plus, les programmes de placement ont été complétés en certains points par des compteurs de nombre de cycle d'exécution de boucles et des compteurs de temps d'exécution.

Plusieurs séries d'essais des méthodes de placement ont été effectuées.

Nous avons généré plusieurs jeux d'essais et nous avons avec chaque jeu bâti un planning :

- suivant les trois modes de placement que nous avons définis plus haut :

- . régressif
- . progressif
- . et régresso-progressif

- et suivant des modes différents de détermination de l'ordre de présentation de chaque commande pour le chargement du planning.

Les essais récapitulés ici ont été effectués sur plusieurs jeux d'essais mais ne combinent jamais plusieurs modes de placement au cours d'un même essai.

Les critères de jugement de qualité d'un placement définis ci-après en 9.2 ont été appliqués.

Nous avons également mesuré le temps de traitement sur les ordinateurs dont nous avons disposé.

Pour procéder à des comparaisons significatives, nous effectuons d'abord un placement où les commandes sont présentées dans un ordre quelconque (pratiquement le numéro de commande qui est affecté de façon aléatoire lors de la génération du jeu d'essai, est pris comme ordre de priorité de placement des commandes).

Ce placement sert de référence à la comparaison des autres placements que nous effectuons ensuite.

.../...

9,2 - Choix des critères de jugement de la qualité des placements

Ces critères sont appréciés indépendamment les uns des autres. Il ne nous est en effet pas apparu clairement de formule permettant de combiner ces critères en un seul indice de performance.

Les critères retenus sont les suivants :

- 1 - % de commandes en retard
- 2 - Distribution des retards, retard total et retard moyen
- 3 - Coefficient d'utilisation des machines
- 4 - Indice d'en-cours.

Ces divers critères étant définis comme suit :

9,21 - Pourcentage de commandes en retard

$$NR = \frac{\text{NB de commandes en retard}}{\text{NB total de commandes placées}} \times 100$$

Les commandes réputées en retard étant celles placées de sorte que leur fin d'exécution prévue est postérieure à la fin FR demandée par le client.

9,22 - Distribution des retards, retard total, retard moyen

Pour chaque commande en retard, la durée du retard est $R = \text{Date de fin obligée (FO)} - \text{date de fin au plus tard (FR)}$

- le retard total est $\sum R = FO - FR$
- le retard moyen est $\frac{\sum R}{N_R}$, avec $N_R =$ nombre de commandes en retard.

9,23 - Coefficient d'utilisation des postes

La 1ère opération chargée sur un poste débutant à l'heure D, la dernière opération chargée sur ce poste se terminant à l'heure F, les "masques" occupant au total M heures entre D et F, le total des heures ouvrables pour le poste est :

$$F - D - M.$$

Si $\sum T$ est le total des durées d'opérations chargées sur le poste entre D et F, on appelle coefficient d'utilisation des postes pendant la période D → F :

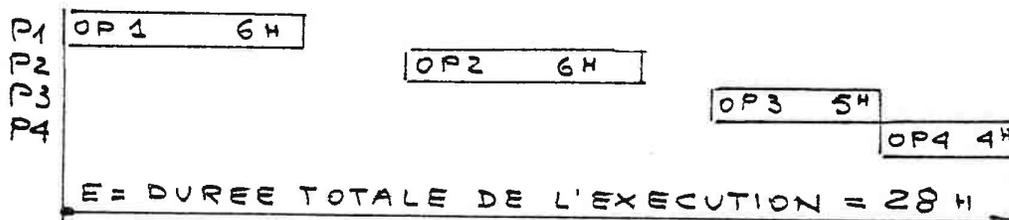
$$k = \frac{\sum T}{F - D - M}$$

9,24 - Indice d'en-cours

Pour chaque commande, on appelle indice d'en-cours :

$$I = \frac{\text{Durée totale d'exécution}}{\text{Somme des temps d'opération}} = \frac{E}{\sum T}$$

selon le schéma joint :



$$\text{Ici } I = \frac{28 \text{ H}}{6 + 6 + 5 + 4} = \frac{28}{21} = 1,33$$

L'indice moyen d'en-cours est la moyenne des indices d'en-cours de l'ensemble des commandes du carnet.

9,25 - Durée du traitement

Nous avons par ailleurs enregistré la durée du traitement de chaque opération et chaque commande, par les matériels dont nous avons pu disposer :

- ordinateur de bureau Olivetti P 6060 (pour mémoire)
- mini-ordinateur 21 M x E (système 1000) de Hewlett-Packard.

Les durées recensées sont :

- durée d'attribution des priorités entre commandes : s'écoulant entre démarrage du programme et écriture sur disque de l'indice de priorité de la dernière commande du carnet
- durée de placement d'une commande : s'écoulant entre début du traitement (fin de l'opération précédente) et fin de celui-ci (Inscription du placement sur fichiers machine, commandes et opérations, sur disque, et impression éventuelle).

9,3 - Génération des jeux d'essais

Afin d'accélérer les essais, un générateur automatique de jeux d'essais a été mis au point : les paramètres du jeu d'essai sont fixés. Le jeu est alors généré et enregistré en carnet de commande, qui peut alors être placé selon divers algorithmes.

Les paramètres sont les suivants :

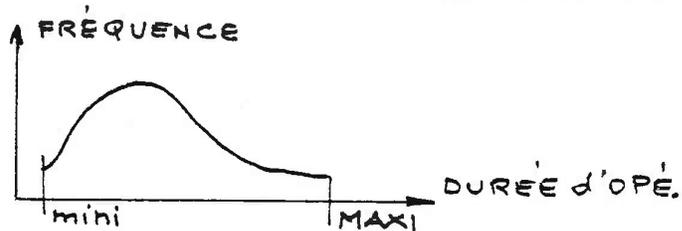
- nombre de machines
- nombre de familles de machines
- calendrier de fonctionnement des machines
- . Heure de début du planning
- . Heure de fin du planning
- . Nombre d'opérations maxi/mini par commande
- . Par machine : - charge maxi
 - durée d'opération maxi/mini.

.../...

Différentes hypothèses ont été adoptées pour se rapprocher de caractéristiques rencontrées dans les ateliers.

- Hypothèses :

- Le début au plus tôt d'une commande suit une loi de répartition uniforme entre la date de début du planning et la date de fin (diminuée de la durée moyenne d'une commande)
- Le nombre d'opérations suit une loi normale tronquée
- Les machines et familles sont choisies aléatoirement
- Les durées d'opération suivent une loi de la forme :



Remarque : les valeurs mini et maxi dépendant de la machine.

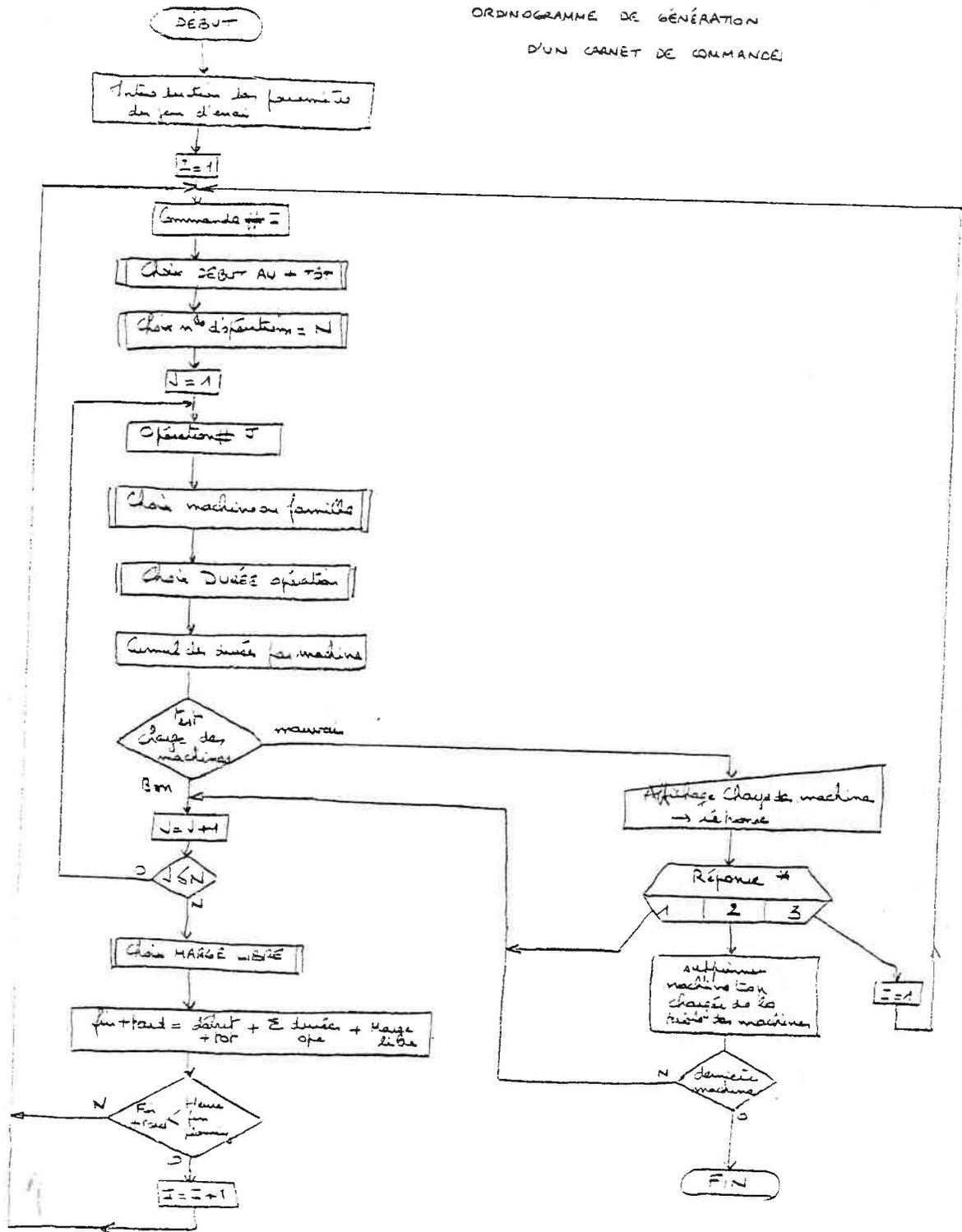
- La marge libre suit une loi de répartition uniforme entre une durée mini et une durée maxi.

