

50376
1975
198

THÈSE

50376
1975
198

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE LILLE

pour l'obtention du titre de

Docteur - Ingénieur

par

G. BLEUSE



**MODELISATION ET SIMULATION
D'UNE CHAÎNE D'USINAGE
D'UN MOTEUR D'AUTOMOBILE**

Soutenue le 10 JANVIER 1975, devant la Commission d'Examen :

Membres du Jury : P. VIDAL - Président
C. MELIN - Rapporteur
L. POVY - Examineur
A. PETTE - Examineur
Mr HAMEAU - Invité

A MES PARENTS

A MES BEAUX-PARENTS

A MA FEMME

A MA FILLE

AVANT – PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille en collaboration étroite avec la Française de Mécanique à Douvrin.

C'est avec la plus grande bienveillance que Monsieur le Professeur VIDAL nous a accueilli dans son laboratoire et nous a permis d'y effectuer nos recherches. Monsieur le Professeur VIDAL nous a grandement honoré en voulant bien accepter la Présidence de notre Jury.

Monsieur MELIN, Maître-Assistant à l'Université des Sciences et Techniques de Lille, nous a suivi durant toute cette étude avec intérêt et sympathie. Nous sommes très heureux de pouvoir lui exprimer ici toute notre gratitude.

Que Monsieur POVY, Maître de Conférence à l'Université des Sciences et Techniques de Lille trouve ici l'expression de nos vifs remerciements pour l'enseignement qu'il nous a dispensé à l'École d'Informatique, Mesures et Automatique, et pour l'honneur qu'il nous a fait en participant à la Commission d'Examen.

Nous remercions Monsieur LANGE, Directeur de la Française de Mécanique, et Monsieur COULANGE, Directeur du Département Administratif et Financier, de nous avoir permis d'appliquer nos recherches à la Française de Mécanique.

Nous adressons également tous nos remerciements à Monsieur PETTE, Responsable de l'Informatique Industrielle à la Française de Mécanique, qui nous a conseillé et guidé dans l'édification de ce travail. Sa sollicitude et sa bienveillance nous ont toujours été d'un grand soutien.

Nous sommes reconnaissant à Monsieur HAMEAU, Chef de Fabrication du moteur X, d'avoir considéré avec bienveillance nos travaux et de nous avoir fait l'honneur d'être membre du Jury.

Nous ne saurions terminer cet avant-propos sans exprimer notre reconnaissance au personnel du Service Informatique de la Française de Mécanique, et plus particulièrement à son chef, Monsieur LIPPENS qui nous a accueilli dans son service pendant de longs mois, et à Monsieur BULTEZ, Programmeur Système, qui nous a très efficacement conseillé pour l'utilisation des moyens informatiques. Nous n'oublierons pas Madame LEGRAND, Secrétaire à la Française de Mécanique, qui a accepté de dactylographier ce mémoire dans des délais très brefs.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
<u>INTRODUCTION GÉNÉRALE</u>	1
<u>CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS</u>	
Introduction	3
1.1 — Étude fonctionnelle d'une unité de production	4
1.11 - Diagramme fonctionnel d'une unité de production	4
1.12 - Exploitation	4
1.13 - Services d'études	6
1.2 — Nécessité de nouveaux moyens d'étude	6
1.21 - Assistance de Fabrication	7
1.22 - Élaboration d'un modèle de chaîne	7
Conclusion	9
<u>CHAPITRE II : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UNE CHAÎNE D'USINAGE</u>	
<u>DÉFINITION DU PROBLEME</u>	
Introduction	10
2.1 — Analyse du processus d'usinage	11
2.11 - Fonction d'une chaîne d'usinage	11
2.12 - Description d'une chaîne d'usinage	11
2.12.1 - Description d'une machine	12

2.12.2 - Description d'un convoyeur	12
2.12.3 - Personnel	12
2.13 - Fonctionnement d'une chaîne d'usinage	12
2.13.1 - Convoyeur	12
2.13.2 - Fonctionnement d'une machine et rôle du personnel	13
2.13.2.1 - Les causes d'arrêt	13
2.13.2.2 - La marche normale	14
2.2 — État d'une machine et événements	15
2.21 - Définition de l'état machine	15
2.22 - Événement	16
2.23 - Relations états - événements	17
2.3 — Évolution de l'état d'une machine	17
2.31 - Classification des états	17
2.32 - Étude des transitions entre états	18
2.4 — Méthodes d'exploitation d'une chaîne d'usinage	19
2.41 - Aléas de fonctionnement	20
2.42 - Étude des résultats du fonctionnement	21
2.5 — Définition du problème	22
2.51 - Hypothèses	22
2.52 - But de l'étude	22
Figures	24
Conclusion	32

CHAPITRE III : CHOIX D'UNE METHODE DE CONSTRUCTION DU MODELE

Introduction	33
3.1 — Une chaîne d'usinage est un phénomène d'attente	34
3.1.1 - Rappels sur les phénomènes d'attente	34
3.1.2 - Application à une chaîne d'usinage	34
3.2 — Définition du modèle mathématique	35
3.2.1 - Hypothèses préalables	35
3.2.2 - Modèle mathématique	35
3.3 — Simulation du modèle de phénomène d'attente	38
3.3.1 - Principe de GPSS	38
3.3.1.1 - La chronologie	39
3.3.1.2 - Le mobile	39
3.3.1.3 - Le chaînage	39
3.3.2 - Les blocs de traitements	39
3.4 — Problèmes posés par la détermination des lois de fin d'usinage des machines	40
3.5 — Modèle logique de simulation	41
3.5.1 - Choix d'une chronologie	41
3.5.2 - Simulation des phénomènes aléatoires	42
3.5.2.1 - Séquence équiprobable de base	42
3.5.2.2 - Echantillon artificiel d'une loi de probabilité quelconque	43
Figures	45
Conclusion	49

CHAPITRE IV : CONSTRUCTION DU MODELE

Introduction	50
4.1 — Fonctions à réaliser	51
4.11 - Fonction machine	51
4.12 - Fonction convoyeur	51
4.13 - Liaison convoyeurs - machines	51
4.14 - Liaison opérateurs - machines	52
4.15 - Liaison opérateurs - convoyeurs	52
4.16 - Fonctions début de simulation et fin de simulation	52
4.2 — Traitements à effectuer	52
4.21 - Balayage temporel	52
4.22 - Balayage spatial	52
4.23 - Traitement d'un convoyeur	53
4.24 - Traitement d'une machine	53
4.3 — Méthode d'organisation rationnelle des traitements	53
4.4 — Structure hiérarchisée du programme de simulation	55
4.5 — Définition des paramètres	57
4.51 - Paramètres machine	57
4.52 - Paramètres convoyeur	59
4.53 - Paramètres représentant le personnel	60
4.54 - Paramètres généraux	60
Figures	61
Conclusion	68

CHAPITRE V : RÉSULTATS

Introduction	69
5.1 — Mise en œuvre du modèle	70
5.11 - Entrée des données	70
5.12 - Simulation	70
5.13 - Sortie des résultats	70
5.13.1 - Résultats globaux	71
5.13.2 - Résultats intermédiaires	71
5.14 - Langages de programmation et système informatique utilisé	71
5.15 - Possibilités du programme de simulation FFSIMASS	71
5.15.1 - Limites des paramètres machines	72
5.15.2 - Limites des paramètres convoyeurs	72
5.15.3 - Limites des paramètres opérateurs	72
5.2 — Principaux résultats obtenus	73
5.21 - Remarques préalables	73
5.22 - Description de la chaîne prise comme exemple	73
5.23 - Reproduction d'une journée de fonctionnement	75
5.23.1 - Examen des caractéristiques de la chaîne	75
5.23.2 - Initialisation des machines et des convoyeurs	76
5.23.3 - Résultats globaux	76
5.23.4 - Évolution dans le temps	77
5.24 - Simulation du fonctionnement de la chaîne au maximum de ses possibilités	79
5.24.1 - Résultats globaux	79
5.24.2 - Évolution dans le temps	79

5.3 — Comparaison des résultats et des objectifs	80
5.31 - Rappel des objectifs	80
5.32 - Certains objectifs sont atteints	80
5.33 - Certains objectifs ne sont pas atteints	80
Figures	82
Conclusion	109
CONCLUSION GÉNÉRALE	110

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis quelques décennies, l'étude des systèmes naturels ou construits par l'homme a pris une ampleur sans cesse croissante, les systèmes devenant eux-mêmes de plus en plus importants et complexes.

La mise en place de tels systèmes et la modification de ceux déjà existants ont nécessité l'élaboration et l'utilisation de nouvelles méthodes basées sur des théories abstraites ; ainsi sont nées de nouvelles sciences telles que l'Automatique, le Management, la Recherche Opérationnelle destinées à suppléer l'intuition et l'expérience que les responsables utilisent habituellement pour prendre les décisions en l'absence de connaissances suffisantes des systèmes qu'ils utilisent /1/ et /2/.

L'un des principaux moyens d'investigation nouvellement utilisé est la simulation qui est essentiellement une façon de travailler par analogie, analogie signifiant similitude de comportement avec le système (propriétés du système et relations entre ses composants). Les mesures ou les observations faites sur le modèle doivent permettre de prévoir la réaction du système réel et vice versa /1/. La simulation répond à plusieurs besoins :

- les systèmes ont une très grande taille ;
- les interactions entre les éléments du système sont très complexes ;
- il est nécessaire de tenir compte du plus grand nombre de facteurs significatifs ;
- les relations non linéaires deviennent les plus importantes.

Ces contraintes font que l'étude analytique devient très difficile sinon impossible, et il faut faire appel à la simulation.

La simulation suppose la construction d'un modèle mathématique ou physique présentant des réactions similaires à celles du système technologique ou naturel, objet de l'étude.

Pour la construction de ce modèle, il est à remarquer d'une part que les liaisons et les interactions entre les parties du système sont aussi ou plus importantes que les parties et d'autre part qu'il vaut mieux tenir compte du plus grand nombre de facteurs possible, même de ceux semblant avoir un effet négligeable sur le fonctionnement du système, quitte à simplifier le modèle, après avoir vérifié l'inutilité de certains facteurs.

L'apparition des calculateurs électroniques et l'accroissement constant de leurs performances (cycle mémoire, vitesse des échanges avec les périphériques, taille mémoire centrale) ont permis l'élaboration et l'utilisation de modèles de plus en plus complexes et par voie de conséquence de plus en plus proches de la réalité.

De façon générale, les modèles sont utilisés /1/ :

- dans un but d'expérimentation ou d'évaluation (changement de structure du système étudié, modification de son mode d'exploitation ...) ;
- comme un moyen d'apprendre le comportement de nouveaux systèmes ;
- comme un outil pour familiariser le personnel au mode de fonctionnement d'un système ;
- pour démontrer ou vérifier une nouvelle idée, un nouveau système, une nouvelle approche ;
- pour prévoir le futur et prendre les dispositions en conséquence.

Dans tous les cas, il faut noter l'opposition entre la recherche d'une bonne solution et la recherche de la meilleure solution ; on s'attachera surtout à rechercher l'amélioration mais non l'optimum du fonctionnement d'un système.

Le plan suivi dans ce mémoire suit les différentes étapes de la construction et de l'utilisation d'un modèle.

Le chapitre I constatera l'existence d'un problème.

Le chapitre II isolera les facteurs qui semblent interagir pour provoquer les symptômes observés ; nous y déterminerons les boucles de retour liant les décisions aux actions et nous formulerons les politiques de décision acceptables qui décrivent comment les décisions résultent des informations disponibles.

Le chapitre III nous permettra d'examiner les différentes techniques de simulation et de déterminer une méthode permettant d'obtenir un modèle performant.

Dans le chapitre IV, nous construirons un modèle des politiques de décision, des sources d'informations et des interactions entre les composants du système.

Enfin, dans le chapitre V, nous ferons évoluer dans le temps le système décrit par le modèle, en comparant avec ce qui est connu du système réel.

CHAPITRE I — GÉNÉRALITÉS

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons étudier brièvement la structure d'une unité de production des pièces constituant un moteur d'automobile, unité composée d'une part des services d'exploitation, et d'autre part des services d'études et des services administratifs.

Nous montrerons ensuite la nécessité de définir de nouveaux moyens d'études permettant une meilleure connaissance du fonctionnement des moyens de production, dans le but d'améliorer leur rendement.

1.1 — ÉTUDE FONCTIONNELLE D'UNE UNITÉ DE PRODUCTION

Le but d'une unité de production est d'usiner les pièces essentielles d'un moteur (vilebrequin, piston, culasse, ...). Les pièces brutes (moulées à l'extérieur de l'unité) y subissent diverses opérations d'usinage, montage et contrôle et sont ensuite dirigées vers l'atelier de montage des moteurs (extérieur à l'unité).

Une unité de production se décompose essentiellement en deux parties :

- l'exploitation regroupant la fabrication proprement dite et l'entretien ;
- les services annexes tels que les services d'études et les services administratifs.

1.11 - DIAGRAMME FONCTIONNEL D'UNE UNITÉ DE PRODUCTION (figure I-1)

Lorsque la fabrication d'un moteur est envisagée ou que l'exploitation demande une modification des moyens de production, une étude technique préalable est nécessaire. A partir des résultats de cette étude (contenus dans «la gamme de fabrication») et de la détermination du coût du projet, la décision est prise de le mener ou non à terme. Si l'implantation ou la modification est acceptée, les services administratifs commandent l'outillage et les pièces nécessaires. Une fois le matériel livré, il faut l'installer ou réaliser la modification, puis faire les essais. Une fiche technique est alors établie et le matériel entre en exploitation normale.

La fabrication demande de maintenir les moyens de production en état de marche et fait donc appel à l'entretien ; elle peut demander aussi d'y apporter des modifications. Éventuellement, l'entretien demandera de modifier les moyens de production.

Nous définirons successivement le rôle de l'exploitation et celui des services d'études en nous limitant au circuit concernant les améliorations d'un matériel déjà existant.

1.12 - EXPLOITATION

Tous les moyens de production sont réunis dans l'atelier d'usinage qui est divisé en «chantiers» correspondant chacun à une pièce du moteur (chantier des bielles, chantier des pistons, ...). Le matériel nécessaire à la transformation et au transport des pièces forme la «chaîne d'usinage» du chantier qui est mise en œuvre par le personnel d'exploitation.

Nous étudierons le fonctionnement d'une chaîne d'usinage au chapitre suivant ; il nous suffit pour l'instant de savoir que l'usinage d'une pièce nécessite une suite d'«opérations» (usinage, manutention, montage). A chaque opération, correspondent un équipement et un «temps alloué» qui est la somme du «temps opératoire» et des «temps supplémentaires personnel».

Le temps opératoire est le temps moyen ramené à la pièce représentant la durée pratique d'une opération. Il se décompose en :

- temps de phase mécanique ;
- temps fréquentiels ramenés à la pièce : temps de changement des outils toutes les mille pièces, temps nécessaire à la manutention d'une caisse de cinquante pièces usinées, etc ...

Les temps supplémentaires personnel permettent à l'opérateur de satisfaire à ses besoins personnels et de récupérer la fatigue provoquée par les différents efforts qu'il doit fournir.

Du temps alloué, on déduit la cadence horaire moyenne de l'opération :

$$\text{cadence} = \frac{6.000}{\text{temps alloué}}$$

cadence : en nombre de pièces par heure

temps alloué : en centième de minutes.

Les interventions peuvent, soit avoir été prévues à la conception de la chaîne, soit provenir d'une demande d'amélioration de son fonctionnement.

Dans le premier cas, le programme de fabrication peut prévoir l'installation d'un matériel supplémentaire lorsque la production aura atteint un certain seuil : par exemple, lorsque la cadence d'une opération se révèle trop faible, il est possible de la doubler en installant, en parallèle, un matériel identique à celui installé à l'origine. Il peut s'agir aussi d'effectuer une opération supplémentaire sur la pièce usinée à la suite d'un aménagement prévu de ses caractéristiques.

Dans le second cas, la fabrication ou l'entretien peuvent demander une modification de l'installation existante ; citons par exemple :

- aménagement de stocks à terre doublant les stocks dans les convoyeurs et permettant d'assurer une marche plus régulière ;
- amélioration des moyens de contrôle pour éviter que des pièces hors-côte ne soient prises comme bonnes ;
- amélioration du pré réglage des outils de façon à diminuer les rebuts lors des réglages consécutifs aux changements des outils ;
- aménagement du poste de travail diminuant la fatigue de l'opérateur.

Ces différentes interventions font tout d'abord l'objet d'un examen de la part des services d'études.

1.13 - SERVICES D'ÉTUDES

A partir des désirs des utilisateurs, les services d'études définissent la technique à utiliser et les moyens à mettre en œuvre.

Les implantations et modifications demandées ont souvent pour conséquence de remettre en cause les caractéristiques de l'ensemble de la chaîne. Il faudra par exemple installer une nouvelle machine et donc choisir cette machine et les outils qui usinent les pièces. L'étude technique doit être doublée d'une étude financière, car il est évident que la transformation doit être rentable. Les services d'études déterminent ensuite le nouveau temps alloué à l'opération.

Une autre fonction des services d'études est de déterminer les méthodes d'exploitation des moyens de production, par exemple l'affectation des opérateurs aux différentes opérations de la chaîne. Les moyens de production étant souvent automatiques, l'opérateur n'intervient qu'en cas d'anomalie de fonctionnement ou pour changer les outils. On peut donc affecter un opérateur par opération (il changera seul les outils) ou former un groupe d'opérateurs s'occupant de plusieurs opérations: lors d'un changement d'outils, plusieurs opérateurs seront affectés à l'opération et la durée de l'intervention, donc de l'arrêt de la production, sera réduite.

Il est à remarquer que les méthodes classiques ne permettent pas d'étudier de manière suffisamment précise l'effet de la modification sur le fonctionnement de l'ensemble de la chaîne; elles n'ont qu'une action ponctuelle: l'opération modifiée.

Les services d'études ont donc besoin de nouvelles méthodes permettant de mieux apprécier l'effet d'une modification sur l'opération concernée et sur l'ensemble de la chaîne.

1.2 - NÉCESSITÉ DE NOUVEAUX MOYENS D'ÉTUDES

Lorsqu'une chaîne ne travaille pas à plein rendement, une vision ponctuelle est suffisante; si la modification d'une opération a trop de répercussion sur l'équilibre du fonctionnement total, il suffit en général d'agir sur les opérations adjacentes pour rétablir cet équilibre. Ce n'est plus le cas lorsqu'il faut augmenter la cadence et que la chaîne arrive à saturation: l'interdépendance entre les opérations est trop grande et, en particulier, la détermination du temps alloué à l'opération n'est plus suffisante (par exemple lors d'un changement d'outils effectué sur l'opération n, l'opération n-1 (précédente) doit être arrêtée si la capacité des moyens de stockages des pièces entre les deux opérations est atteinte, et le rendement de n-1 sera diminué).

Il a donc fallu élaborer de nouveaux moyens d'études permettant d'avoir une vision d'ensemble de la chaîne. Le premier, déjà utilisé actuellement, est l'«Assistance de fabrication», le second est un modèle de chaîne dont l'identification fait l'objet de cette étude.

1.21 - ASSISTANCE DE FABRICATION

Le système de l'Assistance de fabrication se compose d'un ensemble de « coffrets » saisissant les informations sur les machines et d'un calculateur central traitant ces informations.

Les informations proviennent soit d'une modification du fonctionnement d'une machine, soit d'une action de l'opérateur et leur traitement se fait en temps réel et en différé.

- a) La fonction temps réel consiste à surveiller le fonctionnement des machines à partir des informations saisies. Lorsque le fonctionnement n'est pas normal, le système réagit soit directement sur la machine, en interrompant sa marche normale, soit en avertissant les opérateurs. Ceux-ci peuvent d'autre part obtenir des renseignements récapitulatifs du fonctionnement de la machine. En même temps que cette fonction de surveillance, le système enregistre toute modification intervenant dans le fonctionnement des machines ; ces informations sont traitées ensuite en différé.
- b) La fonction traitement différé permet d'exploiter les informations chaque jour à la fin de chaque semaine, de chaque mois et à la demande. Elle aboutit à différents « états » et informations d'archivage.

Les « états » permettent aux exploitants d'apprécier le bon fonctionnement de leurs chaînes en particulier, en récapitulant les rendements moyens, les productions globales des machines, l'usure moyenne des outils, et en mettant en évidence diverses anomalies de fonctionnement telles que les pannes, les points d'engorgement ralentissant l'écoulement des pièces le long de la chaîne, etc

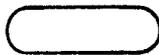
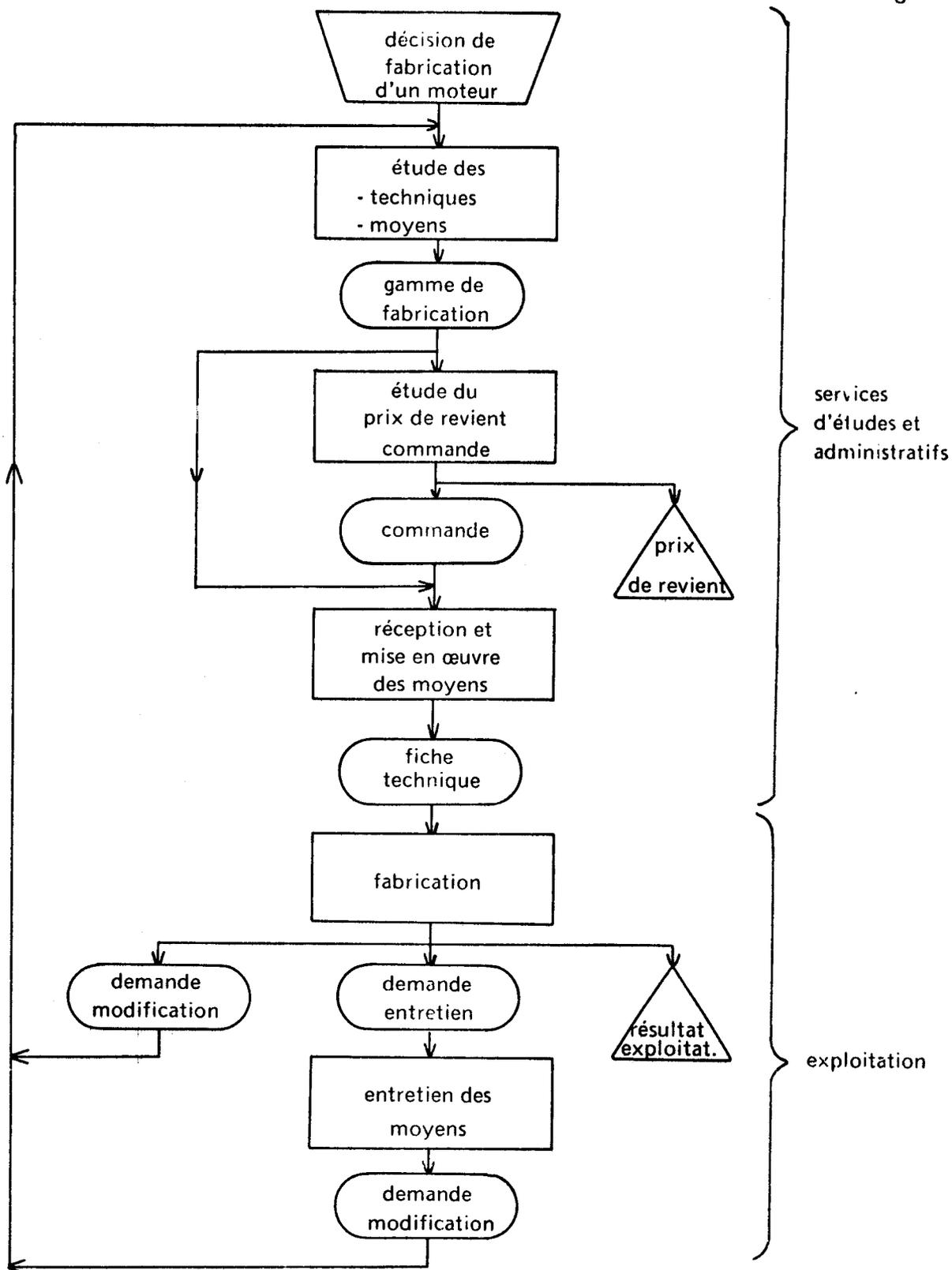
Les informations archivées permettent de faire des statistiques par exemple sur les temps alloués à chaque opération pour ensuite les comparer à ce qui était prévu, sur les pannes par type et par machine, sur les outils ; ces différentes statistiques servent à déterminer le rendement global de chaque opération pour une période suffisamment longue et peuvent servir d'informations de référence lors de la conception de nouvelles chaînes.

1.22 - ELABORATION D'UN MODELE DE CHAÎNE

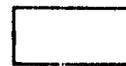
Ce modèle doit permettre de simuler (dans le sens le plus général du terme) le fonctionnement d'une chaîne, c'est-à-dire de reproduire, le plus fidèlement possible, l'évolution dans le temps de ses différents éléments. L'avantage d'une telle méthode est de pouvoir étudier d'une façon simple l'effet des modifications que l'on voudrait apporter aux moyens de production ou à la façon de s'en servir. On obtient ainsi des renseignements qu'il n'était pas possible d'avoir auparavant, si ce n'est par essai direct sur la chaîne, ce qui était rarement fait en raison, particulièrement, du coût élevé de la méthode.

De plus, les renseignements obtenus ne concernent pas seulement l'opération modifiée, mais aussi l'ensemble de la chaîne. Les services d'études pourront ainsi juger de l'effet de la modification à la fois sur l'opération concernée et sur le fonctionnement de toute l'installation.

Enfin, étant supposé le faible coût d'utilisation d'un tel modèle, les services d'études pourront procéder à de nombreux essais et dégager ainsi une bonne solution.



informations



traitement



FIGURE I.1

CONCLUSION

Une chaîne d'usinage est l'ensemble des moyens matériels réalisant les «opérations» nécessaires à l'usinage d'une pièce de moteur automobile. La «fabrication» met en œuvre ces moyens et l'«entretien» en assure la maintenance.

Ces deux services sont aidés par l'«Assistance de fabrication» qui contrôle le fonctionnement de la chaîne en temps réel et enregistre des informations traitées ensuite en différé. Les résultats de ce traitement permettent aux exploitants (fabrication et entretien) de détecter les anomalies de fonctionnement tandis que les services d'études disposent de meilleures informations pour étudier les modifications à apporter à la chaîne.