- Remarque :

- 1) il est possible de générer un jeu d'essai à partir d'un autre jeu d'essai en réduisant d'un certain pourcentage les durées d'opérations
- 2) quelques difficultés ont été rencontrées dans la mise au point d'un générateur de nombres aléatoires uniformément distribués : les formules classiques ne donnant pas de bons résultats, car les nombres irrationnels n'existent pas dans un ordinateur : une table de nombre au hasard a dû être entrée dans la machine (sous forme de tableau).

Le traitement de génération est schématisé par l'ordinogramme ci-après.

ORDINOGRAMME DE GÉNÉRATION
D'UN CARNET DE COMMANDE



- Remarque :
- réponse 1 = continuer de charger la machine immédiatement
 - réponse 2 = Ne plus charger la machine son chargement
 - réponse 3 = supprimer la machine existante - commencer à zéro

Les caractéristiques de divers jeux d'essais générés étudiés ici sont les suivantes :

Repère du jeu	1	2	3	4	4A	4B	4C	5
NB de postes	10	10	30	30	30	30	30	10
NB de familles	0	3	3	3	6	12	0	3
Charge moyenne postes (%)								
NB de commandes	100	100	200	200	200	200	200	29
NB maxi d'opé.	6	6	6	6	6	6	6	9
NB moyen d'opé.	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	7
NB mini d'opé.	1	1	1	1	1	1	1	1
Durée maxi d'opé. (H)	30	30	30	30	30	30	30	30
Durée moyenne d'opé. (H)	7,8	7,8	6,8	8,5	8,5	8,5	8,5	7,6
Durée mini d'opé. (H)	2	2	2	2	2	2	2	2
Marge libre maxi (H)	240	240	240	240	240	240	240	240
Marge libre moyenne (H)	109,1	109,1	83,6	95,4	95,4	95,4	95,4	76,9
Marge libre mini (H)	12	12	12	12	12	12	12	12

Les modes d'attribution des priorités de placement étudiés ci-après ont été :

- le hasard : Les commandes sont placées dans l'ordre où elles sont générées, de sorte que leurs caractéristiques varient aléatoirement, sans influencer sur l'ordre de placement
- "Prior" : Un indice de priorité est calculé selon la méthode développée ci-avant en 8,31. On calcule les indices en plusieurs tranches, tenant compte du "garnissage" progressif du planning, augmentant peu à peu le coefficient d'utilisation des machines
- "Prior 6" : Cet algorithme essaie de traduire l'idée que la hiérarchie des facteurs de difficulté de placement des commandes change avec la valeur absolue de ces facteurs. Ainsi : une marge libre nulle a un poids très important : même si les opérations de la commande ont une durée courte et sont peu nombreuses elle sera aussi difficile à placer qu'une commande avec une marge libre importante mais comportant une seule opération très longue, etc...

.../...

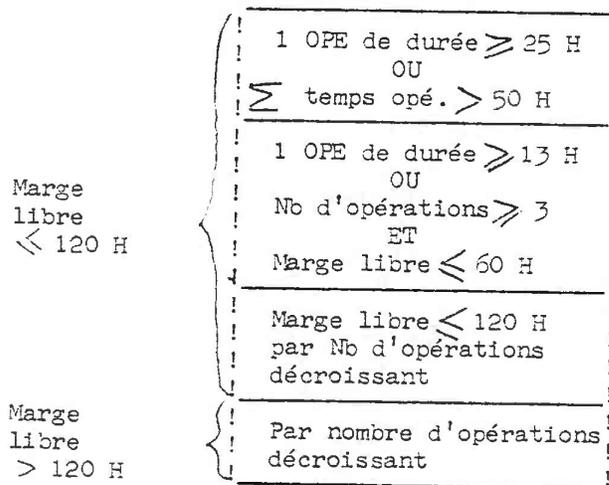
Dans cette perspective, le carnet de commande est divisé d'abord en 2 classes :

- 1 - les commandes ayant une marge libre $\leq M$ (ici $M = 120$ H).
- 2 - les autres, ordonnées par nombre d'opérations décroissant.

Dans la classe (1), on fait 3 sous-groupes des commandes :

- 1,1 - Avec 1 opération de durée $\geq T$ (ici $T = 25$ H) OU avec la somme des temps d'opération $> D$ (ici $D = 50$ H).
- 1,2 - Avec $T = 13$ H dont le nombre d'opérations est $\geq N$ (ici $N = 3$) ET la marge libre $\leq M_1$ (ici $M_1 = 60$ H).
- 1,3 - Commandes restantes.

Au total, on peut schématiser comme suit la partition des commandes :



Les modes de placement utilisés sont repérés dans les tableaux ci-après :

- R = Régressif
- R/P = Régresso progressif
- P = Progressif

Les essais réalisés peuvent être analysés comme suit :

.../...

9,4 - Influence du mode d'attribution des priorités de placement

9,41 - Pourcentage de commandes en retard

Mode Priorité	Mode Plact	N° du jeu d'essai								Moyennes et écart type			
		1	2	3	4	4A	4B	4C	5A	m	σ	m	σ
HASARD	R/P	26	17	23,5	17	17	22,5	23,5	31	22,2	5,0		
	P	24	11	27	6,5	7,5	17,5	26	31	18,8	9,5	19,6	8
	R	22	11	23	5	8,5	17	26	31	17,9	9,1		
PRIOR 6	R/P	13	7	19,5	8,5	8,5	15	24	41,4	17,1	11,4		
	P	17	4	23,5	0,5	1	6,5	22,5	41,4	14,6	14,3	14,7	11,9
	R	10	5	18,5	0	1	12,5	21,5	31	12,4	10,8		
PRIOR	R/P	13	7	19,5	9,5	8,5	14,5	19,5	27,6	14,9	7		
	P	10	3	17	0	0	7,5	20	27,6	10,6	10,1	12,0	8,4
	R	11	5	16	0	0	12	15	24,1	10,4	3,4		

9,42 - Somme des durées de retard

Mode Priorité	Mode Plact	N° du jeu d'essai								Moyennes et écarts types			
		1	2	3	4	4A	4B	4C	5A	m	σ	m	σ
HASARD	R/P	2350	666	3167	506	652	2421	3294	606	1707,8	1220,3		
	P	2018	723	3110	420	583	2177	2954	764	1593,6	1102,9	1654,2	1135,4
	R	2035	639	3004	472	574	2427	3510	628	1661,1	1233,8		
PRIOR 6	R/P	482	251	1447	32	32	1017	1469	599	666,1	584,6		
	P	523	234	1824	7	54	291	1257	530	590	634,6	630,3	576
	R	507	260	1646	0	5	915	1208	536	634,6	585		
PRIOR	R/P	606	171	1137	34	27	629	1416	279	537,4	515,4		
	P	350	169	826	0	0	316	1368	206	404,4	468,9	432,3	433,4
	R	621	313	112	0	0	801	777	218	355,3	333,7		

9,43 - Coefficient d'utilisation des postes

Mode Priorité	Mode Plact	N° du jeu d'essai								Moyennes et écarts types			
		1	2	3	4	4A	4B	4C	5A	m	σ	m	σ
HASARD	R/P	61	66	62	79	78	70	65	66	68,4	6,8		
	P	61	67	65	78	76	68	66	59	67,3	6,8	68,1	6,4
	R	61	67	64	79	73	69	64	67	68,5	6,5		
PRIOR 6	R/P	65	69	68	82	80	71	68	65	71	6,5		
	P	63	67	68	73	76	71	64	57	68	6,9	69,9	6,6
	R	66	68	66	82	80	72	67	65	70,3	6,7		
PRIOR	R/P	65	69	66	81	79	72	65	64	70,1	6,6		
	P	63	65	65	77	76	69	64	65	68	5,5	69,5	5,9
	R	65	68	67	81	79	71	69	66	70,8	6,0		

.../...

9,44 - Indice d'en-cours

Mode Priorité	Mode Plac ^t	N° de jeu d'essai								Moyennes et écarts types			
		1	2	3	4	4A	4B	4C	5	m	σ	m	σ
HASARD	R/P	2,14	1,45	2,12	1,17	1,24	1,66	2,04	1,67	1,7	0,4	1,8	0,4
	P	2,5	1,65	2,44	1,33	1,46	1,87	2,23	1,61	1,9	0,5		
	R	2,35	1,47	2,47	1,3	1,41	1,82	2,32	1,70	1,9	0,5		
PRIOR 6	R/P	1,78	1,31	2,21	1,2	1,12	1,76	2,23	2,07	1,7	0,5	2,0	0,5
	P	2,23	1,88	2,94	1,46	1,55	2,19	2,38	2,00	2,1	0,5		
	R	2,44	1,69	2,85	1,38	1,50	2,22	2,57	2,26	2,1	0,5		
PRIOR	R/P	1,87	1,30	2,29	1,15	1,19	1,48	2,03	1,63	1,6	0,4	1,9	0,5
	P	2,07	1,73	2,59	1,34	1,54	2,02	2,41	1,88	1,9	0,4		
	R	2,51	2,0	2,92	1,35	1,36	2,26	2,24	2,05	2,1	0,5		

Ces essais font apparaître que l'attribution de priorité selon l'algorithme "PRIOR" réduit significativement le nombre de commandes en retard, et le nombre total de journées de retard.

Les trois algorithmes semblent avoir des effets voisins sur le coefficient d'utilisation des postes de travail et les en-cours.

9,5 - Influence des modes de placement

Reprenant les données numériques ci-dessus, on peut établir les tableaux ci-après :

9,51 - Pourcentage de commandes en retard

Mode Plac ^t	§ moyen de commandes retardées			
	Hasard	Prior 6	Prior	Moyenne
R/P	22,2	17,1	14,9	18,1
P	18,8	14,6	10,6	14,7
R	17,9	12,4	10,4	13,6

.../...

9,52 - Somme des durées des retards

Mode Plac ^t	Moyennes des durées de retard			
	Hasard	Prior 6	Prior	Moyenne
R/P	1 707,3	666,1	537,4	970,4
P	1 593,6	590	404,4	862,7
R	1 661,1	634,6	355,3	883,7

9,53 - Coefficient d'utilisation des postes

Mode Plac ^t	Coefficient moyen d'utilisation			
	Hasard	Prior 6	Prior	Moyenne
R/P	68,4	71	70,1	69,8
P	67,3	68	68	67,8
R	68,6	70,8	70,8	70,1

9,54 - Indice d'en-cours

Mode Plac ^t	Indice d'en-cours			
	Hasard	Prior 6	Prior	Moyenne
R/P	1,7	1,7	1,6	1,67
P	1,9	2,1	1,9	1,97
R	1,9	2,1	2,1	2,03

Ces essais semblent indiquer que le mode de placement "Régressif" est le plus favorable à la réduction du nombre et des journées de retard et du coefficient d'utilisation des postes.

Le mode "régresso progressif" semble réduire l'indice d'en-cours, comme on s'y attendait.

.../...

9,6 - Influence du coefficient d'utilisation des machines

9,61 - Pourcentage de commandes en retard - Priorités "Prior"

Mode Plact	Coefficients d'utilisation																							
	63	64	64	64	65	65	65	65	65	65	66	66	68	69	69	69	71	72	76	77	79	79	81	81
R/P				34,9	13				19,5					7				14,5			8,5		9,5	
P	10		20					3,17		25,7	17,5				7,5				0	0				
R		16					11					24,1	5			25,9	12						0	0
N° Jeu	1	3	4C	5A	1	1	2	3	4C	5A	3	5A	2	2	4B	4C	4B	4B	4A	4	4A	4A	4	4

9,62 - Somme des durées des retards - Priorités "Prior"

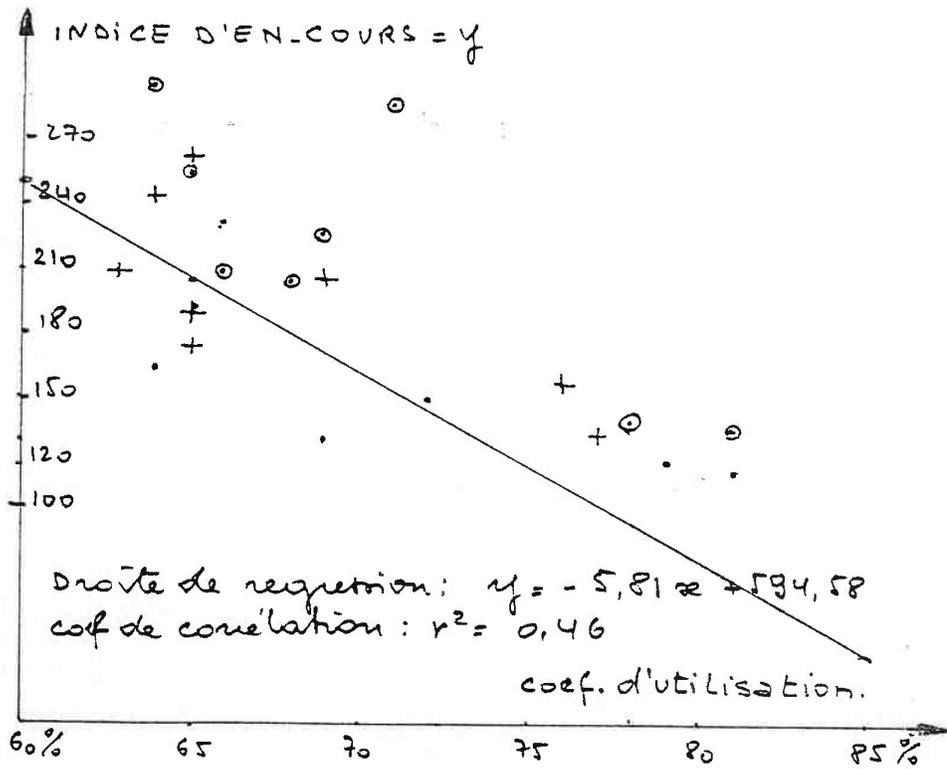
Mode Plact	Coefficients d'utilisation																							
	63	64	64	64	65	65	65	65	65	65	66	66	68	69	69	69	71	72	76	77	79	79	81	81
R/P				221	606				446		1137			171				529			27		34	
P	350		1368					169	826		206				316				0	0				
R		112				621						218	313			777	809					0	0	
N° Jeu	1	3	4C	5A	1	1	2	3	4C	5A	3	5A	2	2	4B	4C	4B	4B	4A	4	4A	4A	4	4

9,63 - Indice d'en-cours - Priorités "Prior"

Mode Plact	Indice d'en-cours																							
	63	64	64	64	65	65	65	65	65	65	66	66	68	69	69	69	71	72	76	77	79	79	81	81
R/P				1,63	1,87				2,03		2,29			1,3				1,48			1,18		1,15	
P	2,07		2,41					1,73	2,59		1,88				2,02				1,54	1,3				
R		2,92				2,51						2,05	2,0			2,24	2,84						1,36	1,35
N° Jeu	1	3	4C	5A	1	1	2	3	4C	5A	3	5A	2	2	4B	4C	4B	4B	4A	4	4A	4A	4	4

Le graphique ci-après traduit les résultats de ce tableau. On voit que l'indice d'en-cours semble diminuer à mesure que le coefficient d'utilisation des machines augmente, ce qui paraît "a priori" étonnant. Mais le coefficient de corrélation est faible (0,46).

.../...



D'une manière générale, l'influence du coefficient d'utilisation des machines ne peut être dégagée des essais réalisés, car elle est masquée par les variations de facteurs tels que nombre de familles de machines, caractéristiques des jeux d'essais, etc...

9,7 - Influence de la structure du carnet de commandes

Cette influence, au travers des essais que nous avons pu faire, paraît très importante.

Le même algorithme, appliqué à des carnets de commandes différents donne des performances très différentes.

Des jeux d'essais ont été construits pour comparer des structures ayant la même durée moyenne d'opérations et le même nombre d'opérations, avec les mêmes marges.

La série n° 8 nous a fait constater que pour le premier jeu de structure analogue à celle des autres jeux, nous obtenons de meilleurs résultats de placement qu'avec le jeu pour lequel nous avons toutes les opérations de durée égale à la durée moyenne. La distribution des nombres et durées d'opérations, avec deux maximum de fréquence donne également un placement de moindre qualité.

cf. le tableau ci-dessous.