Ces modifications concernent une ou plusieurs opérations et les méthodes à la disposition des services d'études n'autorisent qu'une action ponctuelle suffisante lorsque la chaîne n'a pas atteint sa capacité de production maximum.

Lorsque cette capacité est atteinte, la modification d'une opération réagit sur l'ensemble du fonctionnement de la chaîne et il devient nécessaire d'en étudier l'effet total avant de la réaliser. Ceci est possible en reproduisant artificiellement le fonctionnement de la chaîne à l'aide d'un modèle de simulation.

Pour construire ce modèle, nous analyserons tout d'abord le mode de fonctionnement d'une chaîne d'usinage.

CHAPITRE II

ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UNE CHAÎNE D'USINAGE – DÉFINITION DU PROBLÈME

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous étudions successivement la fonction, la structure et le fonctionnement d'une chaîne d'usinage.

Une analyse détaillée du fonctionnement de celle-ci conduit, tout d'abord, à définir les notions d'état machine et d'événement. A partir d'une description des méthodes d'exploitation, dont l'application doit permettre la réalisation du programme de fabrication, nous montrons que le fonctionnement logique de la chaîne est perturbé par un certain nombre d'incidents qui l'empêchent d'atteindre un régime permanent.

Dans ce sens, des moyens permettant de juger du fonctionnement de la chaîne sont proposés.

2.1 — ANALYSE DU PROCESSUS D'USINAGE

2.11 - FONCTION D'UNE CHAÎNE D'USINAGE

Une chaîne d'usinage est la matérialisation dans l'atelier, au moyen de machines et de convoyeurs, de la «gamme d'usinage» établie par les services d'études des moteurs.

L'usinage d'une pièce brute nécessite de lui faire subir une succession d'«opérations» dans un ordre déterminé. A chaque opération, correspond une machine (parfois deux en parallèle pour rendre à peu près égales les cadences de chaque opération).

Exemple de «gamme d'usinage»

Soit à usiner des arbres à cames. La «gamme de fabrication» peut être succinctement décrite par la figure II.1.

Nous avons déjà vu que le «temps alloué» à l'opération est la somme du temps opératoire (temps de phase mécanique plus temps fréquentiels ramenés à la pièce) et des temps supplémentaires personnel (dépendant du travail et indépendant du travail).

Le temps alloué (durée moyenne d'une opération) permet de définir la production horaire ou cadence moyenne.

Il faut remarquer, sur cet exemple, les différences de cadence entre les différentes opérations. La production horaire moyenne de la chaîne sera au plus égale à la production horaire de la machine la plus lente. Le doublement de la machine M3 fera passer à 120 la cadence de la troisième opération, et à 100 la cadence moyenne de la chaîne.

L'installation de convoyeurs de capacités adéquates entre chaque opération permet d'une part, de transporter les pièces d'une opération à la suivante et d'autre part, d'amortir l'effet à court terme des différences de cadence et par là, d'assurer un fonctionnement plus régulier.

2.12 - DESCRIPTION D'UNE CHAÎNE D'USINAGE

C'est un ensemble de machines effectuant les opérations de la gamme de fabrication, et reliées entre elles par des convoyeurs transportant les pièces. Le fonctionnement est contrôlé par le personnel d'exploitation.

Reprenons l'exemple de la gamme d'usinage précédente (figure II.1).

En doublant la machine M3, la configuration de la chaîne est donnée (figure II.2).

2.12.1 - DESCRIPTION D'UNE MACHINE

Les machines peuvent être de trois types : «transferts automatiques», «banales» ou «spéciales». Nous nous limiterons à l'étude d'une chaîne composée de machines transferts automatiques.

Une machine transfert comporte un ou plusieurs postes d'usinage (ou stations) équipés chacun d'un ou plusieurs outils travaillant automatiquement.

Le chargement, le déchargement des pièces et leur transport d'une station à la suivante s'effectuent automatiquement au moyen d'une «barre transfert» (figure II.3).

2.12.2 - DESCRIPTION D'UN CONVOYEUR

Les pièces sont transportées d'une machine à la suivante à l'aide de convoyeurs automatiques ou manuels.

Nous considérerons seulement les convoyeurs automatiques : les pièces y sont déposées par la machine amont, transportées puis reprises par la machine aval, normalement sans intervention de l'opérateur.

Nous verrons plus loin que le personnel d'exploitation peut, dans certains cas, intervenir dans le transport des pièces.

2.12.3 - PERSONNEL

Le personnel d'exploitation est composé d'opérateurs commandés par un chef d'équipe.

On peut compter un opérateur par machine, un opérateur pour plusieurs machines, ou un groupe de plusieurs opérateurs pour plusieurs machines.

2.13 - FONCTIONNEMENT D'UNE CHAÎNE D'USINAGE

Le fonctionnement global d'une chaîne résulte du fonctionnement des machines et des convoyeurs, contrôlé par le personnel d'exploitation.

2.13.1 - CONVOYEUR

On considère que les convoyeurs sont des éléments passifs. Leur rôle est d'une part, de transporter les pièces d'une machine à la suivante et d'autre part, de servir de stocks-tampons permettant de régulariser le fonctionnement des machines. Ces stocks-tampons constituent les «en-cours» d'usinage et représentent un capital immobilisé.

Un convoyeur est principalement caractérisé par sa capacité, qui est le nombre maximum de pièces qu'il peut contenir, et par le temps mis par une pièce pour le traverser lorsqu'il est vide.

Les stocks de pièces contenus dans les convoyeurs sont parfois insuffisants, il est possible de constituer alors des stocks à terre qui permettront d'atteindre le volume d'encours désiré, et les opérateurs devront charger manuellement le convoyeur lorsqu'il est vide ou le décharger lorsqu'il est plein.

2.13.2 - FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE ET ROLE DU PERSONNEL

Une machine est soit en marche normale, soit à l'arrêt. Durant la marche normale, le cycle se répète continuellement et automatiquement.

2.13.2.1 - LES CAUSES D'ARRÊT

Les arrêts sont dus à des causes diverses, que nous définissons ci-après :

a) disponibilité :

La machine a réalisé le programme d'usinage qui lui était fixé pour une période donnée, avant la fin de cette période. La maîtrise peut aussi décider d'arrêter la machine, sachant qu'elle est en avance sur son programme : les opérateurs pourront alors être affectés à d'autres tâches.

b) panne :

Le personnel d'exploitation n'est pas concerné. C'est le personnel d'entretien qui doit intervenir.

c) changements d'outils :

Un outil est constitué d'un corps et d'une partie coupante. L'usinage des pièces détériore cette partie coupante et il faut réaffûter l'outil régulièrement (figure 11.4). Lorsque la partie coupante est complètement usée, l'outil doit être changé.

La durée de vie d'un outil est fonction du nombre de pièces usinées entre deux réaffûtages (figure 11.5).

Le réaffûtage fréquent des outils augmente leurs durées de vie avec en contrepartie un accroissement des temps d'arrêts pour les changer.

A l'opposé, des réaffûtages trop espacés entraînent d'une part un accroissement du coût des outils en raison de leurs durées de vie plus faibles et d'autre part le risque d'un taux élevé de pièces mal usinées.

Dans ces conditions, la charnière P (figure 11.5) représente un compromis, et le changement d'un outil s'effectue normalement lorsque sa charnière est atteinte à 100 %. Par contre, lors du changement d'un outil dont la charnière est atteinte à 100 %, l'opérateur pourra, sur décision de la maîtrise, changer en même temps les outils dont la charnière est atteinte à 80 % par exemple, ce qui réduira les temps d'arrêt.

Les différents outils d'une machine sont répartis en plusieurs «classes» ; à chaque classe est associée une charnière valable pour tous les outils de la classe.

d) manque de personnel :

Lorsqu'une charnière est atteinte à 100 %, la machine est supposée ne plus pouvoir usiner dans de bonnes conditions, elle est donc arrêtée. Si le ou les opérateurs affectés à la machine ne sont pas disponibles, le changement d'outils ne pourra se faire et la cause de l'arrêt sera le manque de personnel.

e) désamorçage :

Il n'y a plus de pièces à l'entrée de la machine : généralement, le convoyeur précédent est vide.

Si le convoyeur vide est doublé d'un stock à terre, un opérateur disponible chargera manuellement le convoyeur.

Une machine peut être aussi en désamorçage sans que le convoyeur précédent ne soit vide : les pièces en mouvement dans le convoyeur n'ont pas encore atteint le poste de chargement de la machine.

f) saturation :

Il y a au moins une pièce au poste de déchargement de la machine.

Si le convoyeur suivant la machine est plein, qu'il y a possibilité de constituer un stock à terre, et que ce dernier n'a pas atteint un volume trop important, un opérateur disponible sera affecté au déchargement du convoyeur.

Si le convoyeur n'est pas plein, il faudra attendre que les pièces y aient progressé.

2.13.2.2 - LA MARCHE NORMALE

En marche automatique normale, une machine est caractérisée par :

a) temps de cycle :

C'est le temps de travail mécanique séparant l'instant début du mouvement de la barre transfert de l'instant début du mouvement suivant. Il s'exprime en centième de minutes.

b) cadence instantanée :

C'est le nombre maximum de pièces usinables en une heure.
Elle est donnée par :

$$\text{cadence instantanée} = \frac{6.000}{\text{temps de cycle}}$$

c) temps alloué et cadence moyenne :

Ces deux paramètres tiennent compte des temps fréquents ramenés à la pièce et des temps supplémentaires personnel.

$$\text{Cadence moyenne} = \frac{6.000}{\text{temps alloué}}$$

d) nombre de pièces par cycle :

Certaines machines effectuent la même opération simultanément sur plusieurs pièces dans un même cycle.

e) les différentes classes d'outils avec leurs charnières.

2.2 — ÉTAT D'UNE MACHINE ET ÉVÈNEMENT

2.21 - DÉFINITION DE L'ÉTAT MACHINE

D'après l'analyse précédente, une machine peut être caractérisée par les états élémentaires suivants :

- machine en cours de cycle ou Marche Normale (MN)
- disponibilité (DIS)
- panne (AM)
- manque de personnel pour changements d'outils (MP)
- changement d'outils (CO)
- saturation (SAT)
- désamorçage (DES)

Certains de ces états élémentaires peuvent exister simultanément au niveau d'une machine.

On appellera «état machine» une combinaison des états élémentaires :

$$E = (MN, DIS, AM, MP, CO, SAT, DES)$$

Les états élémentaires seront appelés «Variables Internes» (VI).

Le passage d'un état à un autre est provoqué par l'apparition d'«événements» que nous allons maintenant étudier.

2.22 - ÉVÈNEMENT

Un événement provoque un changement d'état machine.

On peut les définir suivant leur origine.

a) Évolution logique de la machine : elle conduit à la définition des événements suivants :

- début de cycle (DCY)
- fin de cycle (FCY)
- une ou plusieurs charnières atteintes à 100 % ce qui correspond généralement à Début de Changement d'Outils (DCO).

b) Mouvement des pièces

- nombre de pièces au poste de chargement inférieur au nombre de pièces par cycle : Début de Désamorçage (DDES) ;
- lors d'un désamorçage, le nombre de pièces au poste de chargement devient égal ou supérieur au nombre de pièces par cycle : c'est la Fin du Désamorçage (FDES) ;
- le poste de déchargement n'est pas vide : à la fin de son cycle d'usinage, la machine ne pourra pas décharger : c'est le Début de Saturation (DSAT) ;
- la machine étant en saturation, le poste de déchargement redevient vide : c'est la Fin de Saturation (FSAT).

c) Événements aléatoires

- incident mécanique ou autre, marquant le début d'une panne (DAM) ;
- fin de l'intervention du personnel d'entretien : fin de panne (FAM).

d) Action du personnel d'exploitation

- demande de mise en Disponibilité (DDIS) ;
- la machine étant en Disponibilité, le personnel décide de la remettre en marche (FDIS) ;
- une ou plusieurs charnières sont atteintes à 100 % et il n'y a pas d'opérateur disponible (DMP) ;
- la machine est en «Manque de personnel» et les opérateurs sont disponibles (FMP) ;
- les opérateurs ont terminé le changement d'outils (FCO).

2.23 - RELATIONS ETATS—ÉVÉNEMENTS

Une variable interne est présente entre les instants d'arrivée de l'événement début et de l'événement fin qui lui correspondent. Le tableau de la figure II.6 indique la correspondance entre événements et Variables Internes.

Variables Internes et événements sont des variables binaires : les deux seules valeurs possibles sont « présent » ('1') et « absent » ('0'). Si l'on considère les durées dans le temps d'un événement et d'une Variable Interne, l'événement est assimilable à une impulsion, la Variable Interne à un créneau (exemple de la figure II.7).

2.3 - ÉVOLUTION DE L'ÉTAT D'UNE MACHINE

L'examen des différentes combinaisons des Variables Internes montre que certaines d'entre elles ne peuvent exister. On ne rencontrera jamais la Variable Interne MN, qui correspond à la Marche Normale de la machine, en même temps que les autres Variables Internes qui indiquent un arrêt de la machine. De plus, parmi les arrêts, on peut distinguer ceux que l'on peut éviter (Disponibilité, DIS) et ceux qu'il faut subir (AM, MP, CO, SAT, DES).

2.31 - CLASSIFICATION DES ETATS

On peut donc effectuer une partition de l'ensemble E des combinaisons des Variables Internes, en cinq sous-ensembles (figure II.8) :

- a) le premier sous-ensemble comprend un seul état dont l'expression logique en fonction des Variables Internes est :

$$E_1 = \overline{MN} \cdot \overline{DIS} \cdot \overline{AM} \cdot \overline{MP} \cdot \overline{CO} \cdot \overline{SAT} \cdot \overline{DES}$$

La Variable Interne MN est présente et toutes les autres sont absentes.

(MN : MN est présente)

(\overline{MN} : MN est absente)

L'opérateur utilisé pour exprimer l'état E est le produit logique.

La machine est en marche : la production est normale.

- b) le deuxième sous-ensemble comprend un seul état dont l'expression est :

$$E_2 = \overline{MN} \cdot \overline{DIS} \cdot \overline{AM} \cdot \overline{MP} \cdot \overline{CO} \cdot \overline{SAT} \cdot \overline{DES}$$

La machine est à l'arrêt : La production est suffisante ou interrompue volontairement.

Ce type d'arrêt ne modifie pas le rendement de la machine.

c) le troisième sous-ensemble comprend tous les états qui vérifient l'expression :

$$E_3 = \overline{MN} \cdot \overline{DIS} \cdot (AM + MP \cdot CO + CO + SAT + DES)$$

(le signe \cdot entre les Variable figure le OU logique).

Soit après simplification :

$$E_3 = \overline{MN} \cdot \overline{DIS} \cdot (AM + CO + SAT + DES)$$

La machine est à l'arrêt : la production est interrompue et ce type d'arrêt diminue le rendement de la machine.

d) le quatrième sous-ensemble comprend un seul état dont l'expression est :

$$E_4 = \overline{MN} \cdot \overline{DIS} \cdot \overline{AM} \cdot \overline{MP} \cdot \overline{CO} \cdot \overline{SAT} \cdot \overline{DES}$$

Toutes les Variables Internes sont absentes et la machine est dite « non engagée » ; nous considérerons cet état comme transitoire lors de la succession des états machines.

2.32 -ÉTUDE DES TRANSITIONS ENTRE ÉTATS

La figure II.9 indique les différentes transitions entre les sous-ensembles E_1 , E_2 , E_3 , E_4 et les événements qui les provoquent.

RAC correspond au « refus d'autorisation de cycle », interdisant à la machine de se remettre en marche, et son expression en fonction des Variables Internes et des événements est :

$$RAC = \overline{AM} \cdot \overline{DAM} + \overline{AM} \cdot \overline{FAM} + \overline{CO} \cdot \overline{DCO} + \overline{CO} \cdot \overline{FCO} + \overline{SAT} \cdot \overline{DSAT} + \overline{SAT} \cdot \overline{FSAT} + \overline{DES} \cdot \overline{DDES} + \overline{DES} \cdot \overline{FDES}$$

Le RAC est donc présent lorsqu'une ou plusieurs des Variables Internes AM, CO, SAT, DES est ou devient présente.

Examinons les transitions possibles en fonction du sous-ensemble auquel appartient l'état initial et des événements susceptibles de se produire :

a) l'état initial appartient à E_1 (figure II.10), la machine est en marche normale.

Les événements qui peuvent se produire sont :

- FCY : MN disparaît, la machine devient alors « non engagée » (sous-ensemble E_4)
- DAM : la machine tombe en panne (AM apparaît, MN disparaît) et son état passe dans le sous-ensemble E_3 .

b) l'état initial appartient à E_2 (figure II.11), la machine est en Disponibilité.

Le seul événement possible est :

— FDIS : DIS disparaît et la machine devient non engagée (sous-ensemble E_4)

c) l'état initial appartient à E_3 (figure II.12).

Les événements pouvant survenir sont :

— FAM, FMP, FCO, FSAT, FDES si la Variable Interne correspondante était présente : ces événements provoquent la disparition de cette Variable Interne ;

— DAM, DSAT, DDES, si la Variable correspondante était absente : ils entraînent son apparition.

Tant que RAC sera présent, l'état restera dans le sous-ensemble E_3 ; lorsqu'il disparaîtra, la machine deviendra non engagée (sous-ensemble E_4).

Pour les sous-ensembles E_1 , E_2 , E_3 , l'absence d'événement maintient la machine dans l'état, donc le sous-ensemble précédent.

d) La machine est non engagée (sous-ensemble E_4). Il ne peut apparaître que les événements débuts suivants : DAM, DMP, DCO, DSAT, DDES : la Variable Interne correspondante apparaît, et l'état passe dans le sous-ensemble E_3 car chacun de ces événements correspond à un refus d'autorisation de cycle (RAC devient présent). (figure II.13).

Si aucun des événements ci-dessus n'est apparu, la machine peut être mise en Disponibilité par génération de DDIS : l'état passe dans le sous-ensemble E_3 .

S'il n'y a ni refus d'autorisation de cycle, ni mise en Disponibilité, l'événement DCY est généré et la machine passe dans l'état marche normale correspondant au sous-ensemble E_1 .

2.4 — MÉTHODES D'EXPLOITATION D'UNE CHAÎNE D'USINAGE

L'exploitation d'une chaîne d'usinage se fait en «poste» ou «tournée» d'une durée approximative de huit heures. Le nombre de postes quotidiens doit permettre de réaliser le programme de fabrication.

Ce dernier se compose essentiellement de deux parties : la production à réaliser sur une période de temps donnée et la valeur des en-cours d'usinage à maintenir en moyenne durant cette période (figure II.14).

Les responsables de la chaîne s'attachent à suivre ce programme en fixant à chaque tournée la production et les en-cours à réaliser en fonction des résultats des tournées précédentes et du programme.

Ils peuvent pour cela décider :

- qu'une machine doit usiner toutes les pièces qui lui parviennent ou seulement réaliser une production donnée ;
- le volume maximum des stocks à terre servant à doubler les stocks dans les convoyeurs pour atteindre un volume d'en-cours fixé ;
- de la politique de changements des outils, et en particulier, le pourcentage d'usure minimum pour changement, et l'effectif d'opérateurs nécessaire.
- mise en Disponibilité d'une machine pour en libérer les opérateurs.

2.41 - ALEAS DE FONCTIONNEMENT

Outre les pannes, affectant les machines, le fonctionnement d'une chaîne d'usinage est perturbé de différentes façons :

- a) La plupart des paramètres rencontrés ne possèdent pas une valeur stable tout au long d'une tournée.

Ainsi, le temps de cycle des machines peut varier dans de fortes proportions : les causes sont parfois déterminées (par exemple l'échauffement), mais le plus souvent inconnues.

De même, on assiste parfois à un non-respect des charnières outils : une classe d'outils est changée alors que la charnière est atteinte à 10 % ou 150 %.

- b) L'élément humain intervient aussi de façon très importante dans le fonctionnement : une machine dont les outils sont mal réglés produit des rebuts ; une augmentation du temps de cycle d'une machine est difficilement perceptible si elle n'est pas trop importante : cet incident cache parfois une grave anomalie de fonctionnement qui provoque des rebuts.

- c) Les opérations de contrôle des pièces après certaines opérations peuvent entraîner aussi des arrêts importants dans la production.

Si les pièces testées se révèlent mauvaises (défaut de surface ou non-respect des cotes, par exemple), il faut en rechercher les causes et éliminer les pièces défectueuses usinées auparavant. Pendant ce temps, la machine correspondante est arrêtée, ce qui peut avoir des répercussions sur le fonctionnement de toute la chaîne.

Ces incidents, dont nous n'avons donné que quelques exemples, et dont il est difficile de déterminer les causes, font que le fonctionnement réel de la chaîne s'éloigne sensiblement du fonctionnement théorique, et que ce fonctionnement est essentiellement transitoire : la multiplicité des incidents survenant durant une tournée empêche la chaîne d'atteindre un régime de fonctionnement permanent.

2.42 - ETUDE DES RESULTATS DU FONCTIONNEMENT

Très grossièrement, il est possible d'apprécier le fonctionnement d'une chaîne à partir du nombre de pièces usinées dans un temps donné : on pourra estimer ainsi le temps nécessaire pour respecter un programme de fabrication.

Une analyse plus détaillée nécessite l'étude :

a) du rendement de chaque machine, donné par :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Quantité produite} \times 100}{\text{Cadence moyenne (temps ouverture—temps de disponibilité)}}$$

Le temps d'ouverture est le temps pendant lequel la chaîne a fonctionné. Le rendement est donné en pourcentage.

b) du temps normal de production (TNP) et du temps normal de production gamme (TNP gamme) sur lequel se basent les services d'études :

$$\text{TNP gamme} = 6.000 \times \frac{\text{Quantité produite}}{\text{Cadence moyenne}}$$

$$\text{TNP} = \text{temps de Marche Normale} + \text{temps de changement d'outils}$$

(tous les temps sont donnés en centième de minutes).

La différence (TNP gamme — TNP) indique une variation du temps de cycle de la machine, ou du temps nécessaire pour changer les outils.

c) du coefficient E donné par l'expression :

$$E = \frac{\text{temps de marche normale}}{\text{temps engagement}}$$

le temps d'engagement étant donné par :

$$\text{temps d'engagement} = \text{temps d'ouverture} - \text{temps de Disponibilité} - \text{temps de manque de personnel.}$$

E est d'autant plus petit que les temps d'arrêts pour panne, changement d'outils, désamorçage, saturation sont plus grands.

e) de l'usure moyenne des outils pour chaque classe :

$$\text{usure moyenne} = 100 \times \frac{\text{nombre moyen de pièces usinées entre deux réaffûtages}}{\text{charnière de la classe}}$$

REMARQUE

Lorsque plusieurs des Variables Internes AM, MP, CO, SAT, DES présentes simultanément, la question se pose de l'affectation du temps qui s'écoule ; suivant l'importance de l'arrêt auquel chacune d'elles correspond, il a été établi une hiérarchie des Variables Internes : AM, MP, CO, SAT, DES dans l'ordre décroissant. L'affectation du temps se fait alors à la Variable Interne présente la plus prioritaire.

2.5 — DÉFINITION DU PROBLEME

Comme nous l'avons déjà vu, l'objet de l'étude est de construire un modèle de chaîne d'usinage. Dans ce sens, il convient, tout d'abord, de préciser les hypothèses de départ.

2.51 - HYPOTHESES

Pour la modélisation d'une chaîne d'usinage, nous retenons les hypothèses suivantes :

- a) la chaîne est composée de machines transferts automatiques et de convoyeurs automatiques qui ont un fonctionnement logique susceptible d'être reproduit ;
- b) la logique de fonctionnement des différents éléments de la chaîne est celle décrite dans la première partie de ce chapitre ;
- c) le rôle du personnel est d'une part, de changer les outils quand les charnières sont atteintes (avec la possibilité de changer en même temps les outils dont la charnière est presque atteinte) et d'autre part, de gérer les stocks à terre lorsqu'ils sont prévus ;
- d) des aléas de fonctionnement qui perturbent le fonctionnement de la chaîne, on ne retiendra que les pannes affectant les machines ; ce sont en effet les seuls arrêts aléatoires pour lesquels il est possible d'avoir des informations, dans l'état actuel des choses ;
- e) le modèle fonctionnera en boucle ouverte, c'est-à-dire qu'il ne fera pas de calcul d'optimisation du fonctionnement de la chaîne étudiée ; il ne fera que reproduire le fonctionnement à partir des données introduites au départ.

2.52 - BUT DE L'ETUDE

Comme nous l'avons déjà vu au chapitre précédent, le modèle doit constituer un outil pour les services d'études.