CARACTERISTIQUES DU JEU D'ESSAI

N° du Jeu	Nbre moyenne d'opérations par commande	Durée opér. moyenne (en heures)	Distribution des durées d'opérations	Marge libre (heures)	Nbre de retards (100 commandes)	Retard moyen (en heures)	Retard total (en heures)	Avance moyenne (en heures)
3 P	)	)	Dissymétrie unimodale	) 112,4	3	16,6	132,3	30,2
					2	29,0	58,0	29,7
9 A P	) 3,3	) 7,2	Opérations toutes égales à 7,2 n	) 112,5	5	57,3	343,3	71,4
					7	46,2	323,4	22,4
9 B P	)	)	Bimodale	) 109,3	12	53,2	638,4	70,2
					15	49,2	738,0	30,5

Pour éclairer l'appréciation de la structure d'un carnet de commandes, nous avons essayé de prendre en compte l'écart type sur les durées d'opérations. Les indications obtenues ne paraissent pas significatives.

Le traitement d'un carnet de commandes par un algorithme de placement donné (par exemple le placement progressif ou le placement régressif) peut être utilisé, pensons-nous, comme un test susceptible de caractériser la structure d'un carnet de commande.

Nous poursuivons des recherches dans ce sens, et envisageons d'explorer ainsi d'autres voies, en particulier celle qui consiste à prendre en compte - pour l'ensemble du planning sur la période considérée - la répartition de la densité de chargement.

Dans le but d'obtenir une vue d'ensemble du carnet de commandes à charger et de son influence sur la façon dont la charge d'ensemble du planning et les charges par machine se répartissent tout au long de la période planifiée, nous avons procédé de la façon suivante :

Chaque commande est caractérisée par :

- sa latitude totale de placement $F_R - J_A$
- les durées de ses opérations d_i

Pour une commande, nous définirons la densité de charge par le quotient $\frac{\sum d_i}{F_R - J_A} = \Delta$

Pour chaque opération, nous pourrions définir une densité de charge par un quotient semblable, à condition de faire une hypothèse sur la manière de répartir la latitude de placement (ou la marge) entre les diverses opérations d'une commande.

Une hypothèse simple consiste à répartir $F_R - J_A$ proportionnellement à la durée de chaque opération.

La latitude L_i relative à l'opération O_i de durée d_i sera

$$L_i = F_R - J_A \times \frac{d_i}{\sum d_i}$$

$$\Delta_i = \frac{d_i}{L_i} = \frac{\sum d_i}{F_R - J_A} = \Delta$$

La période pendant laquelle cette durée sera appliquée ira de J_{A1} à J_{A1+1} et sera d'une durée égale à $L_i = \frac{d_i}{\Delta}$

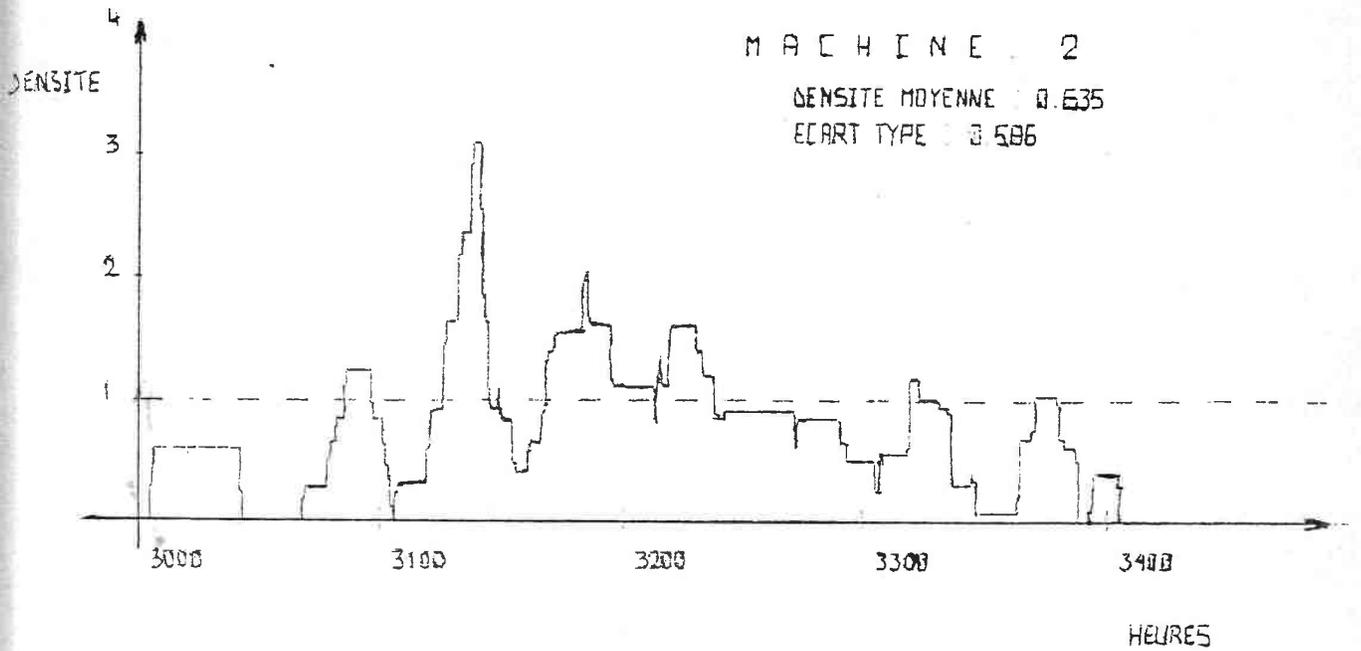
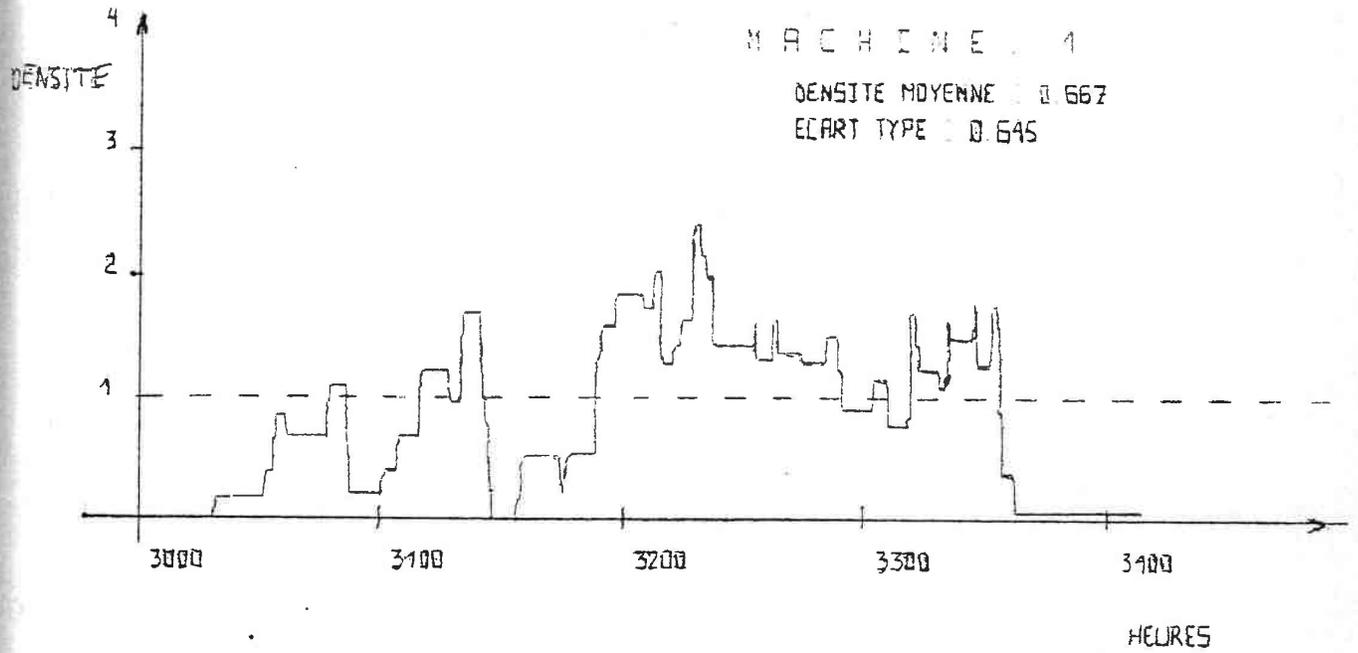
Dans cet esprit, nous avons construit avec le miniordinateur pour plusieurs carnets de commandes les diagrammes donnant la variation des densités de charge pour chaque machine.

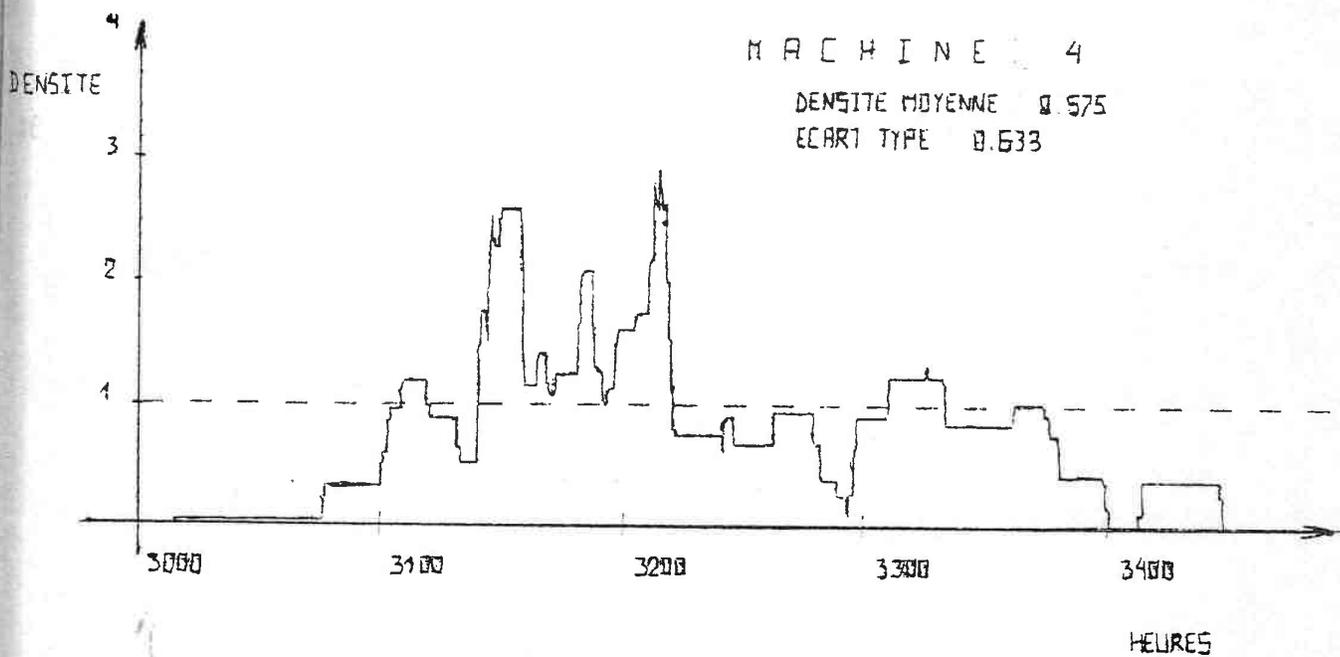
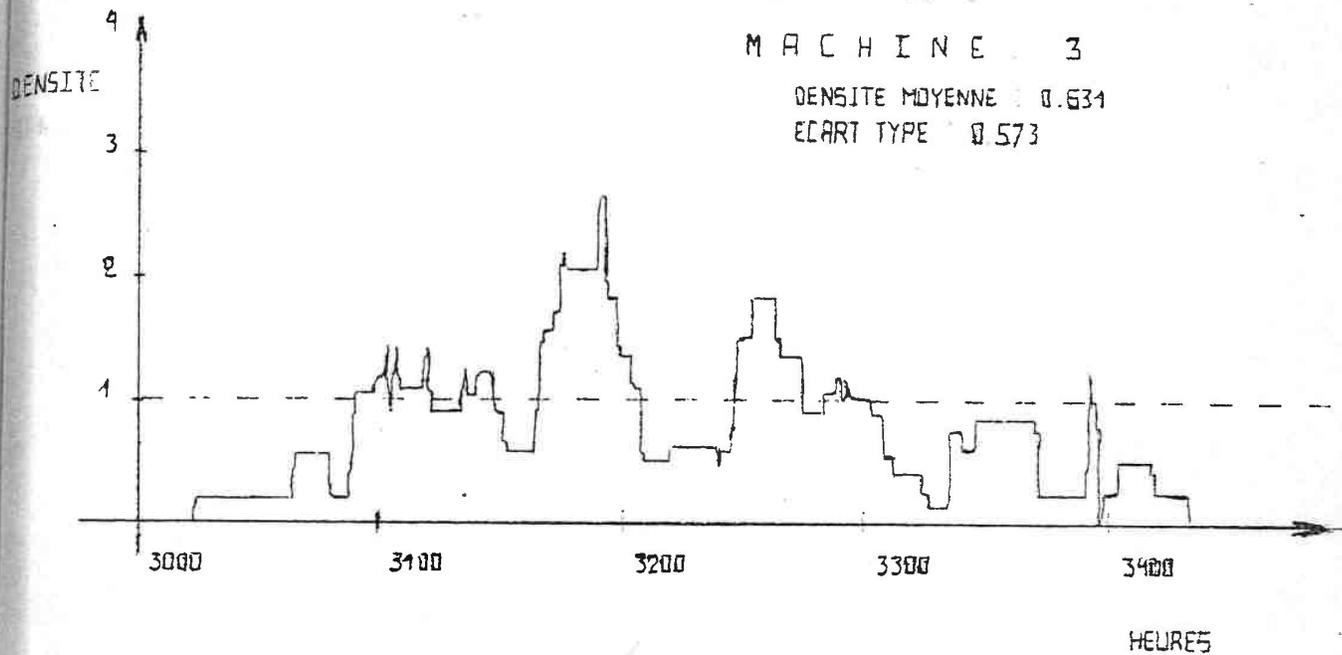
Ci-après la série de diagrammes de l'un d'eux :

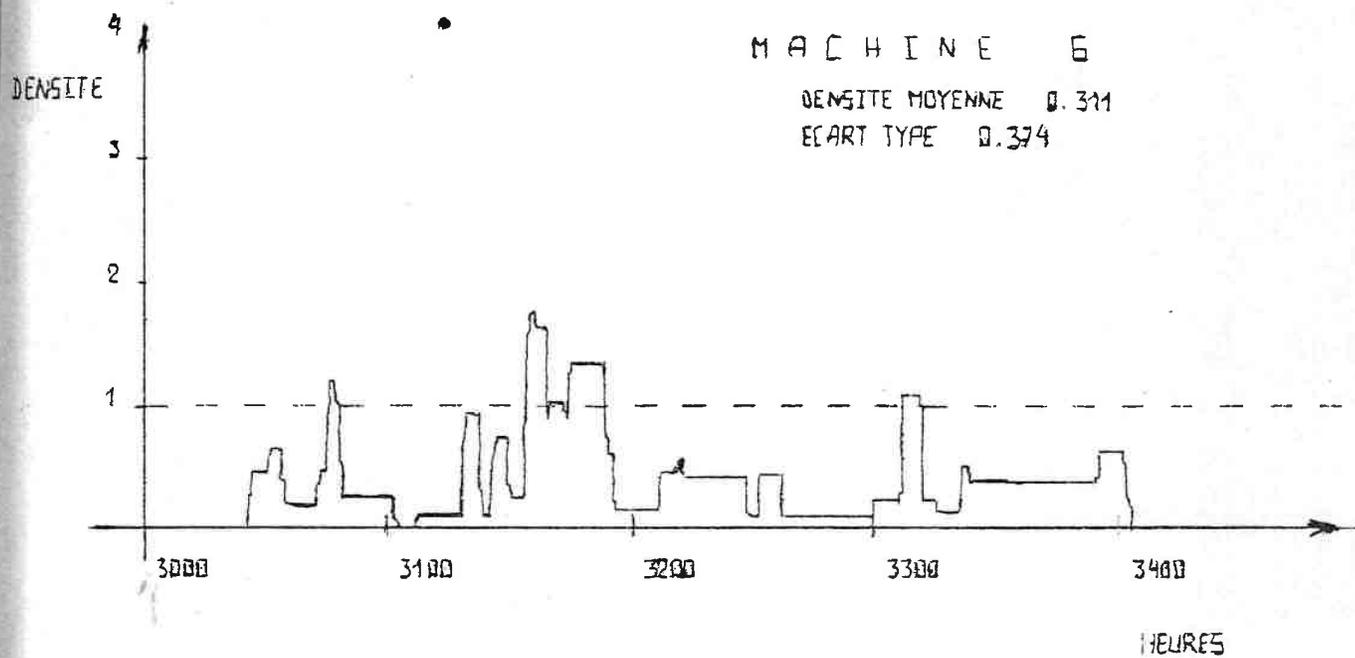
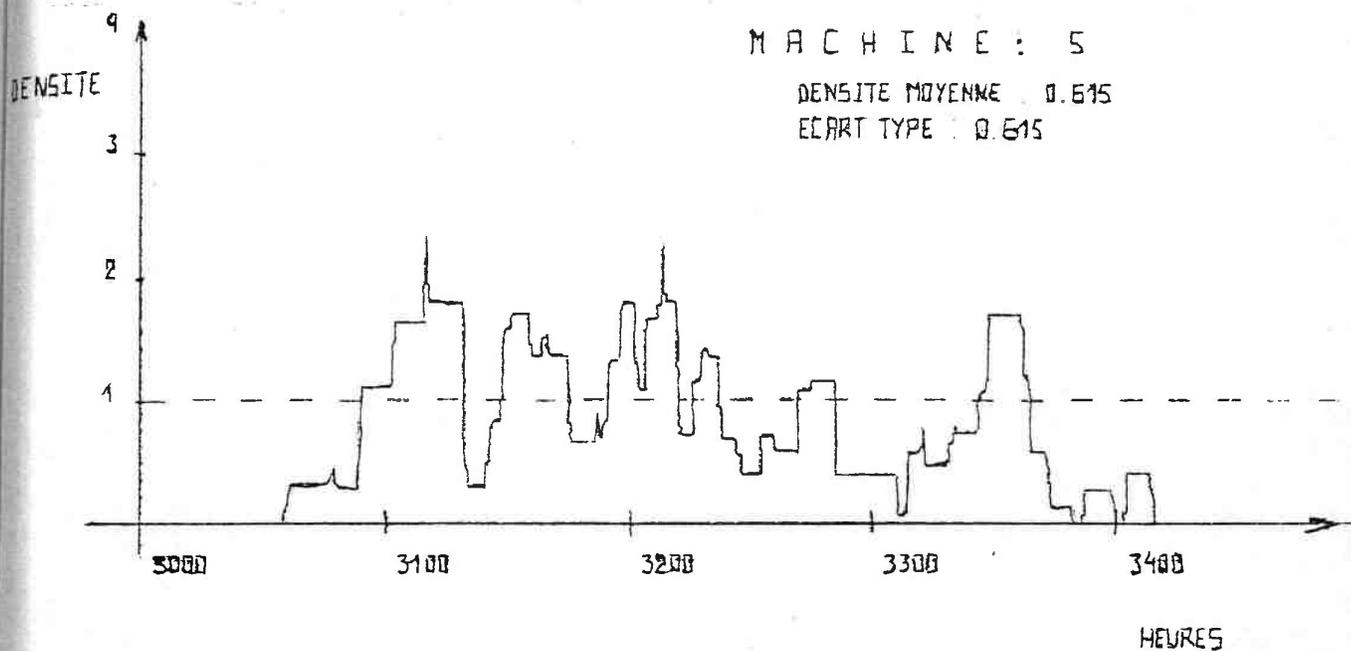
.../...