Ils devront pouvoir l'utiliser sur une chaîne existante pour :

- a) vérifier que la chaîne peut respecter le programme pour lequel ses éléments ont été calculés ;

b) étudier l'effet de la variation de certains paramètres de la chaîne. Citons principalement:

- la structure de la chaîne : lorsqu'une machine se révèle être un point d'engorgement qui ralentit toute la chaîne, il peut être intéressant d'étudier si le doublement de la machine élimine ce point de saturation ;
- le volume des en-cours peut être modifié en agissant sur la capacité des convoyeurs ou en aménageant des stocks à terre. L'avantage de l'augmentation du volume des en-cours est d'assurer un fonctionnement plus régulier de l'ensemble de la chaîne en atténuant l'effet de l'arrêt d'une machine sur la marche des autres machines ;
- l'étude des fréquences des changements d'outils doit permettre de diminuer la somme du coût des outils et du coût des temps d'arrêt pour les changer, en déterminant à partir de quel pourcentage d'usure les outils peuvent être changés ;
- l'accroissement de l'effectif des opérateurs et la modification de leur répartition doivent permettre de diminuer les temps improductifs des changements d'outils, saturation et démarrage avec en contre-partie une augmentation du coût de la main d'œuvre.

numéro d'opération	opération	machine	temps alloué en 1/100 de minute	cadence moyenne (pièces par heure)
1	tournage	M1	60	100
2	perçage, taraudage	M2	40	150
3	fraisage	M3	100	60
4	rectification	M4	50	120

FIGURE II.1

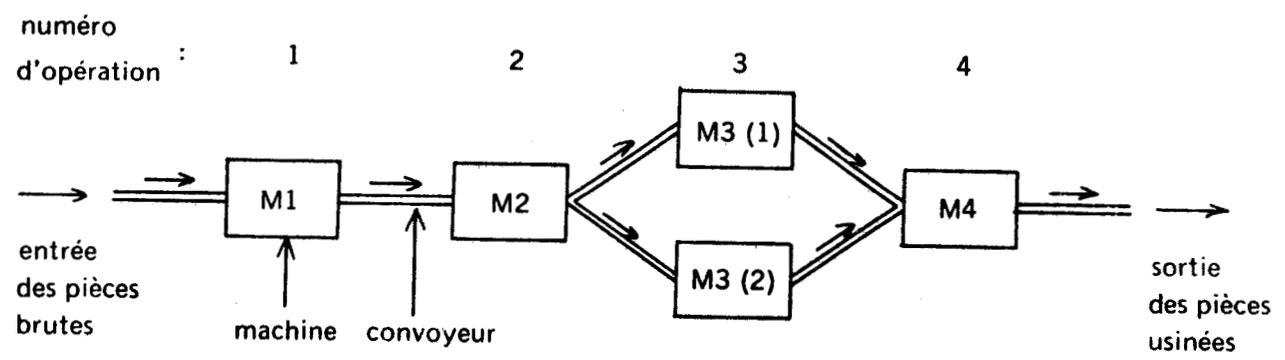
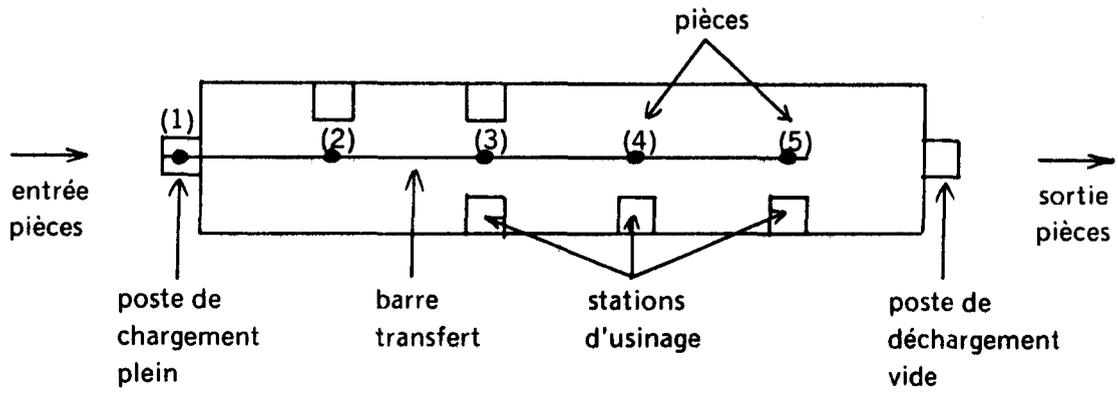
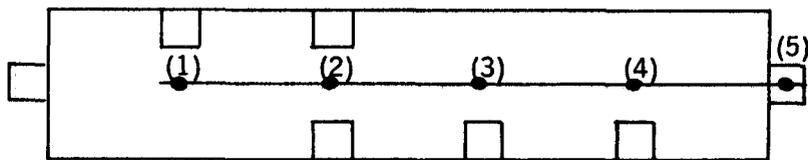


FIGURE II.2

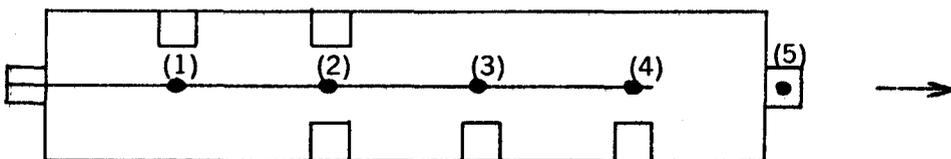




l'usinage est terminé
début du mouvement de la barre transfert



la barre transfert a fait progresser les pièces d'une position



fin du mouvement de la barre transfert
l'usinage peut commencer



FIGURE 11.3

Variable Interne	Événement début	Événement fin
MN	DCY	FCY
DIS	DDIS	FDIS
AM	DAM	FAM
MP	DMP	FMP
CO	DCO	FCO
SAT	DSAT	FSAT
DES	DDES	FDES

FIGURE II.6

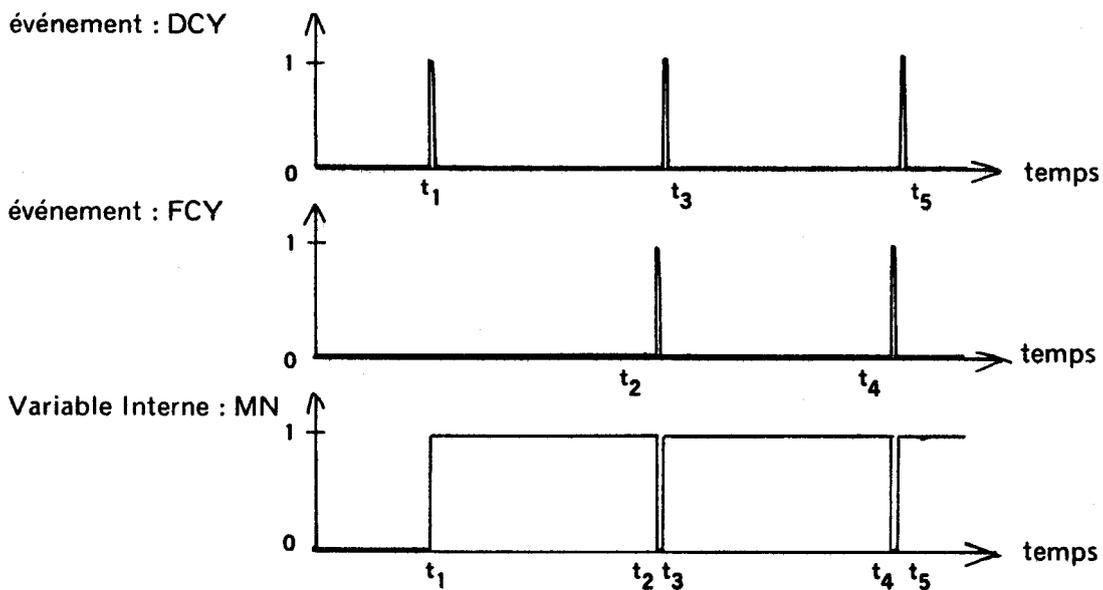


FIGURE II.7



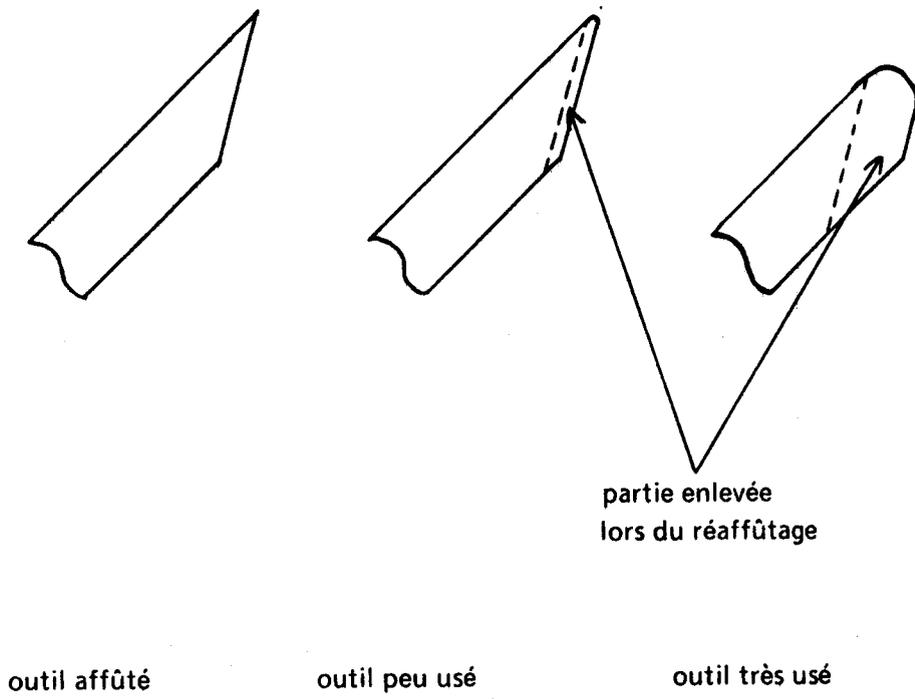


FIGURE II.4

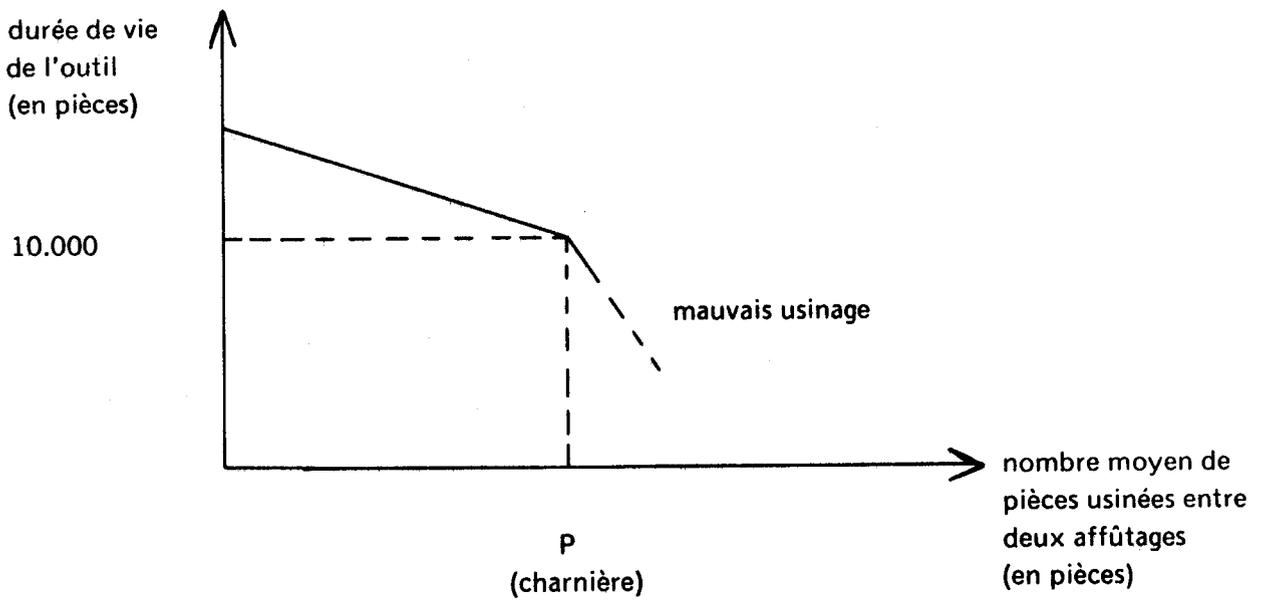


FIGURE II.5



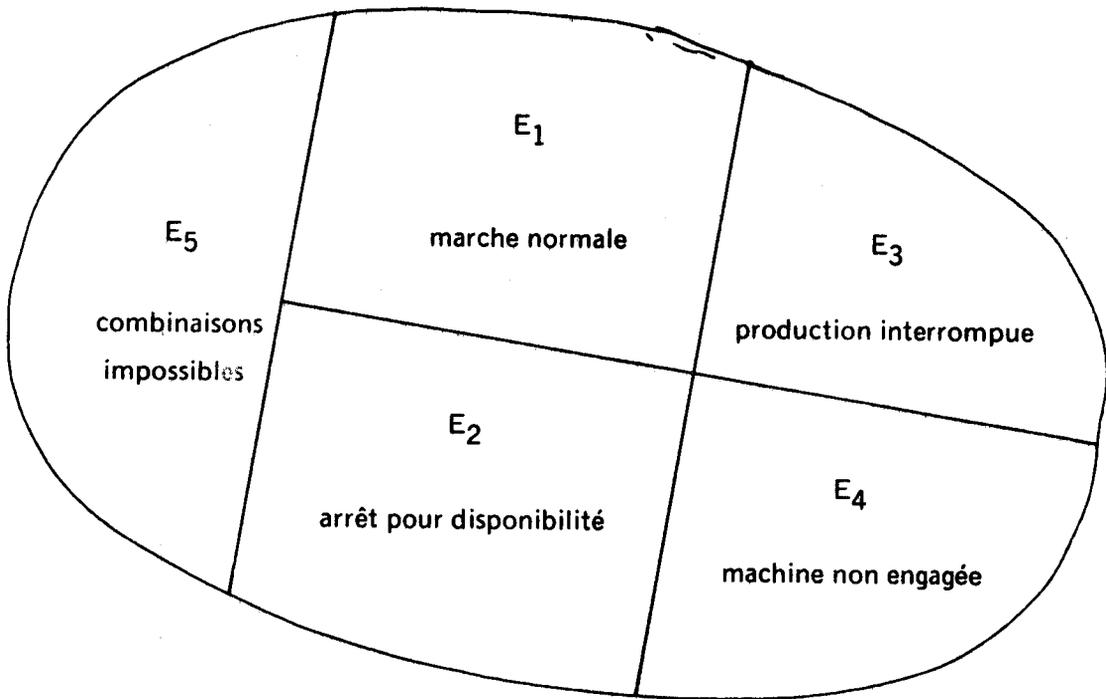


FIGURE II.8

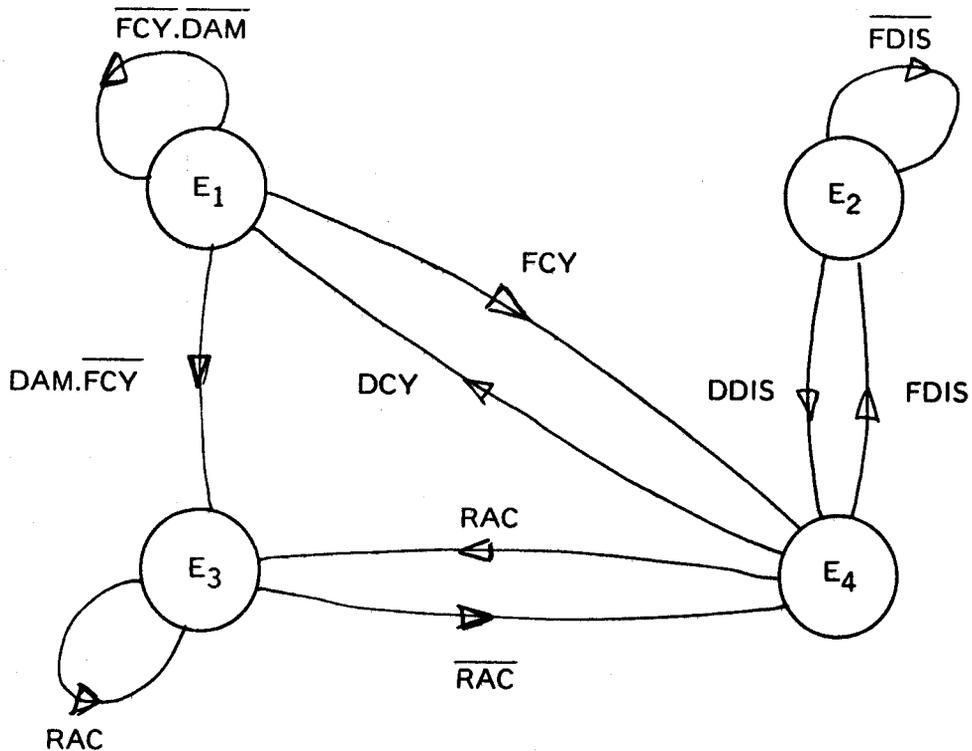


FIGURE II.9



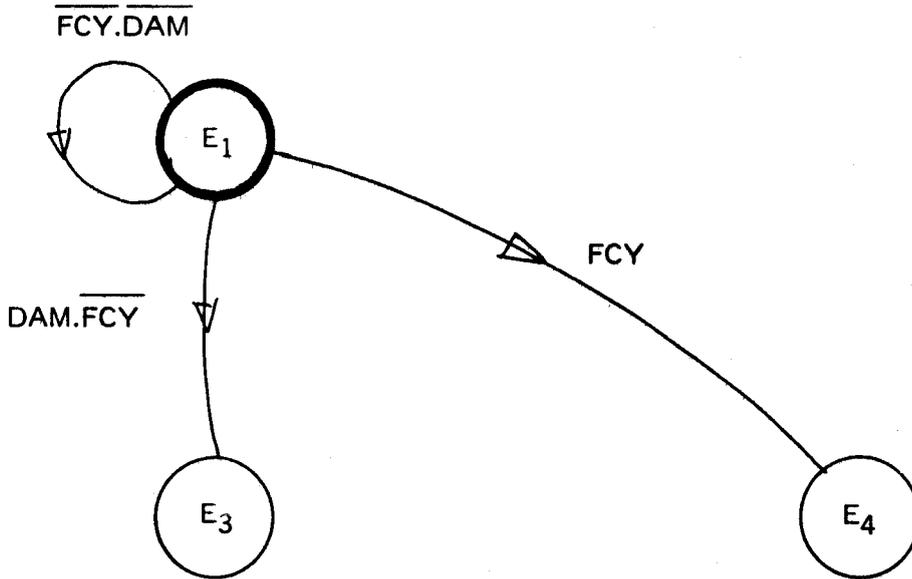


FIGURE II.10

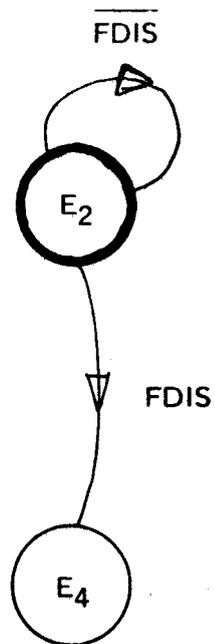


FIGURE II.11



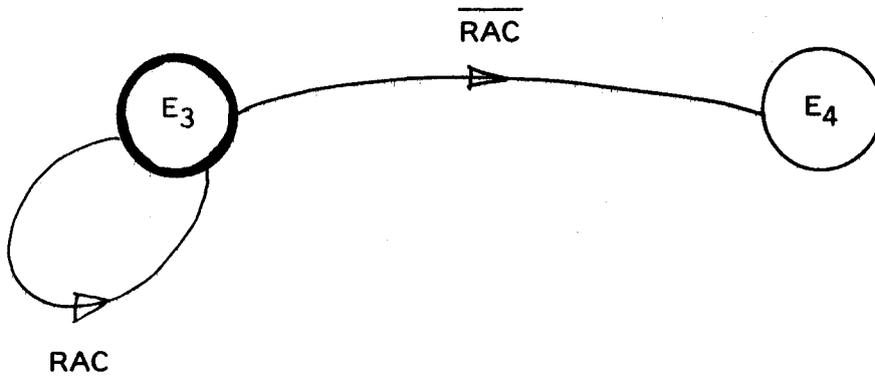


FIGURE II.12

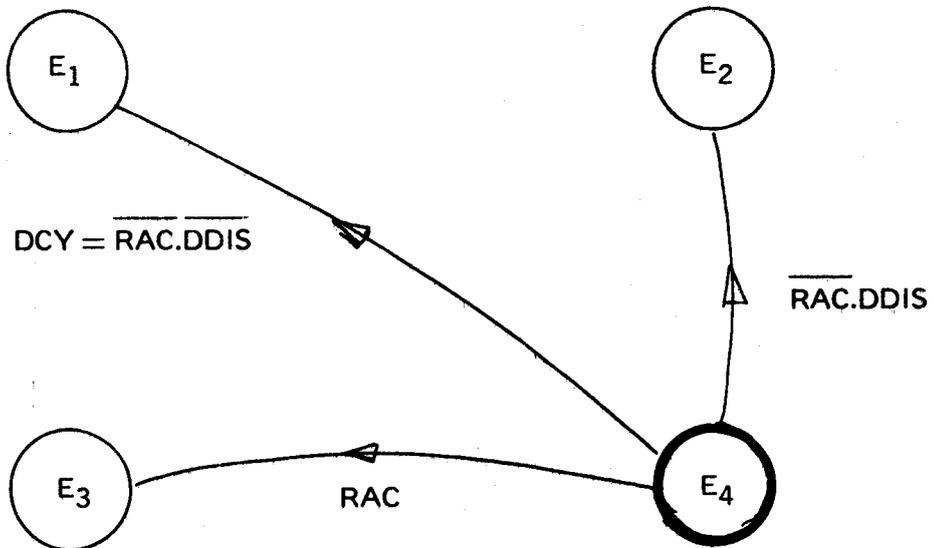
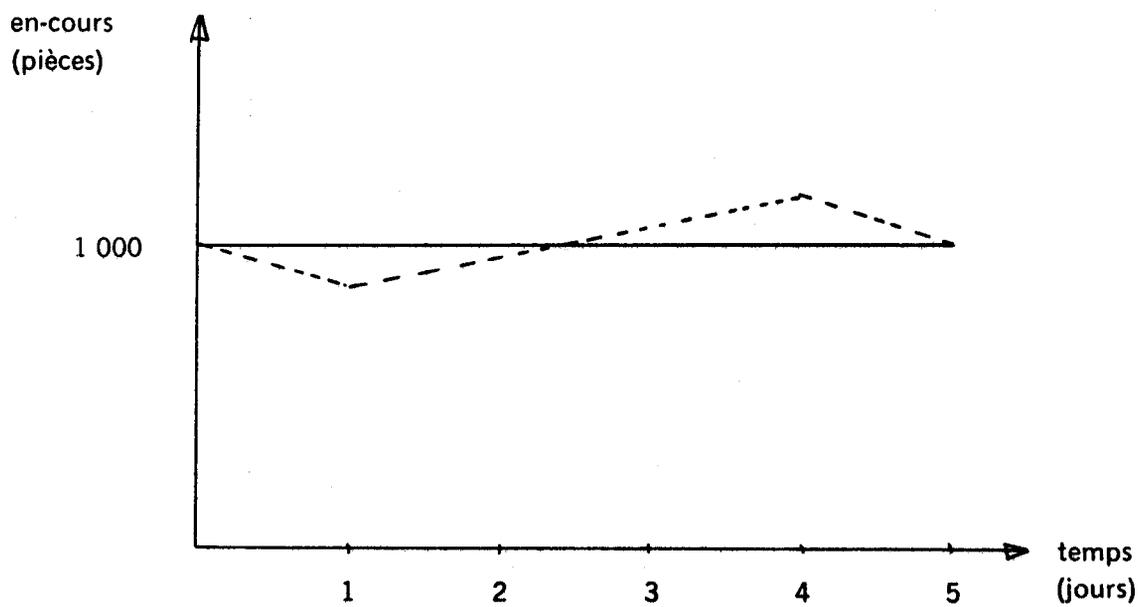
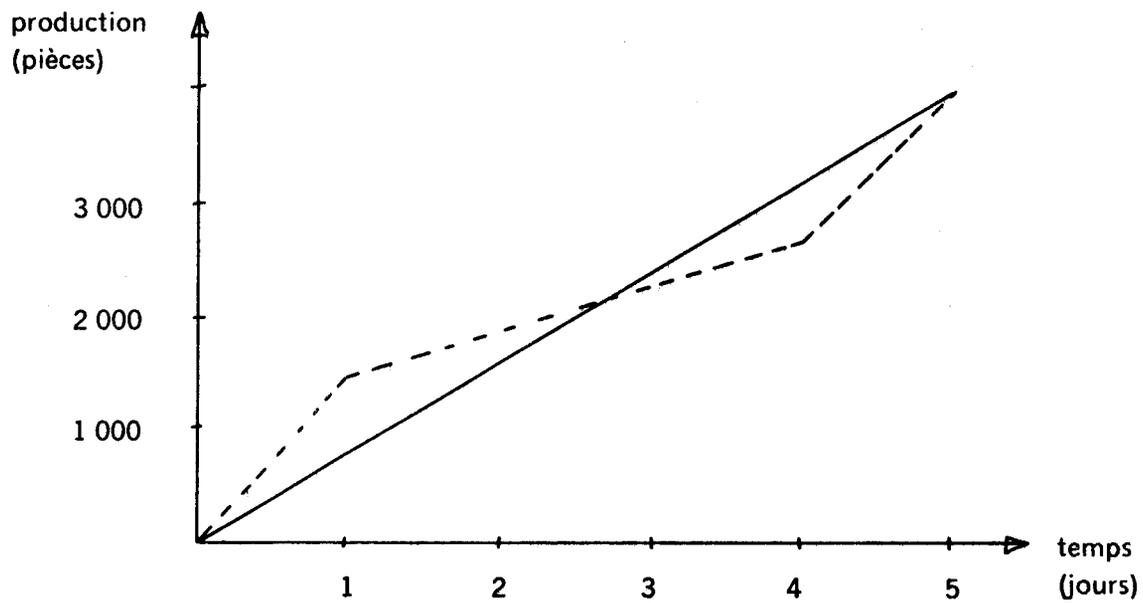


FIGURE II.13





———— programme

----- résultats



FIGURE II.14

CONCLUSION

Comme nous venons de le voir, le fonctionnement d'une chaîne composée de machines transferts automatiques et de convoyeurs automatiques est le résultat, d'une part, de l'évolution logique de l'état des machines, et d'autre part, d'un ensemble d'incidents dus soit au hasard, soit au personnel et venant perturber le fonctionnement logique.

Les méthodes d'exploitation permettent de respecter le programme de fabrication formé du nombre de pièces à usiner et du volume d'en-cours à réaliser.

Outre la production et les en-cours réalisés, l'étude des résultats d'une chaîne se fera en déterminant le rendement moyen de chaque machine et l'importance des arrêts improductifs formés d'une part des interruptions de production prévus à la conception de la chaîne (changement d'outils) et d'autre part des incidents de fonctionnement imprévisibles tels que les arrêts pour panne, manque de personnel, saturation et désamorçage. L'étude du nombre moyen de pièces usinées entre deux réaffûtages d'outil ainsi que le nombre de changements d'outils permet de déterminer le coût de ces outils.

Le modèle que nous allons étudier dans les chapitres suivants devra respecter le fonctionnement logique d'une chaîne. Il ne retiendra, parmi les aléas de fonctionnement, que les pannes, et ne fera que reproduire l'évolution de la chaîne à partir des données introduites sans en optimiser le fonctionnement. Son but est de constituer un outil pour les services d'études. Dans ce sens, il doit permettre de modifier la structure d'une chaîne ou la manière de l'exploiter.

CHAPITRE III

CHOIX D'UNE MÉTHODE DE CONSTRUCTION DU MODELE

INTRODUCTION

Nous avons vu au chapitre précédent que le problème étudié est de nature stochastique. De façon plus précise, nous montrons ici qu'une chaîne d'usinage est un phénomène d'attente.