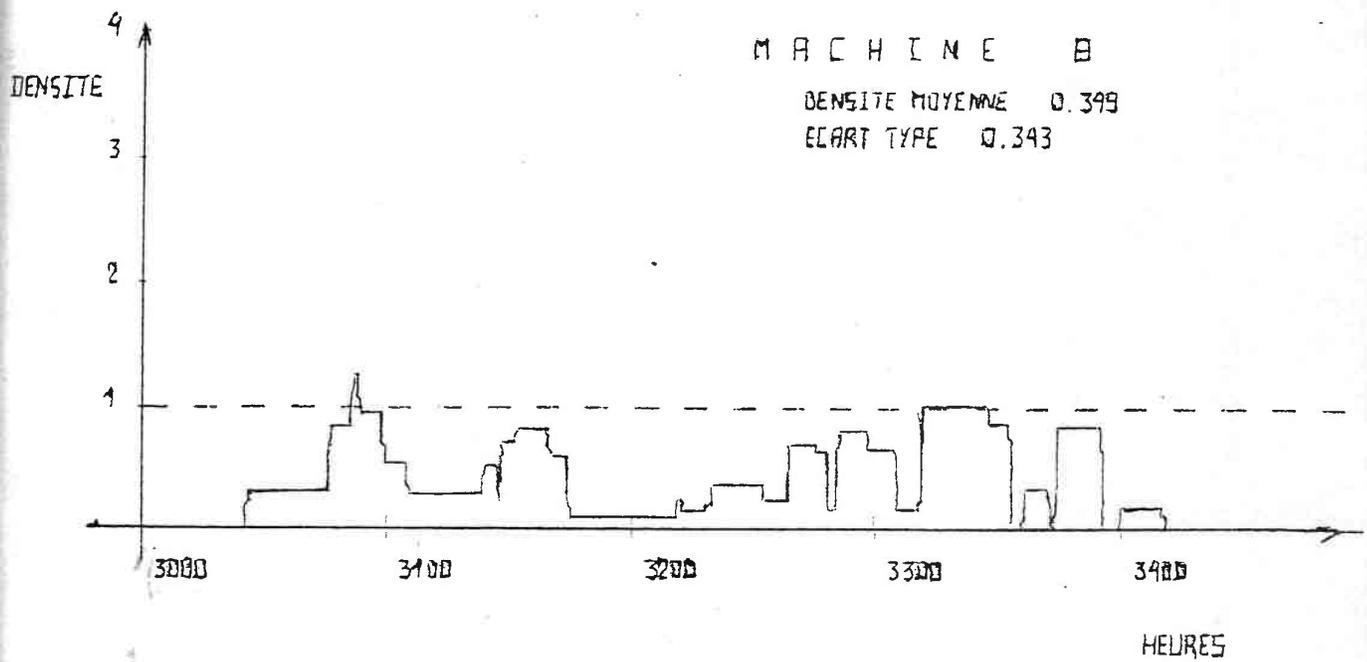
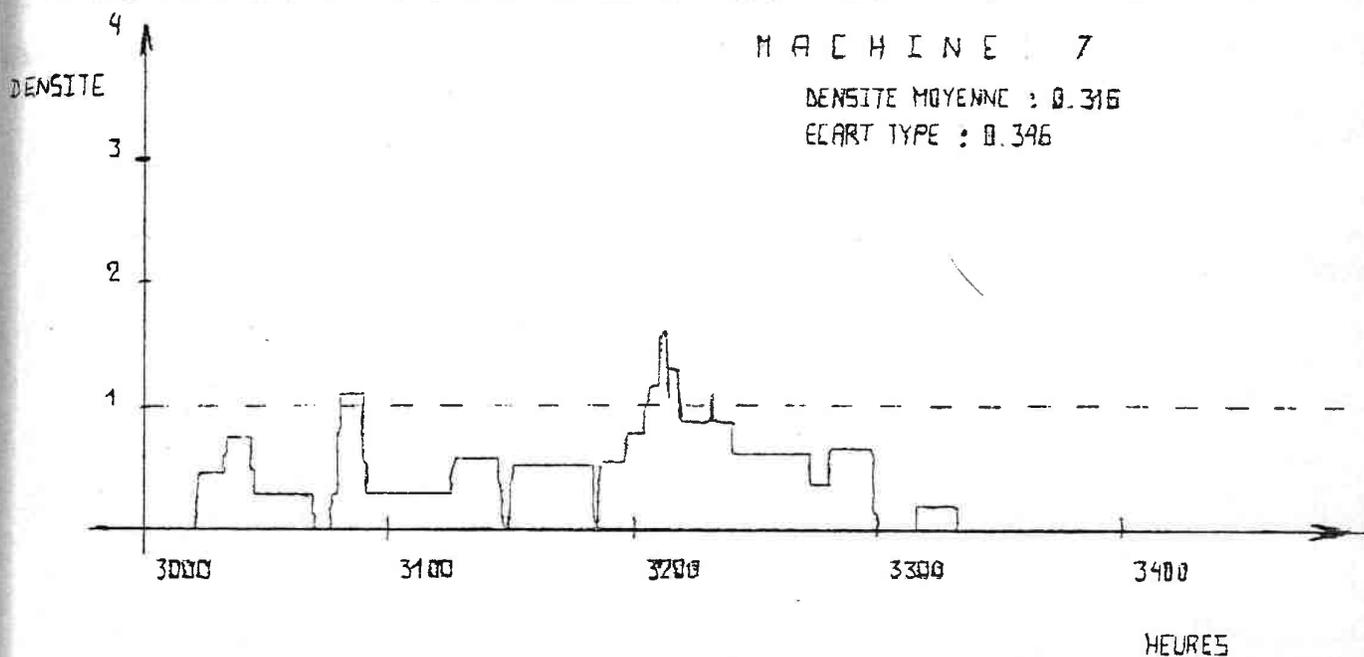
JEU D'ESSAI N° 4