Une première approche du problème consiste ainsi à élaborer un modèle mathématique à l'aide des théories relatives aux phénomènes d'attente /3/ et /4/. Cependant, la mise en œuvre de ce modèle implique la connaissance des lois de fin d'usinage pour chaque machine.

Afin de lever cette difficulté, nous proposons un modèle exploitant la logique de fonctionnement de la chaîne d'usinage.

3.1 — UNE CHAÎNE D'USINAGE EST UN PHÉNOMÈNE D'ATTENTE

3.11 - RAPPELS SUR LES PHÉNOMÈNES D'ATTENTE /3/ ET /4/

Les «files d'attente» ou «queues» se produisent fréquemment dans la vie courante : attente aux caisses d'un magasin, attente à un guichet de poste, embouteillage urbain, etc ...

Les caractéristiques d'un phénomène d'attente sont, d'une façon générale :

- arrivées d'unités en un point appelé centre de service (l'origine des unités est la «source») ;
- un ou plusieurs canaux de services ou stations sont rassemblés au centre de service. Les unités attendent dans le «centre d'attente» qu'une station soit disponible pour être servies.

Pour qu'une file d'attente apparaisse, il suffit que les entrées et / ou le service se produisent à des intervalles de temps non constants.

Examinons la structure du phénomène d'attente le plus simple, composé d'une «source», d'un «centre d'attente» et d'un «centre de service». (figure III.1). La file d'attente et la station constituent le «système d'attente». Le phénomène d'attente regroupe la source, les unités et le système d'attente.

La source est caractérisée par la loi des intervalles de temps entre deux arrivées d'unités.

La station est caractérisée par la loi des durées de service ou, ce qui est équivalent, par la loi des intervalles de temps entre deux sorties d'unités.

La file d'attente peut être de capacité finie ou infinie.

Certaines unités peuvent se faire servir plus rapidement que d'autres et l'ensemble des priorités qui interviennent dans les files forme alors la «discipline d'attente».

3.12 - APPLICATION A UNE CHAÎNE D'USINAGE

Une chaîne est un ensemble de systèmes d'attente en cascade : les machines jouent le rôle de «stations», les convoyeurs celui de «queues», les pièces étant les «unités».

Le système complet est un système «ouvert», c'est-à-dire que les unités entrent par l'extrémité initiale, parcourent tout le système, puis sortent par l'extrémité finale.

Considérons le schéma de chaîne de la figure III.2.

Le schéma équivalent obtenu en utilisant les notations des phénomènes d'attente est donné par la figure III.3, où :

— f_i est la loi des fins d'usinage des pièces de la station du système S_i . Elle est fonction du temps de cycle, des mises en Disponibilité, des pannes, des changements d'outils, des manques de personnel.

Il faut remarquer que la notion de service utilisée ici ne correspond pas à celle utilisée habituellement dans les phénomènes d'attente ; pour ces derniers, la fin de service correspond à la sortie d'une pièce ; pour le processus que nous étudions, la fin de service (qui est la fin d'usinage) correspond à la sortie d'une pièce seulement si la file d'attente suivante n'est pas pleine et que la file précédente n'est pas vide.

En effet, si la queue du système S_i est pleine, la station du système S_{i-1} ne pourra pas sortir une pièce, même si l'instant de fin de service est arrivé : il y a saturation ; il y aura aussi blocage si la queue du système S_{i-1} est vide : désamorçage. Cette réaction des différents systèmes les uns sur les autres est caractéristique des systèmes d'attente en cascade dont les files d'attente ont des capacités finies.

— N_i est le nombre de pièces dans la file d'attente du système S_i : c'est la variable aléatoire que nous étudierons pour ce système.

— C_i est le nombre maximum d'unités dans la file d'attente, c'est-à-dire la capacité des convoyeurs.

3.2 — DÉFINITION DU MODELE MATHÉMATIQUE

3.21 - HYPOTHESES PRÉALABLES

De façon classique, la définition du modèle mathématique utilise des hypothèses précisant les propriétés stochastiques du phénomène /4/. Ainsi, nous posons que :

- a) les lois de fin de service sont poissonniennes, de taux λ_i pour le système S_i (le processus de Poisson est une chaîne markovienne, c'est-à-dire que l'état E_{n+1} du système S_i à l'instant $t + \Delta t$ ne dépend que de l'état E_n du système à l'instant t et de la probabilité de passage de l'état E_n à l'état E_{n+1} pendant l'intervalle de temps Δt).
- b) le taux λ_i de la loi de fin d'usinage de la station du système S_i est indépendant du temps (hypothèse de stationnarité).

3.22 - MODELE MATHÉMATIQUE

Soit une chaîne comprenant m systèmes d'attente en cascade. Considérons un système S_i qui ne soit pas une extrémité de la chaîne (figure III.3).

Soit $P_{n,i}(t)$ la probabilité qu'il y ait n pièces dans la file d'attente de S_i au bout d'un temps t :

$$P_{n,i}(t) = \Pr(N_i = n)$$

Soit P_i la probabilité de l'entrée d'une pièce dans S_i pendant l'intervalle de temps Δt petit, la file d'attente de S_i n'étant pas pleine, auquel cas P_i devient nulle.

P_i est le produit de la probabilité d'une fin de service de la station S_{i-1} (loi de Poisson) par la probabilité que le nombre de pièces dans la queue de S_{i-1} ne soit pas nul :

$$P_i = \lambda_{i-1} \times \Delta t \times \Pr (N_{i-1} > 0)$$

soit :

$$P_i = \lambda_{i-1} \times \Delta t \times [1 - P_{o,i-1}(t)]$$

et en posant : $q_{o,i-1}(t) = 1 - P_{o,i-1}(t)$

$$P_i = \lambda_{i-1} \times \Delta t \times q_{o,i-1}(t)$$

Soit P_{i+1} la probabilité de sortie d'une pièce de S_i pendant Δt petit, la file d'attente de S_i n'étant pas vide, auquel cas P_{i+1} devient nulle.

P_{i+1} est le produit de la probabilité d'une fin de service de la station de S_i par la probabilité que le nombre de pièces dans la queue de S_i soit inférieur à C_{i+1} :

$$P_{i+1} = \lambda_i \times \Delta t \times \Pr (N_{i+1} < C_{i+1})$$

soit :

$$P_{i+1} = \lambda_i \times \Delta t \times [1 - P_{c,i+1}(t)]$$

avec $P_{c,i+1} = \Pr (N_{i+1} = C_{i+1})$ au bout du temps t

et en posant : $q_{c,i+1}(t) = 1 - P_{c,i+1}(t)$

$$P_{i+1} = \lambda_i \times \Delta t \times q_{c,i+1}(t)$$

Calculons la probabilité d'avoir n pièces dans la queue de S_i au bout d'un temps $t + \Delta t$: $P_{n,i}(t + \Delta t)$

Nous examinerons seulement le cas général correspondant aux conditions suivantes :

- a) S_i n'est pas une extrémité de chaîne
- b) $0 < n < C_i$

Répertorions les cas favorables :

N_i à l'instant t	entrée ou sortie d'une unité de S_i	N_i à l'instant $t + \Delta t$
n	pas de sortie, pas d'entrée	n
n	une sortie, une entrée	n
$n-1$	pas de sortie, une entrée	n
$n-1$	une sortie, pas d'entrée	n

Ces différents cas s'excluant mutuellement, $P_{n,i}(t + \Delta t)$ est la somme des probabilités correspondant à chacun d'eux :

$$\begin{aligned}
 P_{n,i}(t + \Delta t) &= P_{n,i}(t) \cdot (1 - \lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) \cdot \Delta t) \cdot (1 - \lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t) \cdot \Delta t) \\
 &+ P_{n,i}(t) \cdot (\lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) \cdot \Delta t) \cdot (\lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t) \cdot \Delta t) \\
 &+ P_{n-1,i}(t) \cdot (\lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) \cdot \Delta t) \cdot (1 - \lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t) \cdot \Delta t) \\
 &+ P_{n+1,i}(t) \cdot (1 - \lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) \cdot \Delta t) \cdot (\lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t) \cdot \Delta t)
 \end{aligned}$$

Soit en développant et en négligeant les termes du type $(\Delta t)^2$ qui sont des infiniment petits du second ordre par rapport aux termes en Δt :

$$\begin{aligned}
 P_{n,i}(t + \Delta t) &= P_{n,i}(t) \cdot (1 - \lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) \cdot \Delta t - \lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t) \cdot \Delta t) \\
 &+ P_{n-1,i}(t) \cdot \lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) \cdot \Delta t \\
 &+ P_{n+1,i}(t) \cdot \lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t) \cdot \Delta t
 \end{aligned}$$

soit :

$$\begin{aligned}
 \frac{P_{n,i}(t + \Delta t) - P_{n,i}(t)}{\Delta t} &= -P_{n,i}(t) (\lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) + \lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t)) \\
 &+ P_{n-1,i}(t) \cdot \lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) \\
 &+ P_{n+1,i}(t) \cdot \lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t)
 \end{aligned}$$

En faisant tendre Δt vers zéro, la limite du premier membre est égale à la dérivée de $P_{n,i}(t)$ car un processus de Poisson est dérivable en fonction du temps /5/ et on obtient :

$$\begin{aligned}
 \overset{\circ}{P}_{n,i}(t) &= -P_{n,i}(t) (\lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) + \lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t)) \\
 &+ P_{n-1,i}(t) \cdot \lambda_{i-1} \cdot q_{o,i-1}(t) \\
 &+ P_{n+1,i}(t) \cdot \lambda_i \cdot q_{c,i+1}(t)
 \end{aligned}$$

En faisant le même raisonnement pour $n = 0$, $n = C_j$ et pour les systèmes limites, on obtient un système d'équations différentielles non linéaires qui sont les équations d'état du phénomène et dont la forme matricielle s'écrit :

$$\overset{\circ}{X}_j(t) = A_j [X_j(t)] \cdot X_j(t)$$

avec

$$X_j(t) = \begin{bmatrix} P_{0,i}(t) \\ P_{1,i}(t) \\ \text{"} \\ \text{"} \\ P_{C,i}(t) \end{bmatrix}$$

Lorsque le système S_i considéré n'est pas une extrémité de la chaîne, la matrice $A_i(t)$ est donnée par la figure III.4. Nous avons donc établi le modèle mathématique du phénomène d'attente considéré.

La solution analytique consisterait à déterminer les fonctions $P_{n,i}(t)$ pour chaque système, ce qui n'est pas simple, même dans le cas où les lois des fins de service sont supposées poissonniennes et de taux constants.

En supposant l'existence d'un régime permanent (hypothèse d'ergodicité, au sens des phénomènes d'attente /5/), il vient :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [P_{n,i}(t)] = P_{n,i}(\infty) = P_{n,i} = \text{cte}$$

Ceci permet de déterminer les valeurs $P_{n,i}$ correspondant à ce régime permanent.

Or, nous avons déjà noté qu'une chaîne d'usinage n'atteint jamais un régime de fonctionnement permanent ; de plus, les lois de fin de service ne sont pas poissonniennes. Le régime transitoire d'un phénomène non poissonien ne pouvant, à notre connaissance, être obtenu analytiquement, nous avons étudié la possibilité de simuler directement le phénomène.

3.3 — SIMULATION DU MODELE DE PHENOMENE D'ATTENTE

Le fonctionnement d'une chaîne repose sur :

- a) les machines caractérisées par la loi de fin d'usinage des pièces ;
- b) les convoyeurs caractérisés par leur capacité ;
- c) le mouvement des pièces dans les convoyeurs et les machines.

Il existe un certain nombre de langage de simulation permettant de reproduire, sur calculateur numérique, ce type de fonctionnement et en particulier le GPSS (General Purpose Simulation System) qui semble le plus apte à simuler l'évolution des phénomènes d'attente /6/, et que nous nous proposons d'étudier brièvement en l'appliquant à notre problème.

3.31 - PRINCIPE DE GPSS

Le système GPSS utilise trois concepts fondamentaux : la chronologie, le mobile et le chaînage /6/.

3.31.1 - LA CHRONOLOGIE

La chronologie est la façon de faire évoluer le modèle dans le temps. Cette évolution se fait au moyen d'une horloge et il existe deux chronologies principales : la «chronologie par événement» et la «chronologie par échantillonnage dans le temps». Dans la chronologie par événement, le temps progresse par bonds irréguliers et il faut constituer une table des événements futurs classés suivant leur heure d'apparition (ce sera le rôle des chaînes vues plus loin). C'est le type de chronologie utilisé par GPSS. Dans la chronologie par échantillonnage dans le temps, le modèle est interrogé à intervalles de temps réguliers pour connaître les changements intervenus. S'il n'y a pas de changement, l'exploration a été inutile.

3.31.2 - LE MOBILE

La structure du modèle est traduite par un organigramme à l'intérieur duquel on fait circuler des mobiles dits «transactions». Dans le cadre de notre problème, les transactions seront les pièces.

3.31.3 - LE CHAINAGE

GPSS comprend plusieurs «chaînes», les deux principales étant la chaîne des événements actuels et la chaîne des événements futurs.

A chaque transaction présente dans le système, on associe deux paramètres représentant respectivement : le numéro de la transaction suivante, et le numéro de la transaction précédente ; un chaînage est ainsi réalisé.

Les transactions injectées dans le système sont d'abord dirigées vers la chaîne future. L'un de leurs paramètres (appelé BDT) indique la date à laquelle la transaction doit aller dans la chaîne actuelle. Les transactions sont classées dans la chaîne future par BDT croissant.

Le programme choisit les premières transactions possédant toutes la même BDT et les place dans la chaîne actuelle. La date de la simulation (T) est alors mise à l'heure de cette BDT (chronologie par événements).

A l'opposé des transactions qui sont des entités passives, les machines et les convoyeurs sont des entités actives représentées par des blocs.

3.32 - LES BLOCS DE TRAITEMENT

Chacune des transactions de la chaîne actuelle est examinée et parcourt les blocs du modèle un à un jusqu'à ce que sa progression soit stoppée dans l'un des trois cas suivants :

- a) le bloc rencontré correspond à une machine (bloc ADVANCE) : le rôle du bloc ADVANCE est de stopper la progression de la transaction dans le système à un certain endroit, pendant un certain temps.

Le calcul du temps de séjour se fait à partir de la loi aléatoire de la durée d'usage de la machine considérée, cette loi étant obtenue au moyen de générateurs de nombres

pseudo-aléatoires inclus dans GPSS.

La transaction sera placée dans la chaîne future et ne reparaitra dans la chaîne actuelle que lorsque la durée du séjour sera écoulée.

- b) le bloc rencontré correspond à un convoyeur (bloc ENTER) : le bloc ENTER est un bloc conditionnel qui peut, dans certaines conditions, refuser l'entrée à une transaction ; la progression de la transaction sera donc stoppée jusqu'à un certain événement.

Le bloc ENTER possède comme paramètre le nombre de places disponible dans le convoyeur. Si le nombre de pièces dans le convoyeur est égal à sa capacité, l'entrée sera refusée à la transaction, jusqu'à ce que le nombre de pièces soit diminué.

- c) les transactions qui atteignent l'extrémité finale de la chaîne sont détruites au moyen d'un bloc « destructeur ».

En plus des blocs énoncés ci-dessus, GPSS possède une trentaine d'autres blocs permettant de simuler divers types de fonctions.

Les principaux avantages de GPSS sont d'une part, une mise au point rapide des modèles de phénomènes d'attente et d'autre part, des possibilités très souples d'entrée des données et de sortie des résultats.

Comme nous allons le voir maintenant, son principal inconvénient, d'ailleurs inhérent au modèle de phénomène d'attente, est qu'il demande de connaître les lois des durées d'usinage des machines.

3.4 — PROBLEMES POSÉS PAR LA DÉTERMINATION DES LOIS DE FIN D'USINAGE DES MACHINES

Suivant la logique de fonctionnement d'une machine transfert exposée au chapitre II, la loi de fin d'usinage d'une machine est fonction :

- a) du temps de cycle que l'on peut considérer comme constant ;
- b) des mises en disponibilités décidées par la maîtrise ;
- c) des pannes survenant de façon aléatoire ;
- d) des changements d'outils de fréquence et de durée considérées comme constantes ;
- e) des manques de personnel pour changement d'outils, arrêts se produisant de façon aléatoire.

Dans ces conditions, la loi de fin d'usinage ne peut être déterminée simplement. D'autre part, nous avons vu que le modèle doit permettre de faire varier facilement certains des éléments énoncés ci-dessus, dans le but d'étudier l'effet de leurs variations sur le fonctionnement de la chaîne.

Avec le modèle de phénomène d'attente, il faudrait donc régénérer les lois de fin d'usinage à chaque modification.

C'est la raison principale pour laquelle nous avons abandonné le modèle de phénomène d'attente au profit d'un modèle construit à partir de la logique de fonctionnement de la chaîne.

3.5 — MODELE LOGIQUE DE SIMULATION

Par opposition avec le modèle mathématique, un modèle logique de simulation présente les avantages suivants :

- il est facilement compris par les utilisateurs ;
- il est d'une grande souplesse d'utilisation.

Il nécessite par contre un temps plus long d'écriture et de mise au point.

La simulation d'un phénomène du type étudié ici suppose une succession d'opérations illustrées par le diagramme de la figure III.5.

Nous allons étudier deux aspects importants des modèles bâtis sur ce schéma :

- a) l'évolution dans le temps ;
- b) la simulation des phénomènes aléatoires.

3.51 - CHOIX D'UNE CHRONOLOGIE

L'évolution des différents paramètres se faisant principalement dans le temps, il est nécessaire de posséder une méthode d'organisation des événements faisant s'accomplir aux instants convenables les différentes fonctions de la simulation : c'est la «chronologie».

Comme nous l'avons déjà vu lors de l'étude de GPSS, il est possible, soit d'examiner la chaîne à des dates régulières pour connaître les changements intervenus (c'est la chronologie par échantillonnage dans le temps), soit de constituer une table d'événements classés suivant leur heure d'apparition (c'est la chronologie par événements).

Dans le dernier cas, le temps progresse par bonds irréguliers et l'on devra constamment tenir à jour une liste des événements futurs.

Dans le premier cas, on risque d'explorer inutilement les instants $n+1$, $n+2$, $n+3$, .., $n+(p - n - 1)$ s'il ne s'est rien passé entre les instants n et p .

L'examen des différents paramètres caractéristiques d'une chaîne a fait apparaître que certains d'entre eux (en particulier les paramètres se rapportant aux convoyeurs) ont des valeurs de l'ordre de grandeur de l'unité de temps (le centième de minute) ce qui entraîne une fréquence des événements comparable à la fréquence d'échantillonnage (dans le cas où celle-ci est prise égale à l'unité de temps) et donc un nombre réduit d'explorations «inutiles» lors d'une chronologie par échantillonnage.

D'autre part, une exploration « inutile » se réduit à quelques « tests » et « branchements » qui peuvent être exécutés très rapidement.

A condition d'une part, de programmer ces tests de façon qu'ils s'effectuent le plus rapidement possible et d'autre part, de pouvoir ajuster la période d'échantillonnage en fonction des paramètres du modèle, la chronologie par échantillonnage dans le temps nous semble plus adaptée au problème.

3.52 - SIMULATION DES PHÉNOMÈNES ALÉATOIRES

Les aléas de fonctionnement que nous devons simuler se réduisent aux pannes et des relevés statistiques ont montré qu'elles ne se produisaient suivant aucune loi connue analytiquement.

La méthode communément employée dans ce cas est de générer des échantillons artificiels de la loi aléatoire du phénomène considéré à partir :

- a) d'une séquence équiprobable de base ;
- b) de la fonction de distribution de la variable aléatoire considérée.

3.52.1 - SEQUENCE EQUIPROBABLE DE BASE

Il existe de multiples façons d'obtenir une séquence équiprobable de base /3/ et /7/ :

- a) les générateurs utilisant un phénomène physique (par exemple le bruit de fond d'un circuit électronique) donnent souvent les meilleurs résultats.

Leur application informatique se traduit par l'enregistrement des résultats d'opérations effectuées hors de l'ordinateur.

L'inconvénient inhérent au stockage d'un tel volume d'information à des fins en général transitoires leur fait préférer des méthodes liées à un algorithme de calcul produisant une suite aléatoire uniforme à partir d'une distribution quelconque.

- b) les générateurs logiciels et les nombres pseudo-aléatoires

Le premier en date est dû à John Von Neumann en 1946. Il consiste à élever un nombre au carré et à extraire les chiffres du milieu qui, d'une part sont conservés pour constituer la suite aléatoire et d'autre part forment le nombre qui est élevé au carré et ainsi de suite .

En fait, cette méthode, comme toutes les autres du même type, est parfaitement déterministe ; le résultat est déterminé sans ambiguïté par l'entrée. La suite obtenue est appelée « pseudo-aléatoire » et doit être maniée avec les plus grandes précautions : si elle ne présente à première vue aucun rapport simple avec l'entrée, certains cas introduisent un cycle de répétitions qui peut être très court et fausse complètement le caractère aléatoire recherché. Le choix aléatoire entre plusieurs méthodes du même type ne permet pas d'être sûr du caractère aléatoire uniforme de la suite obtenue.

La méthode la plus couramment employée est la méthode des suites congruentes de Lehmer. On choisit trois nombres : le multiplicateur a (positif), l'incrément c (positif) et le modulo m tels que : $m > a$, $m > c$, $m > X_0$, nombre de départ. On construit la suite linéaire congruente :

$$X_{n+1} = a \cdot X_n + c \pmod{m}$$

dont la solution est la suite aléatoire uniforme.

Pour obtenir de bons résultats, il faut respecter les règles suivantes :

- choisir m suffisamment grand ;
- si m est une puissance de 2, on choisit le multiplicateur a de façon que : $a \pmod{5} = 8$;
si m est une puissance de 10, on choisit a tel que $a \pmod{200} = 21$;
- a est choisi plus grand que \sqrt{m} et si possible plus grand que $m/100$ mais plus petit que $m - \sqrt{m}$
- c doit être impair si m est une puissance de 2, non multiple de 5 si m est une puissance de 10 et dans tous les cas, on essaie d'obtenir $\frac{c}{m}$ le plus proche possible de 0,211.

La réalisation de ces conditions permet de réduire le risque de dégénérescence et de périodicité de la séquence équiprobable de base.

3.52.2 - ECHANTILLON ARTIFICIEL D'UNE LOI DE PROBABILITÉ QUELCONQUE

Considérons une variable aléatoire de fonction de répartition $F(x)$ telle que

$$F(x) = \Pr(X \leq x)$$

$F(x)$ peut être soit définie analytiquement, soit obtenue à partir de relevés statistiques.

Soit Y la variable aléatoire définie par :

$$Y = F(X)$$

Calculons la distribution de Y :

$$\Pr(Y \leq y) = \Pr(F(X) \leq F(x))$$

$$\text{or, } \Pr(F(X) \leq F(x)) = \Pr(X \leq x) = F(x) = y$$

x est la racine de l'opération $y = F(x)$

Y est donc distribué uniformément entre 0 et 1 (figure III.6).

Dans notre cas, X pourra être obtenue à partir de relevés statistiques et variera donc de façon discrète. $F(X)$ sera donc aussi une fonction discrète, en forme d'escalier, définie par un ensemble de points auxquels on associe leur abscisse et leur ordonnée dans la représentation du graphe de $F(x)$ (figure III.7).

On générera donc une séquence équiprobable de base, et à chaque valeur y de cette séquence, on fera correspondre la valeur x de la variable aléatoire X . On obtient ainsi des échantillons artificiels de X dont la fonction de distribution est $F(x)$.

La simulation des phénomènes aléatoires utilisant cette méthode présente deux inconvénients majeurs :

- a) pour que les résultats soient statistiquement valables, il faut simuler un grand nombre d'«histoires» en modifiant à chaque fois les échantillons artificiels des lois aléatoires. En raison du coût «temps ordinateur», cela n'est possible qu'avec un phénomène simple pour lequel la durée de simulation d'une histoire n'est que de quelques minutes au maximum.
- b) la convergence statistique est difficile à mesurer, ce qui entraîne que l'on ne sait pas à partir de quel moment les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants et la simulation arrêtée. La durée des simulations est alors souvent déterminée en fonction du coût de l'heure ordinateur.

Le modèle étudié étant trop complexe et la durée d'une histoire trop longue pour utiliser cette méthode, nous avons choisi la procédure suivante : le modèle étant prévu pour une chaîne existante, on relèvera les incidents survenus dans le fonctionnement des machines pendant un intervalle de temps égal à la durée d'une histoire ; le modèle permettra ensuite d'étudier l'effet de la variation des paramètres de la chaîne dans ce contexte de pannes considérées comme une suite d'arrêts venant diminuer le rendement d'une machine et perturbant le fonctionnement du reste de la chaîne.

Il n'y aura donc pas effectivement simulation d'un phénomène aléatoire mais seulement reproduction des incidents qui se sont produits pendant la durée de fonctionnement simulée.