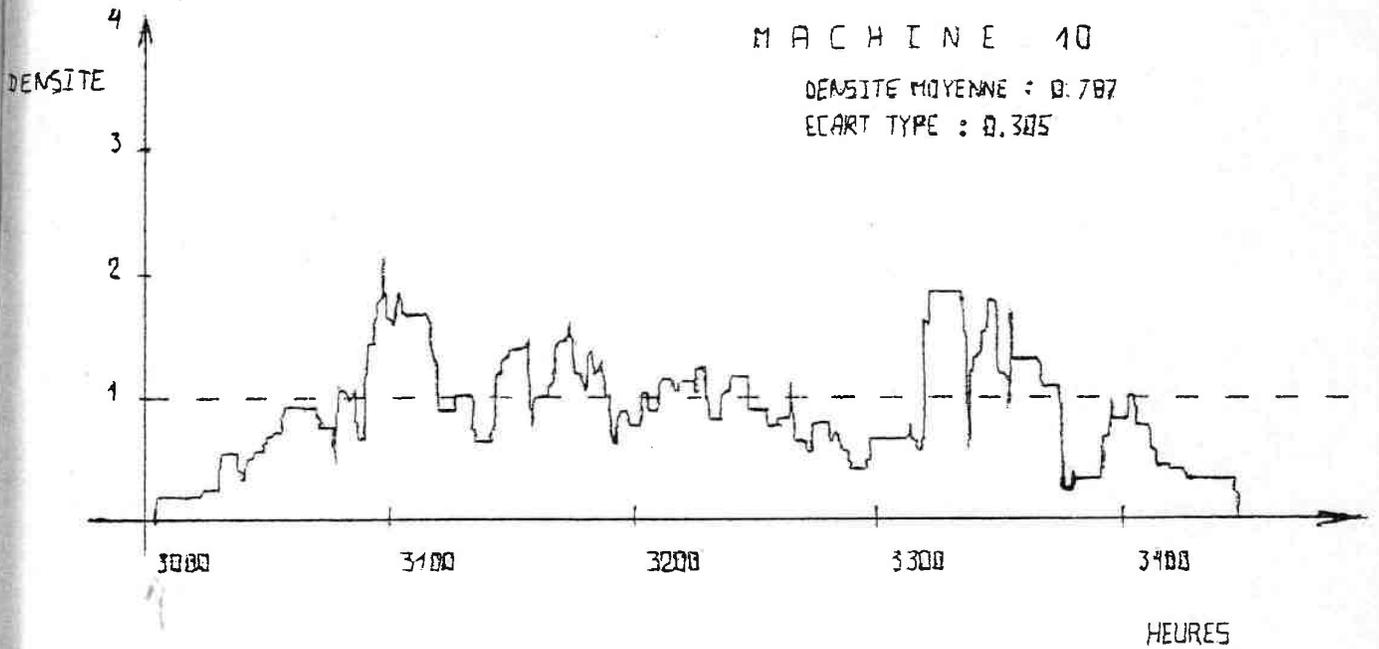
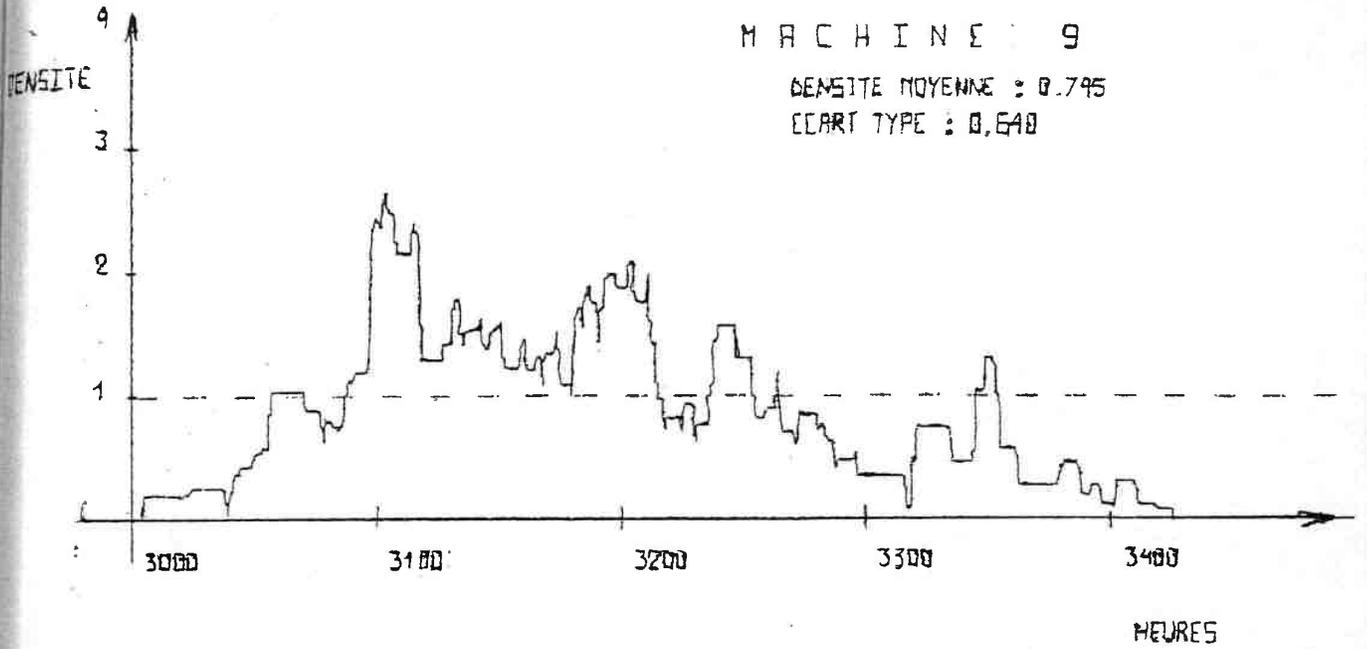
DENSITE D'OCCUPATION DES MACHINES











Lorsque la densité de charge dépasse 1, il est nécessaire de lisser la charge, en plaçant les opérations qui devaient être exécutées dans cette partie plus tôt, ou plus tard.

Les "pics" de densité, étroits, entourés de "dépressions" (ex. : machine n° 2), permettent probablement de réaliser ces déplacements sans consommer trop de marge, donc correspondent à une structure de carnet de commandes favorable.

Par contre, les "massifs" (ex. : machine 1 entre les heures 3 200 et 3 350, ou machine 9 entre les heures 3 100 et 3 250) doivent conduire à des décalages importants, donc à une impossibilité de respecter tous les délais demandés.

Nous continuons dans les essais en cours à exploiter ces remarques pour déterminer les ordres de priorité de placement et aussi l'acceptation ou le refus de délais demandés.

.../...

9,8 - Influence de la structure du parc machine

Il s'agit d'examiner si la plus grande souplesse permise par l'existence de famille de machines polyvalentes a une influence sur les performances possibles du planning.

On peut pour cela examiner, sur le tableau suivant, les résultats des jeux 4, 4 A, 4 B, 4 C où seuls varient les effectifs des familles.

Jeux		4 C	4	4 A	4 B		
NB de postes		30	30	30	30		
NB de familles		0	3	6	12		
Mode de priorité	Mode plact						
% de retard en	HASARD	R/P	23,5	17	17	22,5	
		P	26	6,5	7,5	17,5	
		R	26	5	8,5	17	
	PRIOR 6	R/P	24	8,5	8,5	15	
		P	22,5	0,5	1	6,5	
		R	21,5	0	1	12,5	
	PRIOR	R/P	19,5	9,5	8,5	14,5	
		P	20	0	0	7,5	
		R	15	0	0	12	
	durées de retard	HASARD	R/P	3 294	506	652	2 421
			P	2 954	420	583	2 177
			R	3 510	472	574	2 487
PRIOR 6		R/P	1 469	32	32	1 017	
		P	1 257	7	54	291	
		R	1 208	0	5	915	
PRIOR		R/P	1 416	34	27	629	
		P	1 368	0	0	316	
		R	777	0	0	801	
coefficient d'utilisation mach		HASARD	R/P	65	79	78	70
			P	66	78	76	68
			R	64	79	78	69
	PRIOR 6	R/P	68	82	80	71	
		P	64	78	76	71	
		R	67	82	80	72	
	PRIOR	R/P	65	81	79	72	
		P	64	77	76	69	
		R	69	81	79	71	
	indices en cours	HASARD	R/P	2,04	1,17	1,24	1,66
			P	2,23	1,33	1,46	1,87
			R	2,32	1,30	1,41	1,82
PRIOR 6		R/P	2,23	1,2	1,12	1,76	
		P	2,38	1,46	1,55	2,19	
		R	2,57	1,38	1,50	2,22	
PRIOR		R/P	2,03	1,15	1,19	1,48	
		P	2,41	1,34	1,54	2,02	
		R	2,24	1,35	1,36	2,26	

Les essais semblent montrer que l'absence de famille de machines (jeu 4 C) conduit à des résultats plus mauvais pour tous les critères d'appréciation.

Par contre l'augmentation des effectifs des familles, ne semble pas améliorer corrélativement ces performances.

.../...

9,9 - Influence de la durée des heures supplémentaires

Deux voies d'essai nous ont paru intéressantes :

- 1 - la possibilité de faire systématiquement 10 puis 20 % d'heures supplémentaires lorsque les commandes sont en retard (et ce, sur toutes les machines où des commandes ne se plaçaient pas, causant des retards.

Nous avons pu ainsi, sur les carnets de commande testés, diminuer de 15 % le nombre de commandes en retard et de 15 % également les en-cours.

Le sens du résultat était attendu. Il importait de mesurer son importance.