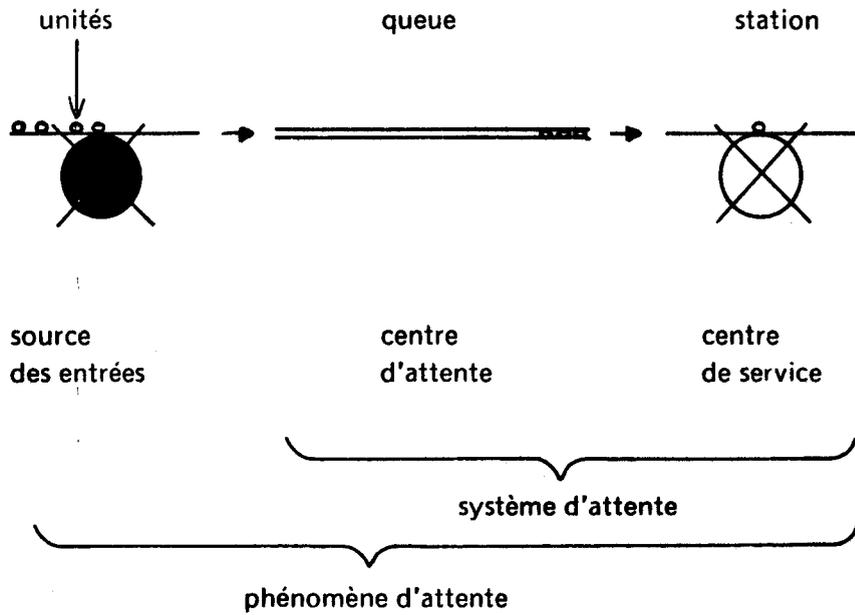


FIGURE III.1

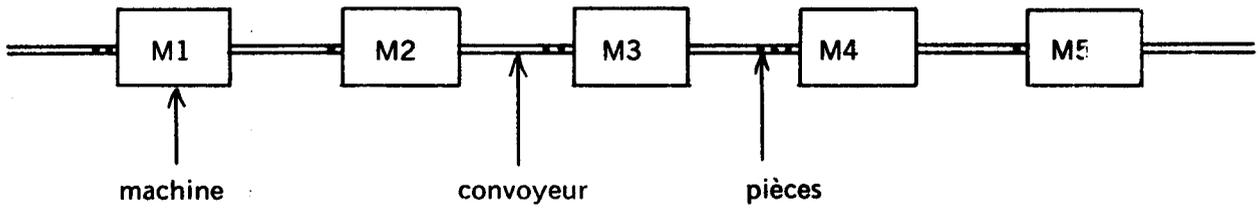


FIGURE III.2

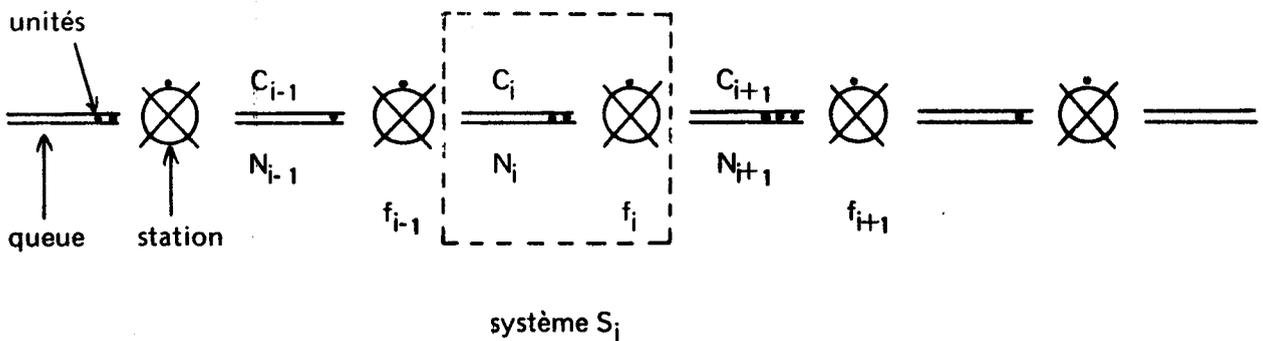


FIGURE III.3



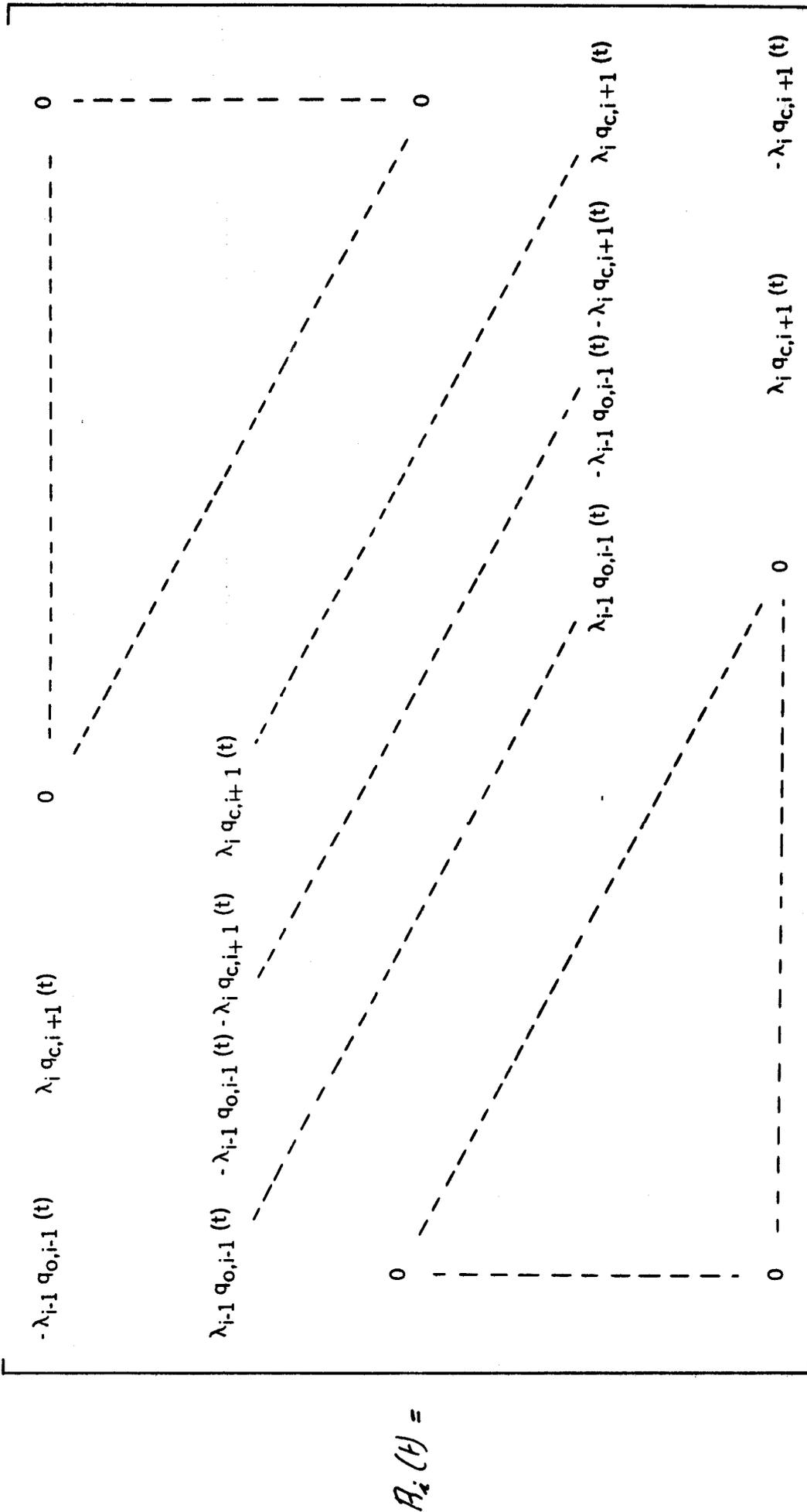


FIGURE III.4



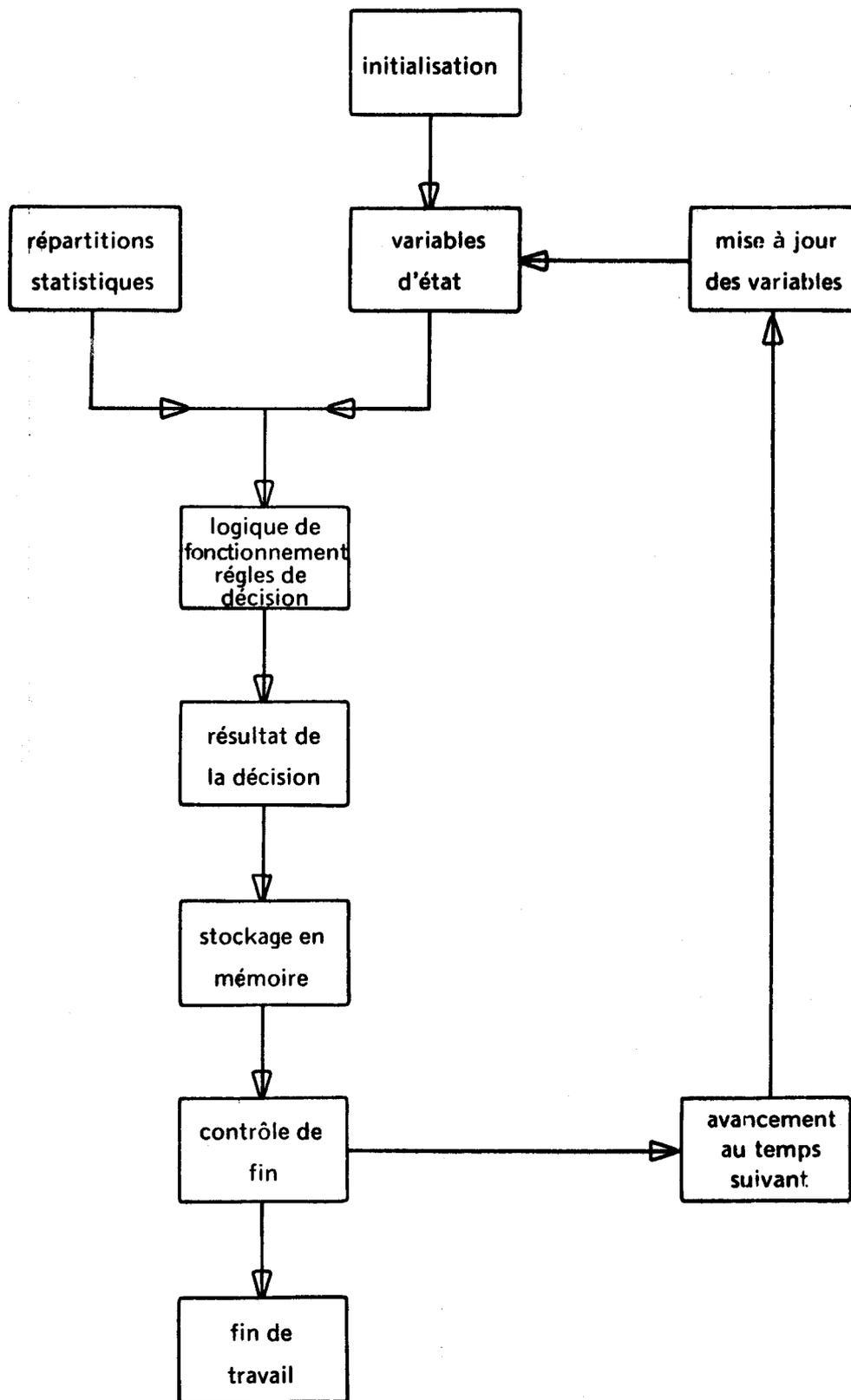


FIGURE III.5



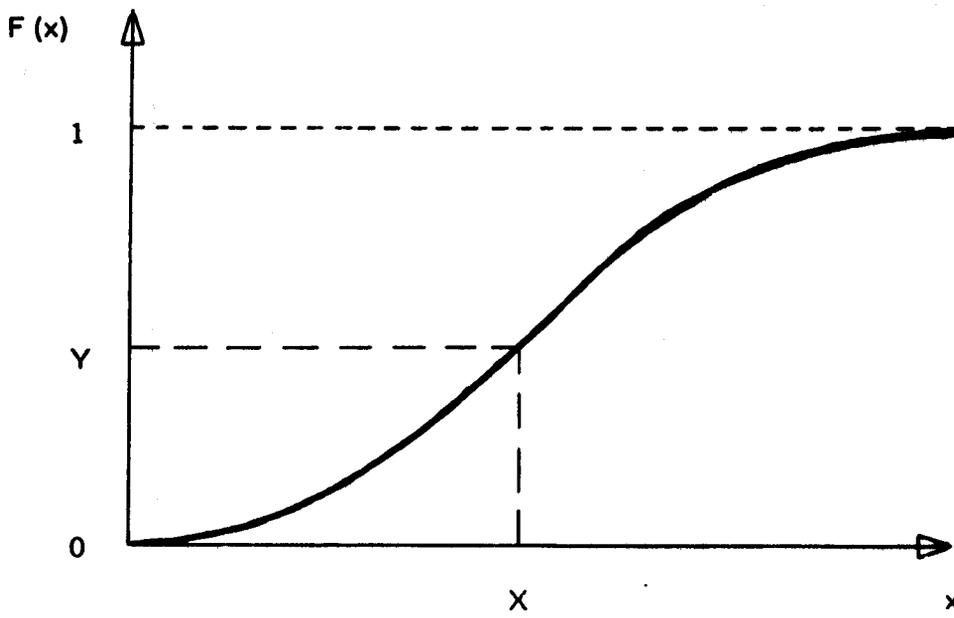


FIGURE III.6

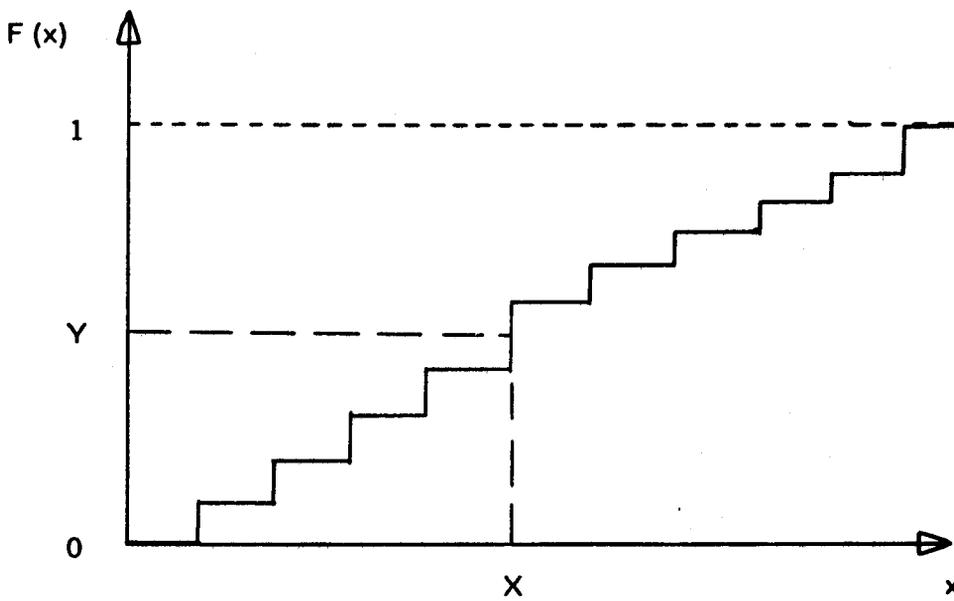


FIGURE III.7



CONCLUSION

L'examen des différentes méthodes habituellement utilisées pour un phénomène d'attente (résolution analytique des équations d'état ou simulation directe du phénomène d'attente) a montré qu'elles n'étaient pas adaptées à notre problème ; elles sont en effet basées sur les lois de fin d'usinage des machines qui sont très difficiles à établir.

Nous avons donc choisi de construire un modèle reproduisant la logique de fonctionnement de la chaîne d'usinage en adoptant une chronologie par échantillonnage dans le temps.

Étant donnée la complexité du phénomène, les pannes ne pourront pas être reproduites par la méthode de génération artificielle d'échantillons de loi de probabilité. On relevera les pannes survenues pendant un intervalle de temps donné et le modèle sera utilisé pour reproduire le plus fidèlement possible le fonctionnement d'une chaîne pendant cet intervalle de temps.

On testera ensuite les modifications à réaliser sur la chaîne en simulant le fonctionnement de la chaîne modifiée tel qu'il aurait été pendant la même période.

CHAPITRE IV – CONSTRUCTION DU MODELE

INTRODUCTION

L'élaboration du modèle logique nécessite d'expliciter les fonctions à simuler, à partir du mode de fonctionnement d'une chaîne analysé au chapitre II.

Ces fonctions décrivent le problème de façon générale sans tenir compte des moyens techniques utilisés pour le résoudre ; le découpage de ces fonctions en traitements permettra de les réaliser au moyen de l'outil informatique.

Nous exposerons ensuite une méthode générale permettant d'organiser les sous-ensembles traitements dans l'ensemble programme.

Cette méthode appliquée à notre problème aboutira à un programme construit de façon rationnelle.

Nous terminerons par la définition des paramètres utilisés dans le programme de simulation.

4.1 — FONCTIONS A REALISER

Considérons le schéma de la chaîne déjà prise comme exemple au chapitre II (figure IV.1) et supposons que le personnel d'exploitation soit réparti en trois groupes :

O1 s'occupe des machines M1 et M2 et des convoyeurs C1 et C2 ;

O2 s'occupe des machines M3 et M4 et des convoyeurs C3 et C4 ;

O3 s'occupe de la machine M5 et des convoyeurs C5, C6 et C7.

4.11 - FONCTION MACHINE

A chaque instant, il faut :

- a) générer les événements à partir de la gestion du temps de cycle, des mises en disponibilité programmées, des pannes, de l'usure des outils et de la présence ou de l'absence du personnel nécessaire à leur changement, de la présence ou de l'absence de pièces aux postes de chargement et de déchargement de la machine ;
- b) à partir des événements survenus et de l'état de la machine à l'instant précédent, générer le nouvel état de la machine par mise à jour des variables internes MN, DIS, AM, MP, CO, SAT et DES ;
- c) si un changement d'état est intervenu, affecter le temps écoulé depuis le dernier changement à la variable la plus prioritaire qui était présente précédemment ;
- d) mémoriser l'évolution de la machine de façon à pouvoir calculer les résultats à la fin de la simulation.

Le diagramme fonctionnel de la figure IV.2 schématise ces différentes opérations.

4.12 - FONCTION CONVOYEUR

C'est essentiellement la progression des pièces dans le convoyeur à intervalles de temps réguliers et mémorisation de l'évolution du stock que représentent les pièces en attente d'usinage.

4.13 - LIAISONS CONVOYEURS—MACHINES

On distingue :

- a) chargement d'une machine à partir du convoyeur précédent. S'il y a plusieurs convoyeurs à l'entrée d'une machine, on établit un tour permettant à chaque convoyeur de donner une pièce à la machine ;
- b) déchargement d'une machine sur le convoyeur suivant. S'il y a plusieurs convoyeurs, on opère de la même façon que pour le chargement.

4.14 - LIAISONS OPERATEURS—MACHINES

Ces liaisons concernent les machines dont les outils doivent être changés. Elles se décomposent de la manière suivante :

- a) lorsque plusieurs machines ont leurs outils usés et que le personnel qui leur est affecté n'est pas disponible, il faut établir et tenir à jour une liste de ces interventions en respectant une hiérarchie donnée ;
- b) quand une machine en attente d'intervention a la priorité la plus élevée et que le personnel nécessaire à l'intervention est disponible, il faut l'affecter au changement d'outils et le retirer lorsque celui-ci est terminé.

4.15 - LIAISONS OPERATEURS—CONVOYEURS

Il s'agit ici d'affecter un opérateur au chargement d'un convoyeur vide ou au déchargement d'un convoyeur plein à partir ou vers le stock à terre associé au convoyeur. Cette intervention ne peut se faire que s'il n'y a pas d'intervention machine en attente de personnel, et cesse dès qu'une machine réclame des opérateurs.

4.16 - FONCTIONS DEBUT DE SIMULATION ET FIN DE SIMULATION

Ces deux fonctions assurent successivement l'initialisation de la chaîne au début de la simulation, et la sortie des résultats nécessaires à l'appréciation du fonctionnement de la chaîne.

4.2 — TRAITEMENTS A EFFECTUER

Nous venons de décrire les fonctions de façon très générale. Les traitements décrits ci-après permettront de les réaliser au moyen d'un ordinateur.

4.21 - BALAYAGE TEMPOREL

Son rôle est de faire évoluer l'ensemble du modèle de la chaîne dans le temps au moyen d'une horloge T, par bonds régulièrement espacés (chronologie par échantillonnage). La période d'échantillonnage sera fixée en fonction des paramètres temps caractéristiques des machines et convoyeurs.

4.22 - BALAYAGE SPATIAL

Lors d'un échantillonnage, il faut mettre à jour l'état de toute la chaîne. Une machine doit être traitée lorsque le mouvement des pièces dans les convoyeurs amont et aval est terminé, c'est-à-dire que le traitement des machines commence lorsque celui des convoyeurs est terminé.

On fera donc un premier balayage de la chaîne en ne s'occupant que des convoyeurs puis un second ne prenant en compte que les machines.

4.23 - TRAITEMENT D'UN CONVOYEUR

Il regroupe la fonction convoyeur, les liaisons de ce convoyeur avec les machines adjacentes et la liaison opérateurs - convoyeur et se décompose en :

- a) transfert d'une pièce vers la machine suivante si le poste de chargement de cette machine n'est pas saturé et que c'est le tour du convoyeur. Dans le cas où le poste de chargement n'est pas saturé mais qu'il n'y a pas de pièce en tête du convoyeur, celui-ci passe son tour ;
- b) progression des pièces dans le convoyeur à intervalles de temps réguliers. Ce temps de progression élémentaire est obtenu en divisant le temps moyen de traversée du convoyeur vide par sa capacité ;
- c) intervention du personnel affecté au convoyeur si celui-ci est plein ou vide, s'il y a au moins un opérateur disponible et qu'il n'y a pas d'interventions machines en attente ;
- d) transfert s'une pièce à partir de la machine précédente, si le poste de déchargement n'est pas vide et que c'est le tour du convoyeur. Si ce dernier ne peut pas donner de pièces, il passera son tour.

4.24 - TRAITEMENT D'UNE MACHINE

C'est essentiellement la mise à jour de l'état machine en fonction de l'état précédent et des événements susceptibles de se produire, avec éventuellement, intervention du personnel. On retrouve donc les fonctions machine et liaisons opérateurs - machine.

4.3 — METHODE D'ORGANISATION RATIONNELLE DES TRAITEMENTS

La méthode dont nous allons exposer les principes généraux est due à JD Warnier. /8/. Son but est de :

- a) construire le programme sur des bases logiques plutôt que de créer une œuvre artisanale ;
- b) faciliter la maintenance des programmes en les dépersonnalisant ;
- c) créer une méthode logique de programmation indépendante de la machine et du langage de programmation utilisés.

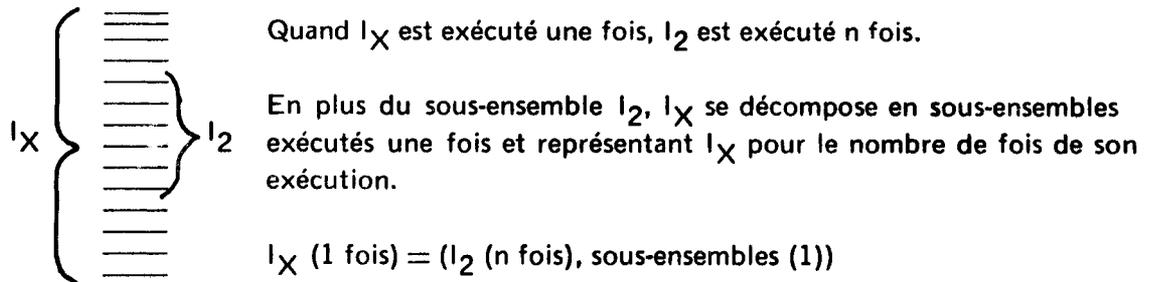
Un programme étant un ensemble d'instructions, l'objet de la méthode est de décomposer cet ensemble en sous-ensembles structurés. Ces sous-ensembles sont déterminés par l'étude des informations que l'on désire obtenir en sortie, l'étude de la nature des entrées organise ces sous-ensembles dans l'ensemble programme.

Les différentes instructions d'un programme sont groupées en «séquences logiques», une séquence logique étant une suite d'instructions exécutées le même nombre de fois et telle que si la première instruction de la suite est exécutée, les autres le sont aussi. Cette notion décompose le programme de façon logique en respectant une technique de «liste» (liste des sous-ensembles élémentaires).

Le programme est articulé pour réaliser des «alternatives» ou des «répétitives», les ensembles alternatifs et répétitifs étant organisés suivant une structure hiérarchisée.

a) Décomposition d'un ensemble selon une hiérarchie simple :

Soit un ensemble I_X contenant un seul sous-ensemble I_2 .



Dans la chronologie de l'exécution, les sous-ensembles (1) peuvent se placer avant ou après I_2 : il n'y a pas d'autre possibilité.

Les sous-ensembles (1) vont se grouper en séquences logiques :

$$I_X (i) = (\text{début } I_X (1), I_2 (n), \text{fin } I_X (1))$$

C'est la structure répétitive simple.

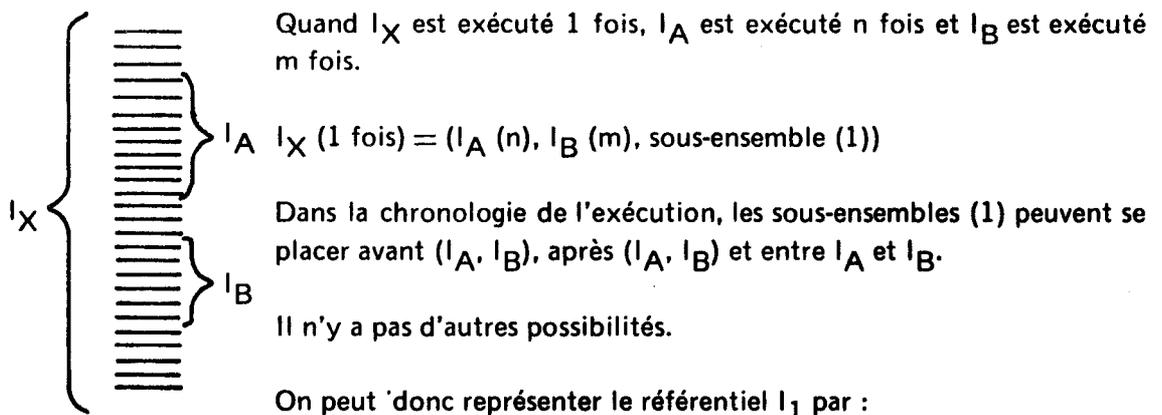
Le raisonnement est le même dans le cas d'une structure alternative simple : soit I_X contenant une alternative I_A exécuté 0 ou 1 fois et I_B exécuté si I_A n'est pas exécuté ; le référentiel I_X sera décrit par :

$$I_X (1) = (\text{début } I_X (1), I_A (0,1), I_B (0,1), \text{fin } I_X (1))$$

b) Décomposition d'un ensemble selon une hiérarchie complexe

Considérons tout d'abord le cas des structures répétitives.

Soit un ensemble I_X contenant deux sous-ensembles exécutés un nombre différent de fois que lui-même.



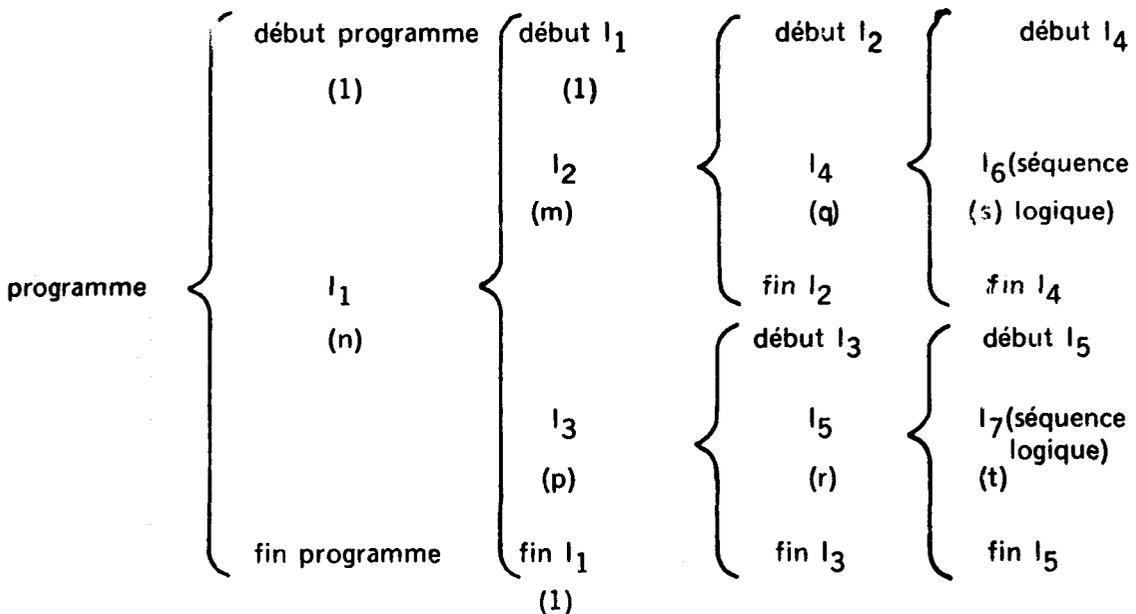
$$I_X (1) = (\text{début } I_X (1), I_A (n), \text{inter (1)}, I_B (m), \text{fin } I_X (1))$$

Structure alternative complexe : I_X contient un nombre p de sous-ensembles devant chacun être exécutés 0 ou 1 fois : I_1, I_2, \dots, I_p .

$$I_X(1) = (\text{début } I_X(1), I_1(0,1), \text{inter}_1(1), I_2(0,1), \dots, I_p(0,1), \text{fin } I_X(1))$$

Les figures IV.2, IV.3, IV.4, IV.5 donnent les organigrammes correspondant aux différentes structures hiérarchisées que nous venons de voir.

La décomposition d'un programme en structures hiérarchisées se fait jusqu'à ce que le dernier sous-ensemble obtenu soit une séquence logique, comme l'illustre le schéma suivant :



4.4 – STRUCTURE HIÉRARCHISÉE DU PROGRAMME DE SIMULATION

L'ensemble de niveau le plus élevé du programme est le balayage temporel (BTEM) qui représente l'ensemble programme ; il réalise le traitement balayage temporel , et inclus le sous-ensemble balayage spatial (BSPA).

Il se décompose donc en :

$$BTEM(1) = (DBTEM(1), BSPA(n), FBTEM(1))$$

DBTEM : séquence logique correspondant au début du balayage temporel

FBTEM : fin de balayage temporel (fin de simulation)

BSPA est exécuté n fois (n est égal au nombre d'échantillonnages nécessaire).

Lorsqu'on considère la chaîne à un instant donné, il faut traiter chacun de ses éléments : c'est le rôle des sous-ensembles balayage spatial (BSPA), qui inclut un premier sous-ensemble «traitement d'un convoyeur» (CONV), exécuté m fois (m étant égal au nombre de convoyeurs) et un second sous-ensemble «traitement d'une machine» (MACH), exécuté p fois (p étant le nombre de machines).

$$BSPA (1) = (DBSPA (1), CONV (m), inter (1), MACH (p), FBSPA (1))$$

DBSPA : début de balayage spatial

FBSPA : fin de balayage spatial

Comme on le voit ci-dessus, BSPA a une structure répétitive complexe. CONV et MACH ne sont pas des séquences logiques.

Pour ne pas alourdir l'exposé, nous nous limiterons à la décomposition partielle de CONV, qui correspond au traitement d'un convoyeur.

Nous avons vu que ce traitement se décomposait en :

- a) transfert d'une pièce vers la machine suivante (TPMS) réalisé 0 ou 1 fois suivant que la condition suivante est vérifiée :

T1 = le convoyeur doit donner une pièce

- b) progression des pièces dans le convoyeur (APDC) réalisé 0 ou 1 fois suivant que la condition suivante est réalisée :

T2 = l'intervalle de temps depuis la dernière progression est égal au temps de progression élémentaire

- c) intervention du personnel (INPE) si T3 est vérifié

T3 = le convoyeur réclame une intervention.

- d) transfert d'une pièce de la machine précédente (TPMP) si T4 est vérifié :

T4 = le convoyeur doit prendre une pièce.

CONV a donc une structure alternative complexe et peut s'exprimer sous la forme :

$$CONV (1) = (DCONV (1), TPMS (0,1), inter 1 (1), APDC (0,1), inter 2 (1), INPE (0,1), inter 3 (1), TPMP (0,1), FCONV (1))$$

Les différents sous-ensembles TPMS, APDC, INPE, TPMP ne sont pas des séquences logiques,

Comme MACH, on les considérera ainsi dans la suite de l'exposé.

En utilisant des accolades pour délimiter et hiérarchiser les sous-ensembles, on obtient le schéma de la figure IV.7.

On en déduit l'organigramme général de la figure IV.8.

4.5 — DÉFINITION DES PARAMETRES

Pour chacune des composantes de la chaîne (machines, convoyeurs, opérateurs), on distingue :

- les paramètres caractéristiques ;
- les variables nécessaires à l'évolution de l'élément ;
- les variables récapitulatives qui permettent de juger du fonctionnement de l'élément en fin de simulation, et dont nous ne donnerons que quelques exemples.

4.51 - PARAMETRES MACHINE

Ils seront placés dans une table à une dimension.

Pour chaque machine, on trouvera :

a) des paramètres caractéristiques :

- le numéro de la machine
- le nombre de convoyeurs en amont de la machine
- la capacité du poste de chargement
- le nombre de convoyeurs en aval de la machine
- la capacité du poste de déchargement
- le numéro du groupe d'opérateurs s'occupant de la machine
- le temps de cycle
- la cadence
- le nombre de pièces par cycle
- les caractéristiques des outils

Les outils sont répartis par classe ; pour chacune d'elles sont associés :

- * la charnière (nombre de pièces optimum usinées entre deux réaffûtages) ;
- * le temps moyen de changement des outils de la classe.

— le nombre d'opérateurs nécessaire à un changement d'outils

- le pourcentage d'usure minimum à partir duquel on peut changer les outils d'une classe ;
- les mises en disponibilité programmées, chacune d'elles est caractérisée par :
 - * le nombre de pièces fabriquées depuis le début (quand ce nombre est atteint, la machine est arrêtée) ;
 - * le temps d'arrêt
- les pannes déterminées par :
 - * heure début de la panne
 - * heure fin

b) des paramètres variables

- l'index de priorité en sortie permettant de répartir les pièces sorties, entre les différents convoyeurs en aval de la machine ;
- nombre de pièces au poste de chargement ;
- l'index de priorité en entrée permettant de prendre les pièces à tour de rôle sur chacun des convoyeurs en entrée ;
- le nombre de pièces au poste de chargement ;
- l'état machine, ensemble de variables binaires :
 - * marche normale (MN)
 - * disponibilité (DIS)
 - * panne (AM)
 - * manque de personnel pour changement d'outil (MP)
 - * changement d'outils (CO)
 - * saturation (SAT)
 - * désamorçage (DES)
- l'instant de fin de présence des variables internes dépendant des temps :
 - * panne
 - * marche normale
 - * changement d'outils
 - * disponibilité
- pour chaque classe d'outils, le compteur d'usure indiquant le nombre de pièces usinées depuis le dernier réaffûtage des outils de la classe ;

c) des paramètres récapitulatifs tels que la durée totale de présence de chaque variable interne, lorsqu'elle est la plus prioritaire, etc

4.52 - PARAMETRES CONVOYEUR

Ils seront placés dans une deuxième table à une dimension. Pour chacun des éléments de la table, on trouvera :

a) des paramètres caractéristiques :

- le numéro du convoyeur
- le numéro de la machine précédente
- le numéro de priorité du convoyeur pour la machine précédente
- le numéro de la machine suivante
- le numéro de priorité du convoyeur pour la machine suivante
- la capacité du convoyeur
- le temps de progression élémentaire d'une pièce égal au temps de traversée du convoyeur vide divisé par sa capacité
- le stock à terre maximal
- le temps moyen de manutention d'une pièce entre le convoyeur et le stock à terre
- le numéro du groupe d'opérateurs chargés des manutentions précédentes

b) des paramètres variables :

— l'image des positions des pièces dans le convoyeur qui est représenté par une zone mémoire dont le nombre d'octets est égal à la capacité du convoyeur. Chaque octet représente une position du convoyeur et contiendra soit un «0» (position vide), soit un «1» (position contenant une pièce).

Le temps de progression élémentaire définit dans les paramètres caractéristiques correspond au temps moyen nécessaire à une pièce pour passer d'une position à la suivante

- le nombre de pièces dans le convoyeur
- le nombre de pièces dans le stock à terre.

c) des paramètres récapitulatifs :

- le nombre moyen de pièces dans le convoyeur
- le nombre moyen de pièces dans le stock à terre
- le nombre de fois où le convoyeur est vide
- le nombre de fois où le convoyeur est plein
- etc ...

4.53 - PARAMETRES REPRESENTANT LE PERSONNEL

Ils formeront une troisième table à une dimension. Pour chaque groupe d'opérateurs, on trouvera :

- a) une paramètre caractéristique, l'effectif total du groupe
- b) des paramètres variables :
 - l'effectif disponible
 - une table indiquant les interventions machines possibles, dans l'ordre de priorité décroissante, avec pour chaque intervention :
 - * le numéro de la machine
 - * un index indiquant si la machine est en attente de personnel
- c) un paramètre récapitulatif : le temps total d'occupation du personnel, etc ...

4.54 - PARAMETRES GÉNÉRAUX

On distingue en particulier :

- la durée maximale de la simulation
- le nombre de pièces à usiner
- la période d'échantillonnage.