Des essais seront entrepris en prenant des méthodes plus souples et plus sélectives - et moins onéreuses dans la gestion d'un atelier -

- 2 - L'autre voie consiste à introduire des heures supplémentaires à certaines dates ou à certaines périodes seulement et pour certaines machines ou familles de machines. Pour rester pratique, il faut que les solutions envisagées respectent certaines règles, par exemple éviter de laisser longtemps et systématiquement un petit nombre d'exécutants sans surveillance.

Nous pensons que cette deuxième voie donnerait des résultats plus favorables (et des coûts moindres) que l'introduction systématique d'heures supplémentaires. Nous pensons la tester ultérieurement.

Cette recherche serait sans doute à combiner avec ce que pourrait donner comme amélioration d'un planning, l'utilisation des chevauchements - là, du moins où ils seraient possibles. Cette utilisation de chevauchements n'a fait l'objet jusqu'ici de tests complets.

9,10 - Variation des durées de traitement

Les temps de traitement indiqués ci-après ont été observés sur un ordinateur Hewlett-Packard 21 MXE - Mémoire adressable : 128 K octets - Temps de cycle de lecture-écriture : 350 nanosecondes - Disque de temps d'accès moyen = 25 millisecondes.

9,101 - Durée de calcul des priorités relatives de chaque commande à l'aide de l'algorithme "PRIOR" défini en 8.3.2 : elle est d'environ 0,2 seconde par commande, quelque soit le nombre de celles-ci.

Les compteurs placés dans le programme pour les essais permettent de conclure que la durée de chargement d'une opération est actuellement essentiellement conditionnée par les temps d'accès au disque : (il faut 3 accès disques par chargement). Les accès disque représentent 90 % du temps total de placement et le temps d'exécution de l'algorithme 10 % seulement.

Le nombre total des machines du parc n'a pas d'influence sur le temps de chargement et le coefficient d'utilisation de ces machines une influence très faible.

Par contre le nombre de machines par famille influe quelque peu, surtout à forte charge.

Au total, la durée (T) de chargement d'une commande de N opérations peut être évaluée sommairement comme suit (en secondes) :

9,102 - Placement progressif

C'est celui qui exige la durée la moins longue

$$T = 1,26 (0,26 N + 0,2)$$

9,103 - Placement régressif

Exige un temps un peu plus long, car dans certains cas, un essai de placement régressif avorte, et est suivi d'un placement progressif.

$$T = 1,29 (0,26 N + 0,2)$$

9,104 - Chargement régresso-progressif

Le plus long de tous :

$$T = 1,39 (0,26 N + 0,2).$$

.../...

De sorte que le chargement d'un carnet de petit atelier (200 commandes, 600 opérations) demandera :

- 1,26 (0,26 x 3 + 0,2) x 200 = 246,96 secondes, soit 4,12 minutes, en progressif
- 1,29 (0,26 x 3 + 0,2) x 200 = 252,84 secondes soit 4,21 minutes en régressif
- 1,39 (0,26 x 3 + 0,2) x 200 = 272,44 secondes soit 4,54 minutes en régresso progressif

Le chargement d'un carnet d'un grand atelier (1000 commandes soit 3 900 opérations) durera :

- 1,26 x (0,26 x 3,9 + 0,2) x 1000 = 1529,64 secondes soit :
 - . 25,49 minutes en progressif
 - . 25,90 minutes en régressif
 - . 28,12 minutes en régresso-progressif.

9,105 - Coût de placement d'une opération

- Le coût d'un système de mini ordinateur nécessaire au traitement est d'environ 250 000 francs en 1978.

- Le prix de revient annuel du système est alors :

. Frais financiers 12 % x 250 000	=	30 000
. Amortissement 20 % x 250 000	=	50 000
. Frais de maintenance 8 % x 250 000	=	20 000

Total matériel = 100 000 F

. Agent de lancement 66 000 F

Total prix de revient = 166 000 F

- soit un coût horaire de F $\frac{166\ 000}{1\ 800} = 92,22$ F

- De sorte que le coût de placement d'une opération est d'environ 0,01 francs. Valeur à rapprocher des 1,90 à 5,15 francs, coûts sur placement manuel : le placement par ordinateur est donc environ 200 à 500 fois moins coûteux que par un système manuel. On constate la possibilité de réaliser économiquement plusieurs essais de placement pour un même carnet.

10 - ENSEIGNEMENTS TIRES DES ESSAIS - VOIES DE POURSUITE DES RECHERCHES

10,1 - Enseignements

Les divers essais conduits dans ces conditions (en plaçant chaque commande sur les machines) ont permis de dégager les conclusions générales suivantes :

- 1 - Un choix des priorités de placement des commandes fait rationnellement donne régulièrement de meilleurs résultats qu'un choix au hasard.
- 2 - Divers algorithmes rationnels donnent des résultats voisins. L'algorithme résultant des calculs faits en 8,32 semble un peu supérieur aux autres essayés, dans la plupart des cas.
- 3 - En ce qui concerne les modes de placements automatiques (régressif, progressif, régresso-progressif) leurs performances relatives semblent voisines :
 - le "régressif" réduisant les retards
 - le "progressif" augmentant les coefficients d'utilisation des postes
 - le "régresso-progressif" réduisant la durée des en-cours (représentée par l'indice d'en-cours)
- 4 - L'indice d'en-cours diminuerait, à mesure que la charge des machines augmenterait (résultat étonnant).
- 5 - L'absence de familles de poste dégrade toutes les performances. L'augmentation des effectifs par famille n'est pas corrélée avec l'augmentation de ces performances.
- 6 - Les temps de traitement augmentent quasi linéairement avec le nombre d'opérations à traiter : ils sont liés essentiellement au nombre d'accès disque nécessaires.

10,2 - Voie de poursuite des recherches

Nos recherches ont été, à ce jour, exploratoires et itératives : il s'agissait d'explorer sommairement le plus rapidement possible les différentes voies envisageables.

Les premiers résultats obtenus permettent de définir avec plus de précision les recherches à poursuivre.

10,21 - Pour la compréhension des "lois" du planning

10,211 - Pour le type de placement n° 1 (commande par commande)

Un plan de recherches, permettant l'exploitation statistique des résultats est à établir, exécuter et dépouiller à l'aide des générateurs de jeux d'essais, et des algorithmes de priorité et de placement automatiques.

.../...



Toutefois, le placement automatique ne permettra probablement pas d'obtenir un coefficient d'utilisation des postes de travail supérieurs à 85 %.

Les lois de fonctionnement, pour des coefficients plus élevés devront être recherchées par l'étude approfondie non automatique, de quelques cas.

10,212 - Le type de placement n° 2 (machines par machine) est, quant à lui, à explorer en totalité.

10,22 - Pour l'exploitation industrielle

Il semble tout d'abord possible de réduire encore les temps de traitement :

- par une réduction du nombre d'accès disque, permise par l'utilisation d'une mémoire de 64 K octets aujourd'hui courante dans les mini-ordinateurs
- par la réduction des temps d'exécution des boucles des algorithmes les plus fréquemment utilisées : ces boucles sont détectées par les compteurs, mis en place dans le programme.

Par ailleurs, pour approfondir les recherches concernant la compréhension et l'utilisation pratique, des diverses démarches de la planification assistée, plusieurs voies s'offrent à nous.

De ces voies, nous ne retenons pas celles qui obligent à l'exploration de tous les cas possibles. Le caractère combinatoire du problème est tel que le temps à passer pour son traitement serait prohibitif, même avec de puissants moyens informatiques. C'est pourquoi, nous n'avons retenu que des voies qui combinent le travail de l'homme chargé de planifier et des moyens mis à sa disposition. Ces voies lui permettent d'essayer et de choisir parmi les solutions ressortant des traitements informatiques, grâce à une structure conversationnelle. Elles lui permettent aussi d'obtenir les réponses aux questions qu'il se pose pour constituer son planning en fonction des objectifs qui lui sont donnés ou qu'il se donne.

Les directions générales des méthodes envisagées sont :

- éviter des algorithmes complexes et lourds prétendant faire prendre en compte par le seul ordinateur tout ou presque tout
- dégager plusieurs modes de raisonnement qui, par étapes relativement simples à suivre pour l'homme, aboutissent à un résultat, c'est-à-dire à un placement effectif des travaux et à un respect absolu des contraintes physiques de réalisation de ces travaux
- mettre à la disposition de l'homme, le plus rapidement et clairement possible, les informations dont il a besoin (et celles là seules) pour guider les manoeuvres qu'il envisage.

NOM DE L'ETUDIANT : BERNAD Jacques

NATURE DE LA THESE : DOCTORAT d'UNIVERSITE



VU, APPROUVE

et PERMIS D'IMPRIMER

NANCY LE 10.OCT 1978 7029

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I



NOM DE L'ETUDIANT : *PAKER Marko*

NATURE DE LA THESE : *DOCTORAT d'UNIVERSITE*

VU, APPROUVE

et PERMIS D'IMPRIMER

NANCY LE 10.OCT 1978 7040

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I

M. BOULANGE