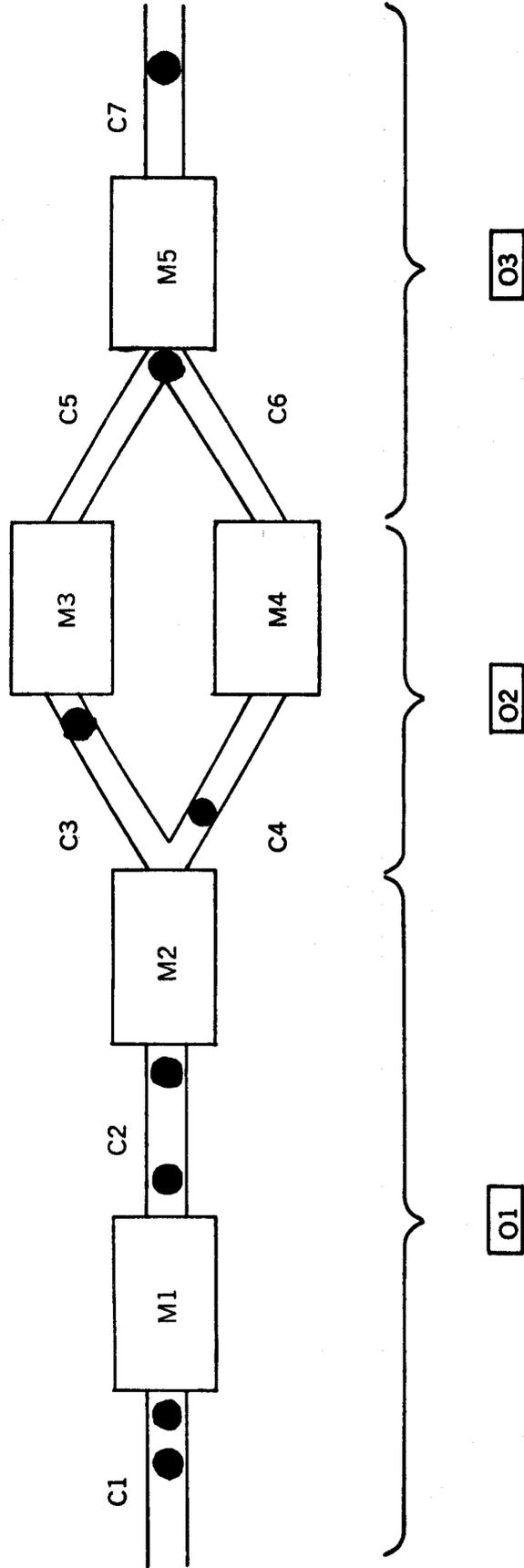


FIGURE IV.1



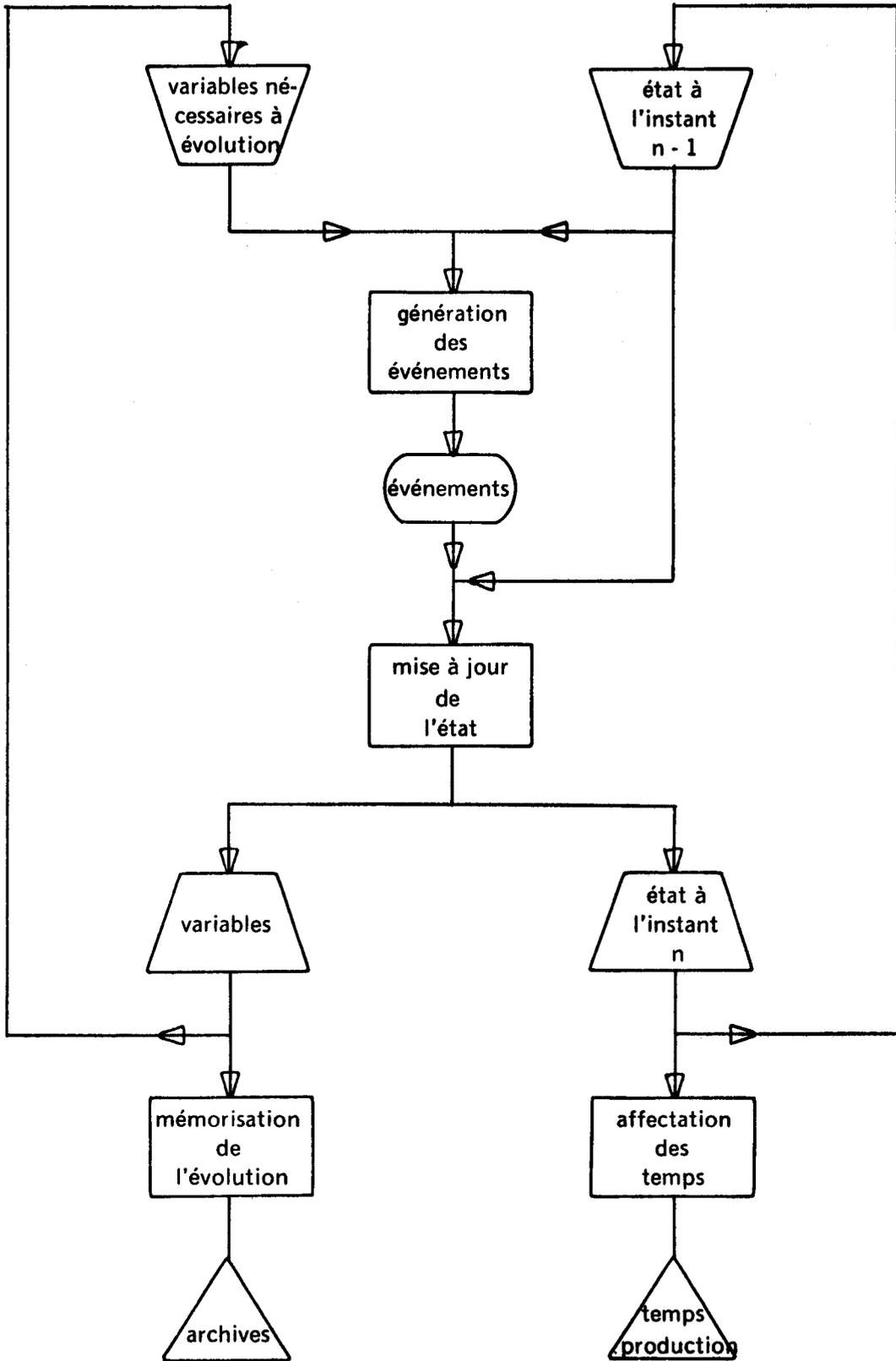


FIGURE IV.2



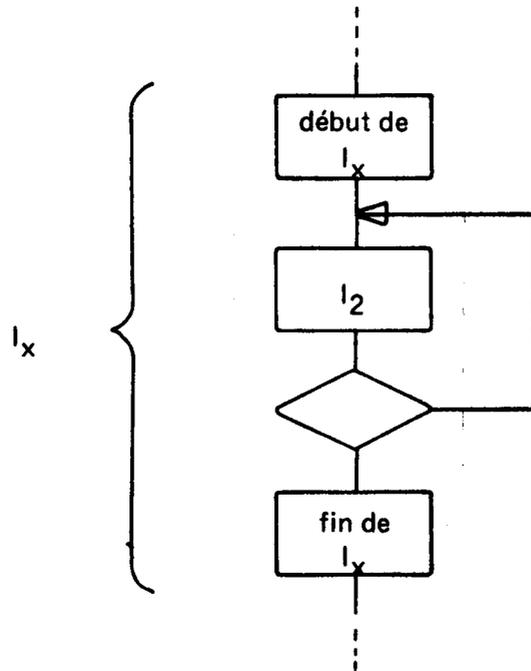


FIGURE IV.3 : structure répétitive simple

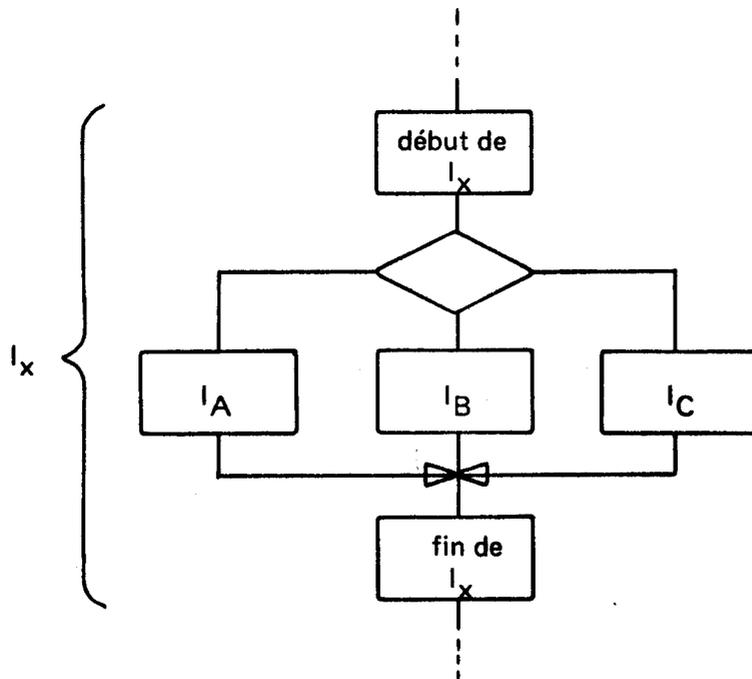


FIGURE IV.4 : structure alternative simple



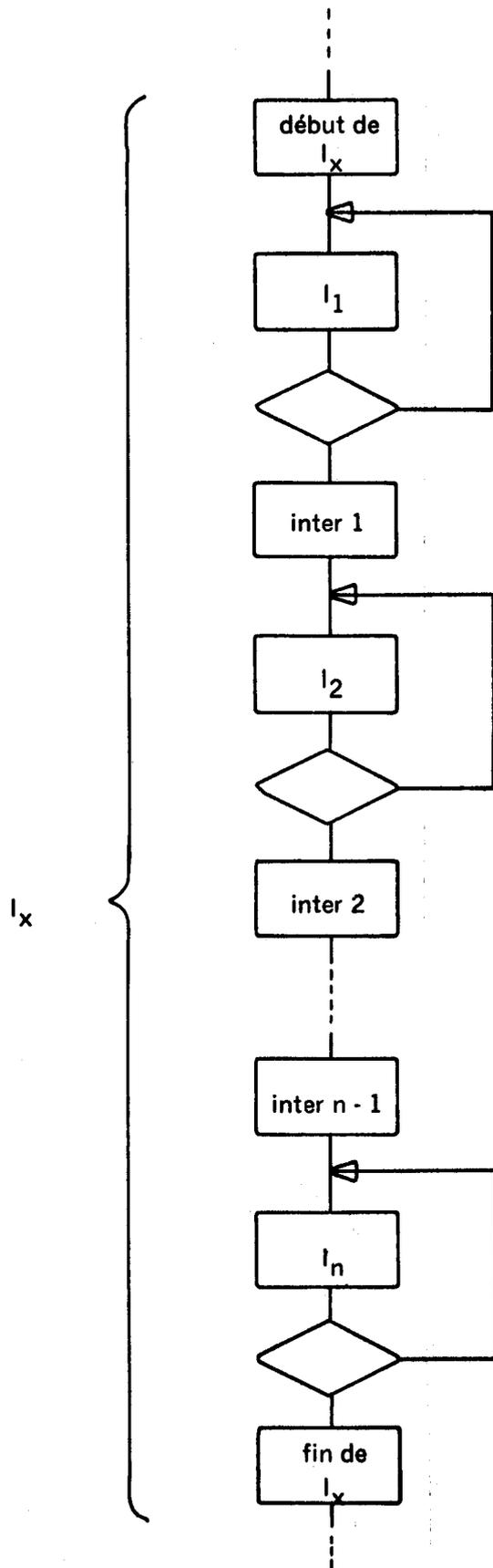


FIGURE IV.5 : structure répétitive complexe



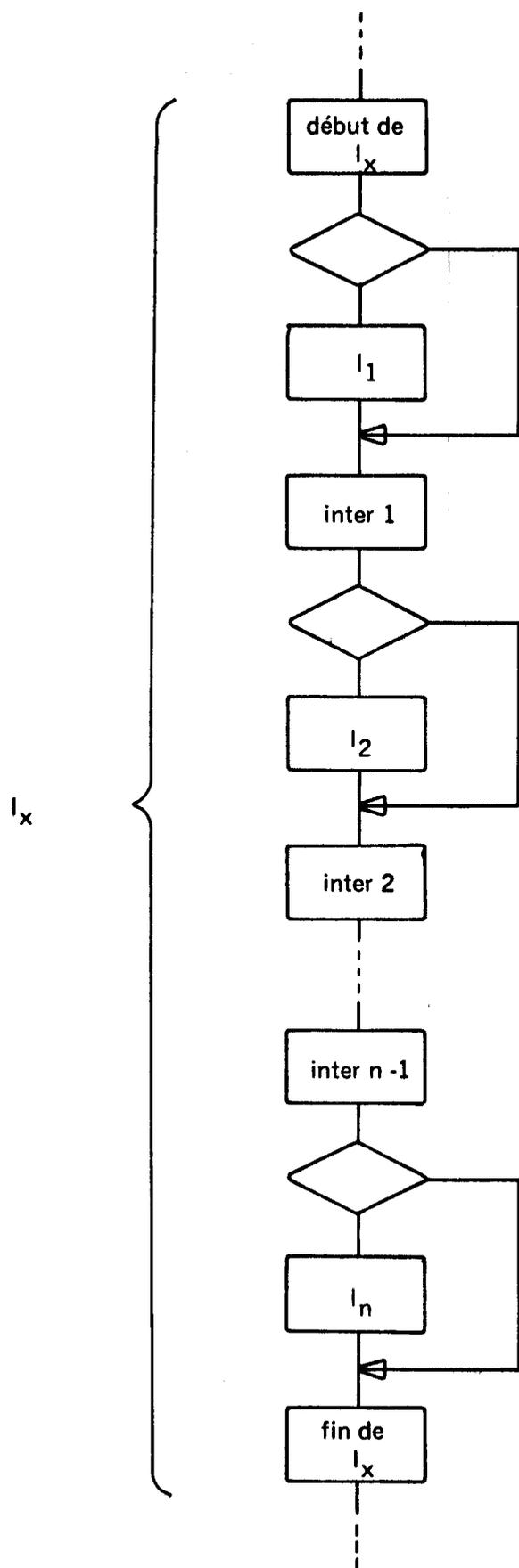


FIGURE IV.6 : structure alternative complexe



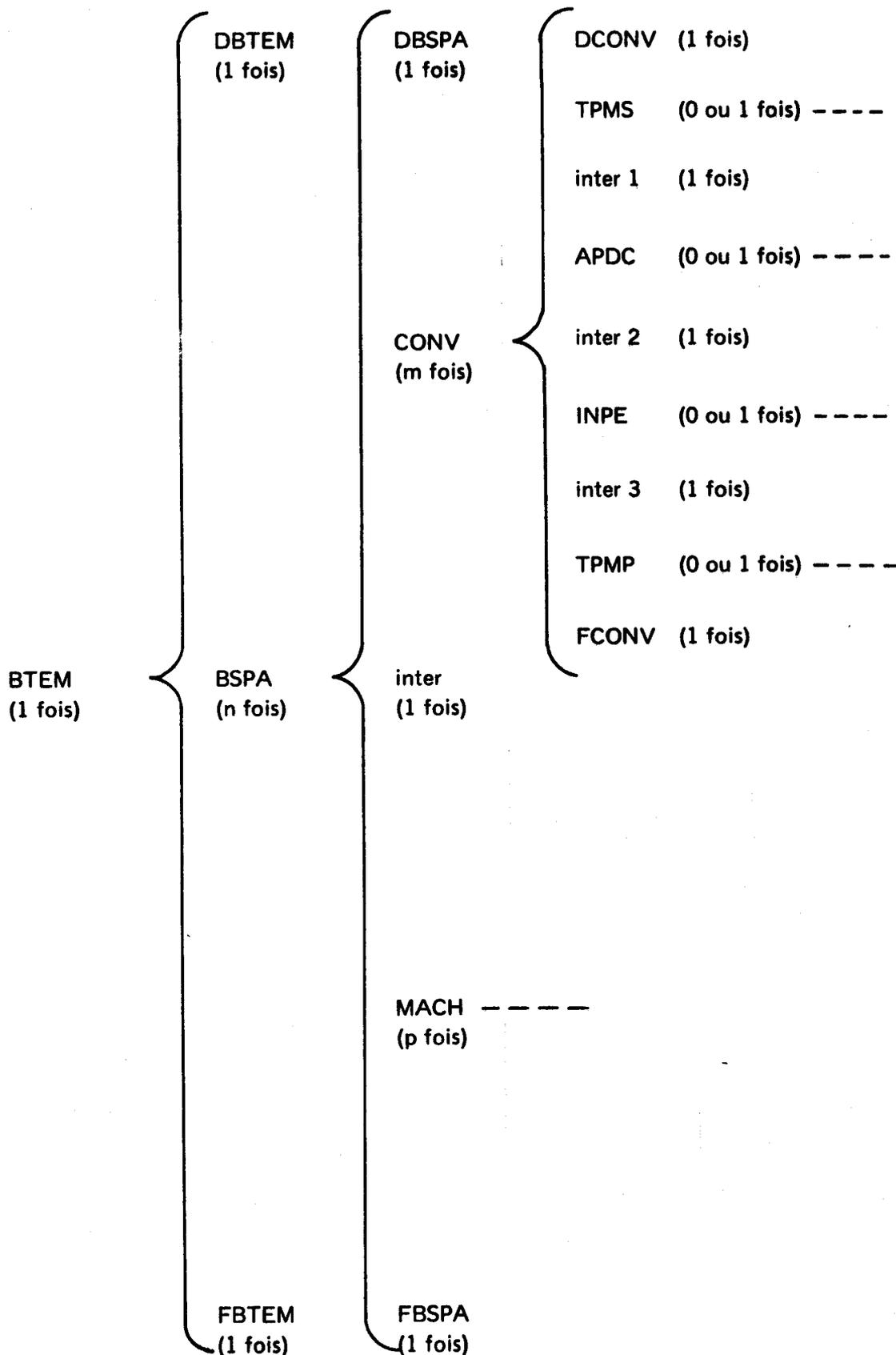


FIGURE IV.7



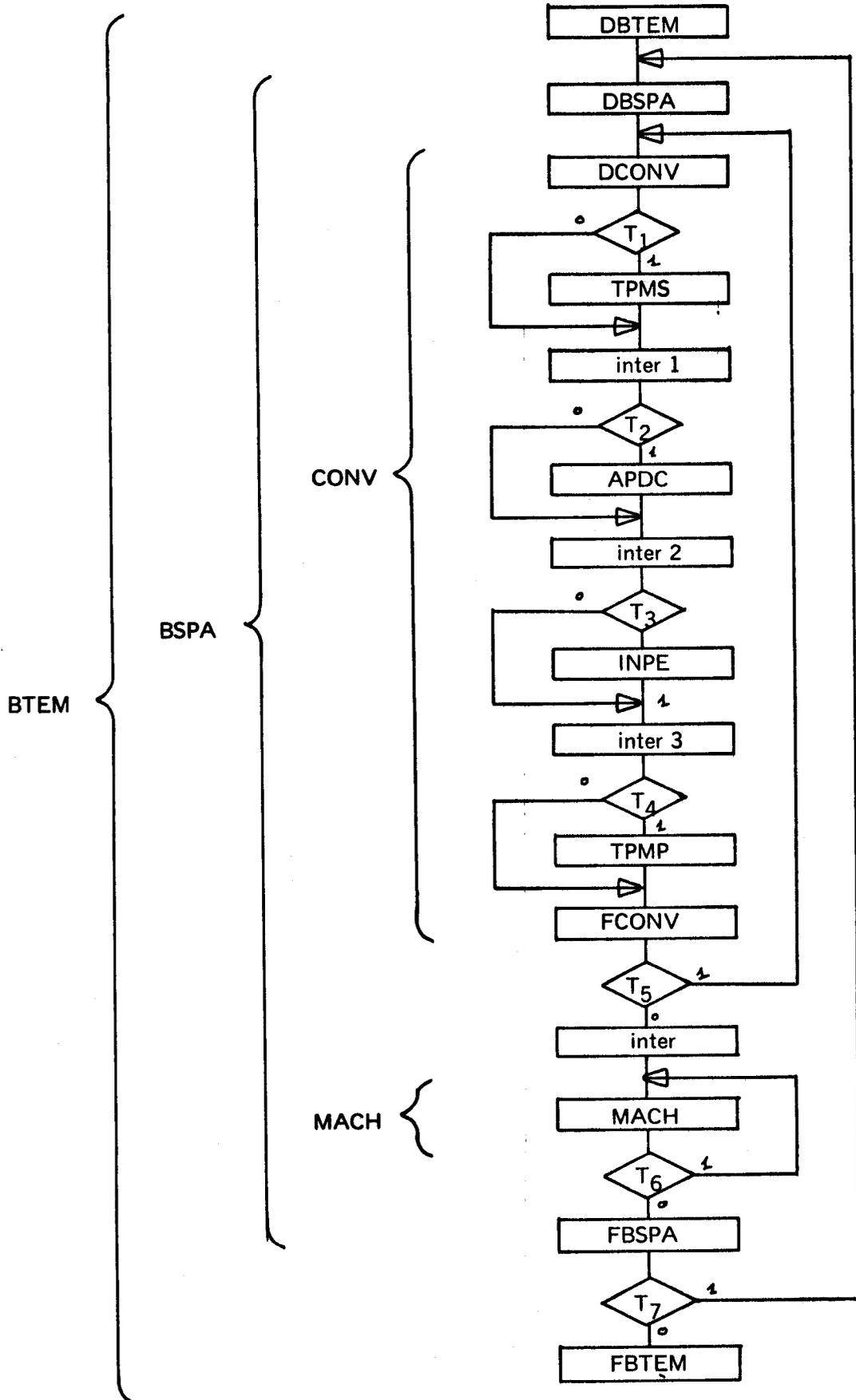


FIGURE IV.8 : T5, il reste au moins un convoyeur à traiter
T6, il reste au moins une machine à traiter
T7, il reste au moins un échantillonnage à faire



CONCLUSION

Le modèle obtenu en reproduisant le fonctionnement logique des différents éléments de la chaîne est prévu pour être utilisé sur un ordinateur.

A partir de l'analyse fonctionnelle du fonctionnement de la chaîne, nous avons construit un programme permettant de le simuler.

La méthode de programmation Warnier décompose l'ensemble programme en sous-ensembles de traitement organisés suivant une structure hiérarchisée.

CHAPITRE V — RÉSULTATS

INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre, nous exposerons tout d'abord le mode d'emploi du modèle proprement dit et des programmes annexes destinés à introduire les données initiales, et à sortir les résultats permettant d'apprécier le comportement de la chaîne simulée.

Deux exemples de simulation d'une chaîne démontreront ensuite le réalisme du modèle ; l'évolution de la chaîne est reproduite de façon fidèle malgré des informations d'entrée mal adaptées et un type de chaîne différent légèrement de celui pour lequel le modèle est prévu.

Nous terminerons par la critique du modèle en dégagant les objectifs atteints et les aspects du phénomène réel que le modèle n'a pas su reproduire.

5.1 — MISE EN ŒUVRE DU MODELE

L'organigramme général de mise en œuvre du modèle (figure V.1) se compose de trois parties principales : l'entrée des données, la simulation proprement dite et la sortie des résultats.

5.11 - ENTRÉE DES DONNÉES

Les données d'entrée sont introduites par cartes perforées (ENT 1) ; on distingue les cartes machines (code M), les cartes convoyeurs (C), les cartes opérateurs (O) et la carte généralité (G).

Pour les machines, les convoyeurs et les opérateurs, les données comprennent les paramètres caractéristiques de l'élément, et les données d'initialisation.

Pour décrire une machine, il faut douze cartes, pour un convoyeur, quatre cartes, pour un groupe d'opérateurs, une carte.

Le fichier carte ENT 1 est trié par type d'élément, numéro d'élément et type de carte (T1).

Le programme FFENSIAS contrôle les données du fichier trié ENT 2 et crée en sortie un article par élément machine, convoyeur, opérateur, généralité (ENT 3).

5.12 - SIMULATION

Le programme FFSIMUAS forme la table machine, la table convoyeur et la table opérateur à partir du fichier ENT 3 et appelle ensuite le sous-programme FFSIMASS qui exécute la simulation.

Au fur et à mesure du déroulement de la simulation, le sous-programme FFSIMASS forme le fichier SOR 1 : d'une part le changement d'état d'une machine à un instant donné donne lieu à l'émission d'un article résumant l'état de la machine à cet instant, d'autre part, un article est émis pour chaque convoyeur à chaque fois que l'horloge de la simulation a progressé d'une minute, cet article permettant de déterminer l'évolution des pièces dans le convoyeur durant la minute précédente.

A la fin de la simulation, le contrôle est rendu au programme FFSIMUAS qui forme alors le fichier SOR 3 à partir des tables machines, convoyeurs et opérateurs mises à jour par la simulation.

5.13 - SORTIE DES RÉSULTATS

On distingue deux sortes de résultats : les résultats globaux résumant le fonctionnement de la chaîne simulée, et les résultats intermédiaires permettant de se rendre compte de l'évolution de la chaîne dans le temps.

Sur les états obtenus, tous les temps sont donnés en centième de minutes sauf indication contraire.

5.13.1 - RESULTATS GLOBAUX

A partir des fichiers ENT 3 (état des tables à l'initialisation) et SOR 3 (état des tables à la fin de la simulation), le programme FFS2 SIAS élabore les résultats de chaque convoyeur (figure V.2), machine (figures V.3, V.4), et groupe d'opérateurs (figure V.5).

5.13.2 - RESULTATS INTERMEDIAIRES

Le fichier SOR 1 retraçant l'évolution dans le temps des machines et des convoyeurs est trié par type d'élément, numéro d'élément et l'heure à laquelle l'article a été émis (T2).

Le fichier trié obtenu (SOR 2) est traité par FFS1 SIAS et par FFS2 SIAS.

FFS1 SIAS dresse une liste par machine de tous les changements d'état survenus (figure V.6).

FFS3 SIAS établit, en fonction du temps, les courbes représentant l'évolution des en-cours associés au convoyeur considéré (figure V.7) ; la première courbe ne considère que les pièces dans le convoyeur, la deuxième courbe seulement les pièces dans le stock à terre associé, la troisième courbe (somme des deux précédentes) retrace l'évolution des en-cours totaux associés au convoyeur.

Le fichier ENT 5 contient les numéros des convoyeurs dont on veut connaître l'évolution dans le temps.

5.14 - LANGAGES DE PROGRAMMATION ET SYSTEME INFORMATIQUE UTILISES

Tous les programmes, sauf le sous-programme FFSIMASS, sont écrits en Cobol, qui autorise une réalisation aisée des entrées-sorties.

Le sous-programme FFSIMASS est écrit en assembleur, de façon à réduire le temps de calcul.

L'ordinateur utilisé est un Siemens 4004 (127) de 128 K octets de mémoire centrale avec, comme périphériques, deux unités de disques magnétiques, deux dérouleurs de bandes magnétiques, un lecteur de carte et une imprimante rapide.

Le système d'exploitation de cet ordinateur est le BS 1000 de Siemens.

5.15 - POSSIBILITES DU PROGRAMME DE SIMULATION FFSIMASS

Le programme, dans sa version actuelle, est prévu au maximum pour :

- 20 machines
- 20 convoyeurs
- 20 groupes d'opérateurs.

Ces limites sont seulement liées à la taille des tables machines, convoyeurs et opérateurs.

N'importe quelle structure de chaîne peut être représentée et l'on peut même simuler simultanément les fonctionnements de plusieurs chaînes différentes et n'ayant aucun lien entre elles.

5.15.1 - LIMITES DES PARAMETRES MACHINES

Chaque machine admet jusqu'à :

- 9 convoyeurs en amont
- 9 convoyeurs en aval
- 20 classes d'outils
- 6 mises en disponibilité programmées suivant le nombre de pièces déjà usinées
- 12 mises en disponibilité programmées en temps
- 12 pannes.

5.15.2 - LIMITES DES PARAMETRES CONVOYEURS

Chaque convoyeur admet les limites supérieures suivantes :

- la capacité sera au maximum de 200 pièces
- le stock à terre contiendra au maximum 9 999 pièces.

5.15.3 - LIMITES DES PARAMETRES OPERATEURS

Chaque groupe d'opérateurs admettra au maximum :

- un effectif total de 99 opérateurs
- 15 machines
- un nombre quelconque de convoyeurs

La durée maximum d'une histoire est d'environ 160 heures de fonctionnement continu.

La durée d'une simulation est directement proportionnelle à la durée de l'histoire simulée et au nombre de machines et de convoyeurs.

La formule suivante donne un ordre de grandeur de la durée en minutes d'une simulation :

$$\text{durée d'une simulation} = \frac{6}{40} \times T \times N \times \frac{1}{p}$$

T étant la durée de l'histoire N le nombre de machines et de convoyeurs et p la période d'échantillonnage choisie. La valeur obtenue est un ordre de grandeur, l'influence des paramètres machines et convoyeurs n'étant pas négligeable.

La simulation peut être arrêtée soit, lorsque la durée de l'histoire fixée à l'avance est atteinte, soit lorsque la production et les en-cours prévus sont atteints.

5.2 — PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS

5.21 - REMARQUES PRÉALABLES

Nous avons déjà vu que le modèle est prévu pour une chaîne composée exclusivement de machines transferts automatiques ; en effet, ce type de machines a un fonctionnement logique susceptible d'être reproduit aisément au moyen d'un calculateur numérique.

Il convient cependant d'ajouter qu'il est possible de simuler tout autre type de machine dont le fonctionnement est assimilable à celui d'une machine transfert automatique, en particulier les machines présentant un cycle d'usinage.

D'autre part la chaîne étudiée doit être séparée du reste de l'atelier au moyen de stocks tampons de capacités importantes de façon que le fonctionnement des autres chaînes ait un effet négligeable sur la chaîne étudiée.

Nous verrons cependant qu'il est possible de simuler le fonctionnement d'une partie de chaîne : nous introduirons pour cela la notion de machine fictive reproduisant le fonctionnement de tous les éléments en amont ou en aval de la partie de chaîne étudiée.

Pour relever le fonctionnement de la chaîne réelle, nous disposons des informations du système d'Assistance de Fabrication ; ce système a pour vocations, d'une part, la surveillance des machines en temps réel, et d'autre part, l'enregistrement d'informations utilisées ensuite pour déterminer le comportement moyen des machines.

Les informations retraçant l'évolution dans le temps des différents éléments de la chaîne réelle étaient en nombre limité : nous ne disposons, en particulier, d'aucune information sur le fonctionnement des convoyeurs.

Nous reviendrons plus loin sur cette dernière remarque, importante pour une bonne utilisation du modèle (simplicité d'emploi et précision des résultats).

Nous montrerons que malgré ces conditions défavorables, le modèle a eu un comportement très proche de celui de la chaîne réelle ; nous décrirons tout d'abord la chaîne étudiée et nous étudierons ensuite les résultats obtenus.

5.22 - DESCRIPTION DE LA CHAÎNE PRISE COMME EXEMPLE

La figure V.8 décrit la structure de cette chaîne. Les éléments dont nous commenterons le fonctionnement lors de l'étude des résultats sont dessinés en traits gras.

Le convoyeur C1 est en tête de chaîne ; il est chargé manuellement à partir du stock de pièces brutes.

La machine M2 est une transfert de temps de cycle égal à 21 centièmes de minute.

Le convoyeur C3 a une capacité de 200 pièces.

La machine M3 est une transfert de temps de cycle égal à 20 centièmes de minute.

Le convoyeur C4 a une capacité de 200 pièces.

La machine M4 est une machine banale au sujet de laquelle nous n'avons aucune information ; seuls les arrêts de longue durée peuvent être déterminés. Nous lui donnerons donc des caractéristiques qui rendront son fonctionnement d'un effet négligeable sur le reste de la chaîne, sauf en cas d'arrêt prolongé.

Le convoyeur C5 a une capacité de 200 pièces.

La machine M5 est un transfert à chargement et déchargement manuels. Les temps nécessaires à ces manutentions sont inclus dans le temps de cycle.

Nous n'avons aucune information sur la structure de l'extrémité finale de la chaîne ; nous savons seulement que les pièces y entrent à un rythme plus lent que la cadence de la première partie, mais de façon régulière. Nous avons tenu compte de cette particularité en rendant la machine M5 plus lente (temps de cycle porté à 44 centièmes de minute).

La machine M5 sera donc considérée comme le point de saturation de la chaîne.

Un convoyeur C6 est placé en fin de chaîne ; il sera déchargé manuellement sur un stock à terre.

La machine M2 se trouve parfois en désamorçage : l'opérateur a omis de charger le convoyeur C1. Le modèle n'admettant qu'une seule politique de gestion des stocks à terre (l'opérateur charge le convoyeur vide à partir du stock à terre), nous avons placé une machine fictive en tête de chaîne : le rôle de cette machine est de s'arrêter de temps en temps pour reproduire les désamorçages de la M2 ; en dehors de ces arrêts, son fonctionnement n'a aucune influence sur le reste de la chaîne.

La capacité du convoyeur C2 sera prise égale à 2 pièces de façon à répercuter presque instantanément les arrêts de M1.

La chaîne simulée est donc légèrement différente de la chaîne réelle ; son schéma est donné par la figure V.9.

5.23 - REPRODUCTION D'UNE JOURNÉE DE FONCTIONNEMENT

5.23.1 - EXAMEN DES CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAÎNE

Les caractéristiques de la machine M2 sont décrites à la figure V.10. Tous les temps sont donnés en centième de minute, sauf indication contraire apparaissant sur les figures.

Nous trouvons tout d'abord le temps de cycle, la cadence prévue (en nombre de pièces par heure) et le nombre de pièces usinées pendant un cycle d'usinage. Le nombre de pièces à usiner fixe la production que doit réaliser la machine ; nous simulons le fonctionnement de la chaîne pendant une durée fixée (environ 17 heures 40 minutes, soit une journée de travail), la simulation ne doit pas s'arrêter lorsque les machines ont atteint leurs programmes de production mais seulement à la fin des 17 heures 40 minutes de fonctionnement. Le nombre de pièces à usiner est donc porté à une valeur largement supérieure à la production qui sera réalisée.

La seconde partie de l'état donne les caractéristiques des outils sous la forme : charnière et temps de changements des outils pour chacune des classes. La machine M2 a cinq classes d'outils ; le groupe d'opérateurs numéro 1 est affecté à la machine, un opérateur est nécessaire pour changer les outils et le pourcentage d'usure minimum pour changer les outils d'une classe est fixé à 99 %.

On trouve ensuite les mises en disponibilité programmées en nombre de pièces déjà usinées, sous la forme : nombre de pièces déjà usinées, durée de l'arrêt. Ici la machine sera mise en disponibilité jusqu'à la fin de la simulation lorsqu'elle aura usiné 1 000 pièces.

La quatrième partie de l'état donne les pannes qui se sont produites pendant l'histoire réelle que nous cherchons à reproduire. Il n'y a eu aucune panne sur la machine M1.

La dernière partie regroupe les mises en disponibilité programmées en temps qui ont été relevées dans la réalité : heure début, heure fin et durée de l'arrêt.

Les figures V.11 et V.12 donnent respectivement les caractéristiques des machines M3 et M5, cette dernière n'ayant pas d'outil.

Les caractéristiques du convoyeur C3 sont décrites à la figure V.13.

La capacité de C3 est fixée à 200 pièces et il n'y a pas de stock à terre associé. Le temps mis par une pièce pour traverser le convoyeur vide est de 600 centièmes de minute.

La deuxième partie de la figure V.13, et la figure V.14 donnent respectivement les caractéristiques des convoyeurs C4 et C5.

Comme sur la chaîne réelle, nous affecterons un opérateur à une machine et au convoyeur la précédant (figure V.9). L'opérateur O5 devra en plus décharger le convoyeur de fin C6 sur le stock à terre associé.

5.23.2 - INITIALISATION DES MACHINES ET DES CONVOYEURS

Conformément à la réalité, les machines sont au départ en disponibilité pendant 16 400 centièmes de minute pour la M2 (ligne 1 de la figure V.15) et pour la M3 (figure V.16) et pendant 15 300 centièmes de minute pour la M5 (figure V.17). Le compteur de pièces fabriquées et les compteurs d'usure par classe d'outils sont donnés à la ligne 3 des figures V.15 à V.17.

Les en-cours initiaux ont été déterminés par recoupement des productions réalisées par les machines les jours précédents. Ce sont des valeurs minimum : le convoyeur C3 contient 140 pièces et le convoyeur C4, 50 pièces (figure V.13) ; le convoyeur C5 est initialisé à 200 pièces ; il est donc plein (figure V.14).

5.23.3 - RESULTATS GLOBAUX

Nous ne commenterons que les résultats des machines dont nous connaissons les résultats globaux réels.

Sur les figures, les valeurs relevées sur le système réel sont indiquées en-dessous des valeurs correspondantes obtenues par simulation.

Nous comparerons d'une part les durées d'existence de chacune des Variables Internes (MN, DI, AM, MP, CO, SA, DE), les productions réalisées étant identiques, et d'autre part les changements d'outils effectués. Le temps d'ouverture (durée de l'histoire) est pris égal au temps d'ouverture réel.

Les différents paramètres récapitulatifs tels que rendement, temps normal de production, etc ..., étant déduits directement des durées d'existence des Variables Internes, nous ne les comparons pas aux résultats réels obtenus : leur précision dépend directement de la précision obtenue sur la durée d'existence des Variables Internes.

Considérons tout d'abord la machine M2 (figure V.15).

Les temps de marche normale (MN) et de changements d'outils (CO) sont pratiquement les mêmes.

Le temps de saturation (SAT) est d'environ 10 % supérieur au temps de saturation réel : cette imprécision est due au manque d'informations sur les en-cours.

Les temps de disponibilité (DI) et de désamorçage (DE) sont assez différents des temps réels ; rappelons que les désamorçages de la M2 sont provoqués par les arrêts de la machine fictive M1 ; dans le système réel, il y a eu un grand nombre de désamorçages de courte durée (de l'ordre de grandeur de la minute) et quelques désamorçages plus longs (de durée supérieure à 10 minutes) : nous n'avons pu reproduire que ces derniers ce qui explique la différence sur le temps de désamorçage.

La machine M2 a donc réalisé sa production un peu plus rapidement que dans la réalité et la différence sur le temps de désamorçage s'est reporté sur le temps de disponibilité.

Les changements d'outils concernent les mêmes classes et ont la même durée que dans la réalité.

Les résultats de la machine M3 sont donnés à la figure V.16.

Les temps de marche normale sont pratiquement identiques.

Le temps de saturation est inférieur au temps réel et il apparaît un temps de désamorçage de quelques minutes qui n'existe pas dans la réalité : le manque de précision sur le volume des en-cours et leur gestion est la raison principale de ces écarts entre la chaîne réelle et la chaîne simulée.

Au total, il y a moins d'arrêts pour désamorçage et saturation que dans la réalité et la différence s'est reportée sur le temps de disponibilité.

Dans la chaîne réelle, la charnière des outils de la classe 1 est dépassée de 7 pièces sans que les outils soient changés ; nous ignorons la raison de cette anomalie de fonctionnement et nous avons choisi de simuler ce changement d'outils bien qu'il ne se soit pas produit dans la réalité. Les autres changements d'outils sont identiques.

Considérons enfin la machine M5 (figure V.17).

Les écarts entre la machine simulée et le système réel regroupant la machine réelle et le reste de la chaîne sont très faibles : la machine simulée a fonctionné de façon lente mais assez régulière comme le reste de la chaîne dans la réalité.

Les résultats globaux sont proches de la réalité et les écarts constatés proviennent d'un manque d'information d'une part sur les en-cours et leur gestion et d'autre part sur certaines anomalies de fonctionnement d'origine inconnue.

Nous allons maintenant comparer l'évolution de chaque machine dans le temps, et retirer les différences entre le phénomène réel et le phénomène simulé.

5.23.4 - ÉVOLUTION DANS LE TEMPS

Pour les mêmes raisons énoncées précédemment, nous ne pourrions vérifier que l'évolution des machines M2, M3 et M5.

Les figures V.18 et V.19 retracent l'évolution dans le temps de ces machines ; pour des raisons de commodité de lecture, les temps seront exprimés en heures et minutes, et nous ne relèverons que les états-machines de durée supérieure à 5 minutes.

Pratiquement, les régimes de fonctionnement réel et simulé de chaque machine sont équivalentes ; en particulier l'évolution des machines M2 et M3 (alternance de marche normale et de saturation caractéristique du phénomène réel) est assez bien reproduite. Les figures V.20 et V.21 illustrent de façon plus précise cette particularité. L'évolution détaillée de la machine M5 est décrite par la figure V.22.

L'exemple de simulation que nous venons de décrire montre que le modèle reproduit de façon satisfaisante le fonctionnement d'une partie de chaîne d'usinage réelle malgré des informations d'entrée imparfaites.

Le deuxième exemple que nous allons décrire met en évidence la particularité la plus importante de la chaîne simulée : la machine M5 simulée est un point d'engorgement.

5.24 - SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DE LA CHAÎNE AU MAXIMUM DE SES POSSIBILITÉS

Les caractéristiques et l'initialisation des éléments de la chaîne sont, pour la plupart, les mêmes que dans l'exemple précédent.

Les mises en disponibilité programmées en temps et en pièces ont été supprimées de façon que les machines soient constamment en état de produire des pièces. La panne de la machine M5 a été supprimée.

5.24.1 - RESULTATS GLOBAUX

Les figures V.23 à V.25 montrent que les machines M2 et M3 sont en production normale pendant environ la moitié du temps d'ouverture, et en saturation pendant l'autre moitié ; la machine M5 est constamment en production normale.

La machine M5 répercutant la lenteur du reste de la chaîne par un temps de cycle double de ceux de M2 et M3, le résultat était prévisible.

5.24.2 - ÉVOLUTION DANS LE TEMPS

Après un court régime transitoire correspondant au remplissage des convoyeurs C3 (figure V.26), C4 et C5, le fonctionnement des machines M2 et M3 se stabilise en un régime pratiquement permanent faiblement perturbé par les arrêts pour changement d'outils, de durées très courtes (figures V.27 et V.28).

Les deux exemples de simulation d'une chaîne réelle que nous venons d'exposer nous permettent de tirer trois conclusions principales : tout d'abord le modèle est en mesure de reproduire fidèlement le fonctionnement d'une chaîne à condition d'avoir des informations précises sur cette chaîne ; la reproduction de l'évolution de la chaîne dans le temps sera d'autant plus réaliste que l'on tiendra compte du plus d'anomalies de fonctionnement possible ; enfin le modèle permet de tenir compte des interactions entre la chaîne simulée et celles qui lui sont reliées soit en introduisant des machines fictives, soit en modifiant les caractéristiques des machines situées aux extrémités de la chaîne.

5.3 — COMPARAISON DES RÉSULTATS ET DES OBJECTIFS

5.31 - RAPPEL DES OBJECTIFS

Le modèle doit permettre de reproduire le plus fidèlement possible l'évolution dans le temps des différents éléments d'une chaîne d'usinage composée de machines transferts et de convoyeurs automatiques, et de structure quelconque.

Une fois que l'évolution du modèle est analogue à celle du système réel, l'utilisateur a la possibilité de modifier les caractéristiques des éléments de la chaîne ou la façon de les utiliser.

Le fonctionnement d'une chaîne étant perturbé de multiples façons (pannes, élément humain et diverses sortes d'incidents apparemment dus au hasard), le modèle ne doit simuler que les pannes qui semblent être la perturbation la plus importante et dont il est possible de connaître le nombre et la durée.

5.32 - CERTAINS OBJECTIFS SONT ATTEINTS

Les différents tests auxquels nous avons procédé et en particulier les deux exemples de simulation que nous avons décrits montrent que l'évolution dans le temps des machines est assez bien reproduite.

Une précision plus grande pourrait être obtenue en tenant compte des remarques suivantes :

- les informations d'entrée (caractéristiques et initialisation) doivent être précises et complètes ;
- nous avons assisté à des modifications de politique de changement d'outils en cours de tournée (par exemple, changement d'une classe d'outils à 15 % de la charnière) sans en connaître les raisons : il serait intéressant de connaître les différentes politiques de changement d'outils et leurs modes d'application.

Le modèle peut d'autre part s'appliquer à n'importe quelle structure de chaîne ; il est même possible d'exécuter simultanément deux histoires différentes de la même chaîne.

5.33 - CERTAINS OBJECTIFS NE SONT PAS ATTEINTS

Les exemples ont montré que les désamorçages et les saturations d'une machine sont les états les moins bien reproduits.

Nous pensons que cette imprécision est due :

- au manque d'information concernant les en-cours d'usinage ;
- au fait que la logique de gestion des stocks à terre s'est révélée fautive. Nous avons par exemple remarqué qu'une machine restait en désamorçage pendant un temps assez long sans

que le stock à terre soit vide (information obtenue en comparant les productions des jours précédents) et sans que l'opérateur affecté au convoyeur et à la machine soit occupé à changer les outils sur cette dernière. C'est un des aspects de l'élément humain qui vient perturber le fonctionnement d'une machine.

Pour lever ces difficultés, il serait intéressant de connaître le volume des en-cours contenus dans le convoyeur et le stock à terre à intervalles de temps réguliers, de façon à pouvoir reproduire le comportement de l'opérateur qui est chargé de leur gestion, en le «paralysant» à certains moments ; cette remarque est aussi valable pour les machines qui peuvent être dans l'état manque de personnel alors que les opérateurs qui lui sont affectés ne s'occupent, apparemment d'aucune autre machine et d'aucun autre convoyeur.

Parallèlement à l'importance de la précision des résultats obtenus, la mise en exploitation régulière de ce modèle nécessite d'une part d'automatiser la saisie des informations d'entrée et d'autre part de réduire la durée d'une simulation qui, pour chacun des exemples décrits est d'environ 30 minutes.

Pour la construction du modèle, nous avons tenu compte de tous les éléments qui semblent, à notre connaissance, intervenir dans le fonctionnement d'une chaîne. Dans l'avenir, l'exploitation régulière du modèle montrera sans doute que certains aspects du fonctionnement (en particulier l'avance des pièces dans les convoyeurs qui coûte très cher en temps calcul) ont une importance négligeable vis-à-vis d'autres phénomènes ; d'autre part, certains phénomènes aléatoires (en particulier la variation du temps de cycle au cours d'une tournée) dont nous ne connaissons pas actuellement les caractéristiques et que nous avons négligés, pourront se révéler comme des éléments fortement perturbateurs du fonctionnement d'une chaîne.

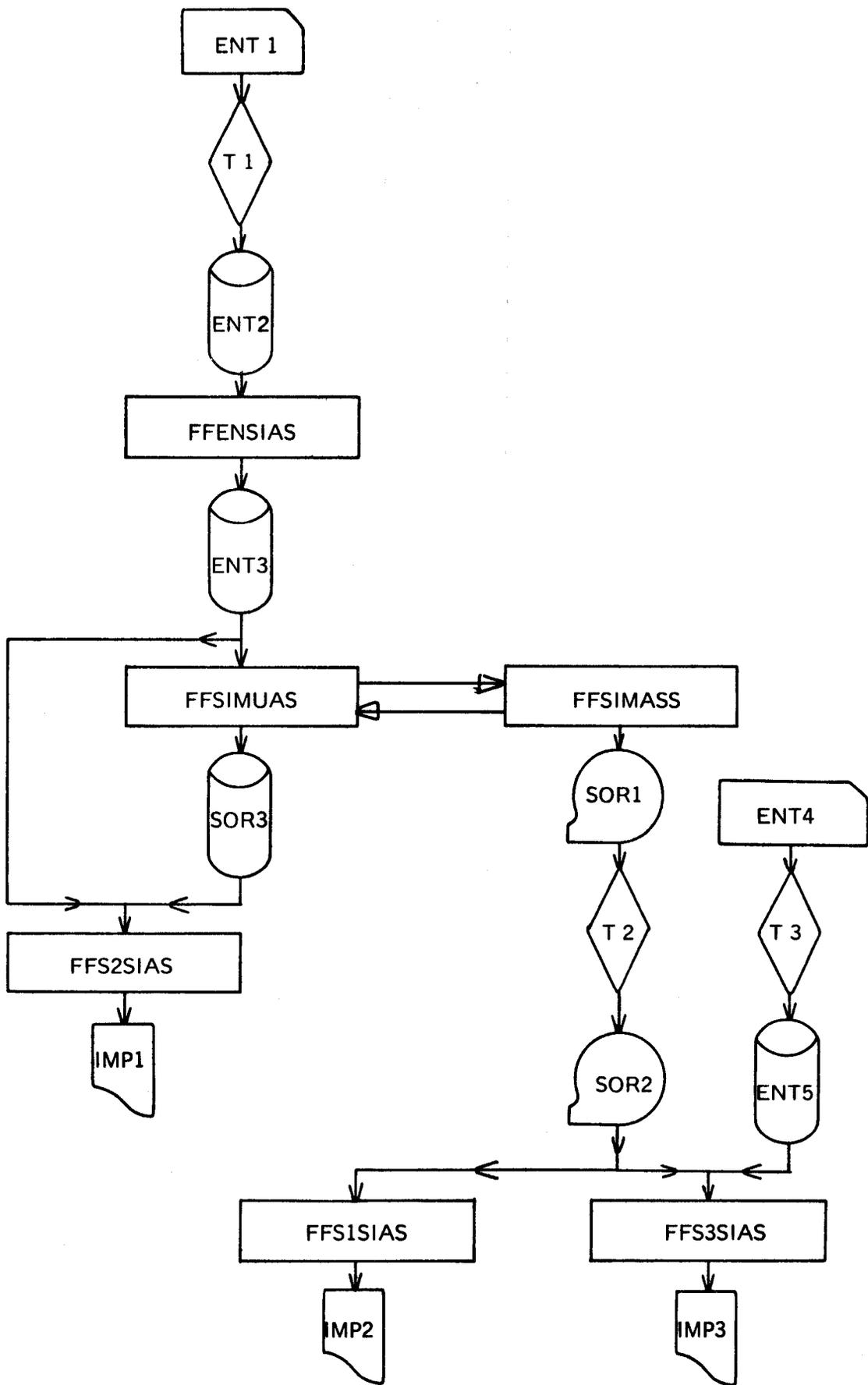


FIGURE V.1



* CONVOYEUR NUMERO : 1 *

* CARACTERISTIQUES *

* CAPACITE : 20 * STOCK A TERRE MAX : 2000 * TEMPS DE TRAVERSEE A VIDE : 100
* NUMERO DE GROUPE OPERATEURS : 1 * TEMPS DE MANUTENIION D UNE PIECE : 2

* INITIALISATION *

* NOMBRE DE PIECES * DANS LE CONVOYEUR : 0 * A TERRE : 2000

* RESULTATS *

* NOMBRE DE PIECES DANS LE CONVOYEUR * MINI : 0 * MOYEN : 5 * MAXI : 10 * A LA FIN DE L HISTOIRE : 4 *
* NOMBRE DE PIECES A TERRE * MINI : 1576 * MOYEN : 1791 * MAXI : 2000 * A LA FIN DE L HISTOIRE : 1576 *
* NOMBRE DE FOIS OU LE CONVOYEUR EST * VIDE : 50 * PLEIN : 0 *

* CONVOYEUR NUMERO : 2 *

* CARACTERISTIQUES *

* CAPACITE : 20 * STOCK A TERRE MAX : 100 * TEMPS DE TRAVERSEE A VIDE : 100
* NUMERO DE GROUPE OPERATEURS : 2 * TEMPS DE MANUTENIION D UNE PIECE : 2

* INITIALISATION *

* NOMBRE DE PIECES * DANS LE CONVOYEUR : 0 * A TERRE : 0

* RESULTATS *

* NOMBRE DE PIECES DANS LE CONVOYEUR * MINI : 0 * MOYEN : 7 * MAXI : 20 * A LA FIN DE L HISTOIRE : 9 *
* NOMBRE DE PIECES A TERRE * MINI : 0 * MOYEN : 6 * MAXI : 12 * A LA FIN DE L HISTOIRE : 12 *
* NOMBRE DE FOIS OU LE CONVOYEUR EST * VIDE : 8 * PLEIN : 5 *

FIGURE V.2




```

*****
* GROUPE OPERATEURS NUMERO 1 1 *
*****

* EFFECTIF TOTAL 1 1 * POURCENTAGE MOYEN DU TEMPS D OCCUPATION D UN OPERATEUR 1 71 % *
* MACHINES AFFECTEES 1 1*

*****
* GROUPE OPERATEURS NUMERO 1 2 *
*****

* EFFECTIF TOTAL 1 1 * POURCENTAGE MOYEN DU TEMPS D OCCUPATION D UN OPERATEUR 1 99 % *
* MACHINES AFFECTEES 1 2*

*****
* GROUPE OPERATEURS NUMERO 1 3 *
*****

* EFFECTIF TOTAL 1 1 * POURCENTAGE MOYEN DU TEMPS D OCCUPATION D UN OPERATEUR 1 61 % *
* MACHINES AFFECTEES 1 3; 4*

*****
* GROUPE OPERATEURS NUMERO 1 4 *
*****

* EFFECTIF TOTAL 1 1 * POURCENTAGE MOYEN DU TEMPS D OCCUPATION D UN OPERATEUR 1 65 % *
* MACHINES AFFECTEES 1 5*

```



FIGURE V.5

DES
SAT
CO
MP
AM
DIS
MN

```

*****
#EVOLUTION MACHINE NUMERO : 1 *
*****
#PIECE#NB#NB#
#USINE#SAT#DES#
#CO#MP#AM#DIS#MN#
#HEURE#V#Y#ETAT#V#V#
#RELAT#*76#*43#*2#*1#
*****
H 1MN * * * 60 * * * * *
H 1MN * * * 75 * * * * *
H 2MN * * * 105 * * * * *
H 2MN * * * 105 * * * * *
H 4MN * * * 155 * * * * *
H 4MN * * * 155 * * * * *
H 4MN * * * 205 * * * * *
H 5MN * * * 205 * * * * *
H 5MN * * * 255 * * * * *
H 5MN * * * 255 * * * * *
H 6MN * * * 284 * * * * *
H 6MN * * * 284 * * * * *
H 8MN * * * 304 * * * * *
H 8MN * * * 304 * * * * *
H 9MN * * * 354 * * * * *
H 9MN * * * 354 * * * * *
H10MN * * * 404 * * * * *
H10MN * * * 404 * * * * *
H11MN * * * 454 * * * * *
H11MN * * * 454 * * * * *
H12MN * * * 504 * * * * *
H12MN * * * 504 * * * * *
H13MN * * * 554 * * * * *
H13MN * * * 554 * * * * *
H14MN * * * 604 * * * * *
H14MN * * * 604 * * * * *
H15MN * * * 627 * * * * *
H15MN * * * 627 * * * * *
H18MN * * * 647 * * * * *
H18MN * * * 647 * * * * *
H19MN * * * 697 * * * * *
H19MN * * * 697 * * * * *
H20MN * * * 697 * * * * *
H20MN * * * 697 * * * * *
H20MN * * * 747 * * * * *
H20MN * * * 747 * * * * *
H20MN * * * 747 * * * * *
H20MN * * * 747 * * * * *
H21MN * * * 797 * * * * *
H21MN * * * 797 * * * * *
H22MN * * * 847 * * * * *
H22MN * * * 847 * * * * *
H23MN * * * 897 * * * * *
H23MN * * * 897 * * * * *
H24MN * * * 947 * * * * *
H24MN * * * 947 * * * * *
H24MN * * * 947 * * * * *
H25MN * * * 997 * * * * *
H25MN * * * 997 * * * * *
H26MN * * * 997 * * * * *
H26MN * * * 997 * * * * *
H27MN * * * 1047 * * * * *
H27MN * * * 1047 * * * * *
H27MN * * * 1047 * * * * *
H28MN * * * 1097 * * * * *
H28MN * * * 1097 * * * * *
*****
DUREES D EXISTENCE DES VI
#CO#MP#AM#DIS#MN#
#SAT#DES#
#PIECE#NB#NB#
#USINE#SAT#DES#
#CO#MP#AM#DIS#MN#
25 * * * * * 5 * * * *
25 * * * * * 7 * * * *
25 * * * * * 10 * * * *
95 * * * * * 11 * * * *
95 * * * * * 15 * * * *
120 * * * * * 16 * * * *
120 * * * * * 20 * * * *
190 * * * * * 21 * * * *
190 * * * * * 25 * * * *
190 * * * * * 25 * * * *
215 * * * * * 26 * * * *
215 * * * * * 28 * * * *
215 * * * * * 29 * * * *
215 * * * * * 30 * * * *
285 * * * * * 31 * * * *
285 * * * * * 35 * * * *
310 * * * * * 40 * * * *
310 * * * * * 41 * * * *
380 * * * * * 45 * * * *
380 * * * * * 45 * * * *
405 * * * * * 46 * * * *
405 * * * * * 50 * * * *
405 * * * * * 50 * * * *
475 * * * * * 51 * * * *
475 * * * * * 55 * * * *
500 * * * * * 56 * * * *
500 * * * * * 60 * * * *
570 * * * * * 61 * * * *
570 * * * * * 63 * * * *
570 * * * * * 64 * * * *
570 * * * * * 65 * * * *
595 * * * * * 66 * * * *
595 * * * * * 70 * * * *
595 * * * * * 70 * * * *
665 * * * * * 71 * * * *
665 * * * * * 75 * * * *
665 * * * * * 75 * * * *
690 * * * * * 76 * * * *
690 * * * * * 80 * * * *
760 * * * * * 81 * * * *
760 * * * * * 85 * * * *
785 * * * * * 86 * * * *
785 * * * * * 90 * * * *
855 * * * * * 91 * * * *
855 * * * * * 95 * * * *
855 * * * * * 95 * * * *
880 * * * * * 96 * * * *
880 * * * * * 100 * * * *
950 * * * * * 100 * * * *
950 * * * * * 101 * * * *
975 * * * * * 101 * * * *
975 * * * * * 106 * * * *
975 * * * * * 110 * * * *
*****

```



FIGURE V.6

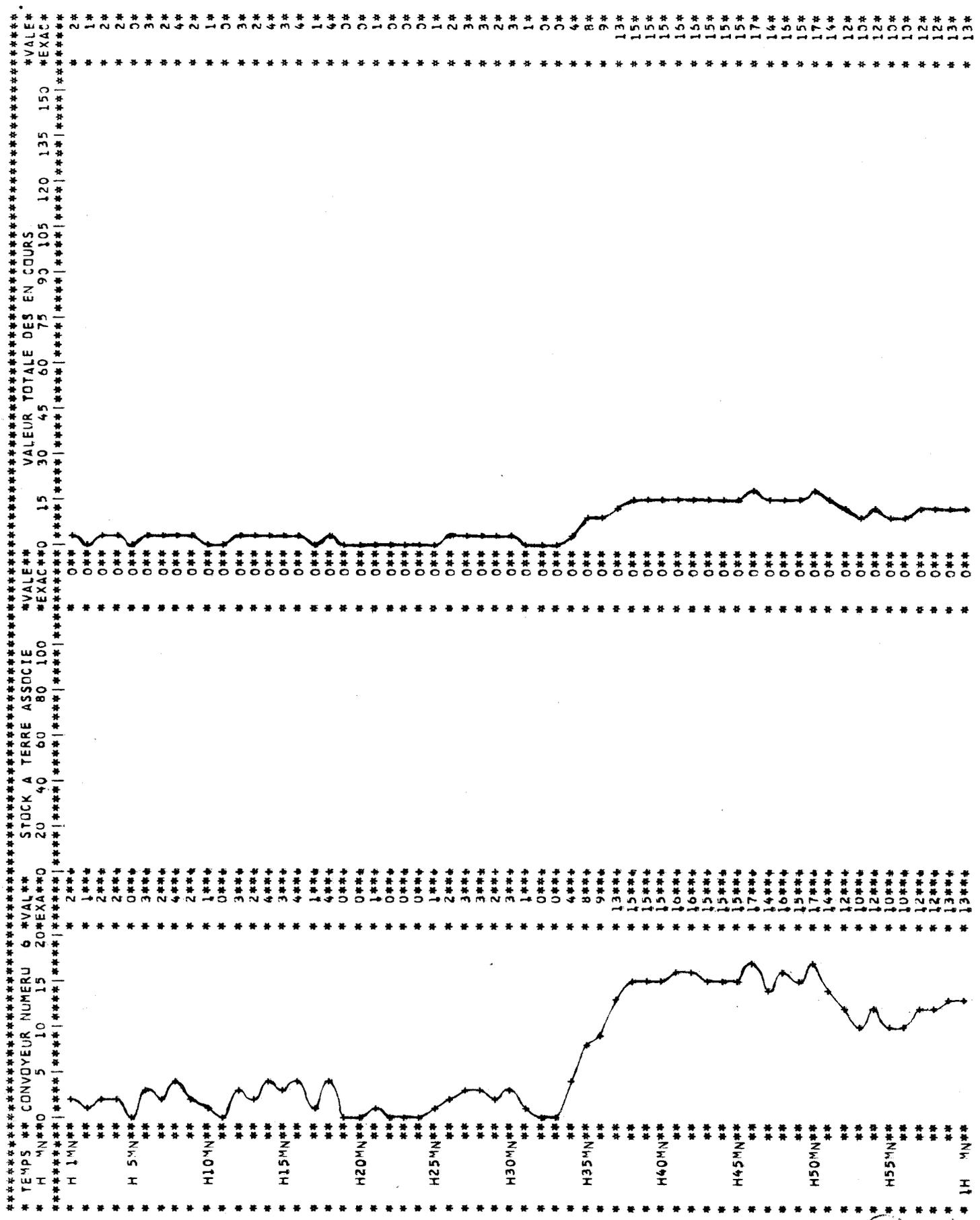


FIGURE V.7

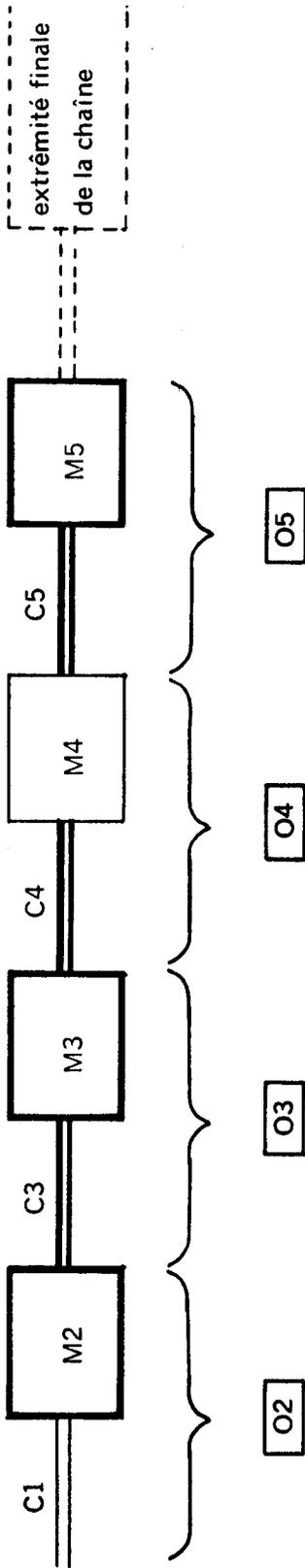


FIGURE V.8

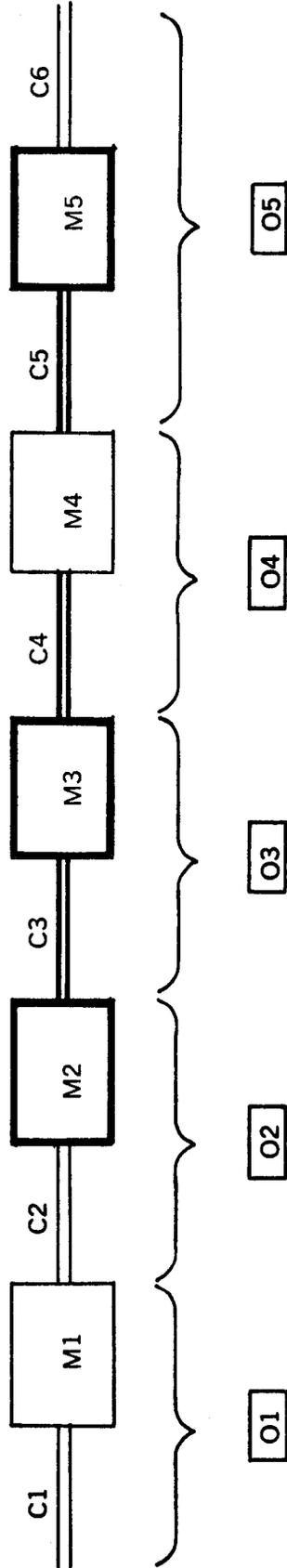


FIGURE V.9



* CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE NUMERO 1 2 *

* TEMPS DE CYCLE 1 21 * CADENCE 1 220 * NOMBRE DE PIECES PAR CYCLE 1 1 * NOMBRE DE PIECES A USINER 1 9999 *

* CARACTERISTIQUES DES OUTILS
* CL01* CL02* CL03* CL04* CL05* CL06* CL07* CL08* CL09* CL10* CL11* CL12* CL13* CL14* CL15* CL16* CL17* CL18* CL19* CL20*
* CHARN* 1500* 3000* 4500* 9000*12000*
* TCO * 5* 77* 100* 1000* 100*

* NUMERO DE GROUPE OPERATEUR 1 2 * NOMBRE D OPERATEURS NECESSAIRE 1 1 * POURCENTAGE D USURE MINU 1 99 % *

* MISES EN DISPONIBILITE PROGRAMMES SUIVANT NOMBRE DE PIECES
* NB PIECES USINEES* 1000*
* DUREE DE L ARRET *9999999*

* LOI DES PANNES
* H DEB*
* H FIN*
* DUREE*

* MISES EN DISPONIBILITE PROGRAMMES EN TEMPS
* H DEB* 17100* 22200* 29000* 36300* 37800* 50700* 52500* 56900* 62700* 65900* 67600* 69300*
* H FIN* 19800* 25400* 29700* 36900* 38800* 51400* 54000* 57600* 64300* 66800* 68500* 70400*
* DUREE* 2700* 3200* 700* 1000* 700* 1500* 700* 1600* 900* 900* 1100*



FIGURE V.10

* CONVOYEUR NUMERO 1 3 *

* CARACTERISTIQUES *

* CAPACITE 1 200 * STOCK A TERRE MAX 1 0 * TEMPS DE TRAVERSEE A VIDE 1 600

* NUMERO DE GROUPE OPERATEURS 1 3 * TEMPS DE MANUTENTION D UNE PIECE 1 1

* INITIALISATION *

* NOMBRE DE PIECES * DANS LE CONVOYEUR 1 140 * A TERRE 1 0

* RESULTATS *

* NOMBRE DE PIECES DANS LE CONVOYEUR * MINI 1 0 * MOYEN 1 139 * MAXI 1 200 * A LA FIN DE L HISTOIRE 1 190 *

* NOMBRE DE PIECES A TERRE * MINI 1 0 * MOYEN 1 0 * MAXI 1 0 * A LA FIN DE L HISTOIRE 1 0 *

* NOMBRE DE FOIS OU LE CONVOYEUR EST * VIDE 1 1 * PLEIN 1 107 *

* CONVOYEUR NUMERO 1 4 *

* CARACTERISTIQUES *

* CAPACITE 1 200 * STOCK A TERRE MAX 1 0 * TEMPS DE TRAVERSEE A VIDE 1 600

* NUMERO DE GROUPE OPERATEURS 1 4 * TEMPS DE MANUTENTION D UNE PIECE 1 1

* INITIALISATION *

* NOMBRE DE PIECES * DANS LE CONVOYEUR 1 50 * A TERRE 1 0

* RESULTATS *

* NOMBRE DE PIECES DANS LE CONVOYEUR * MINI 1 6 * MOYEN 1 140 * MAXI 1 200 * A LA FIN DE L HISTOIRE 1 152 *

* NOMBRE DE PIECES A TERRE * MINI 1 0 * MOYEN 1 0 * MAXI 1 0 * A LA FIN DE L HISTOIRE 1 0 *

* NOMBRE DE FOIS OU LE CONVOYEUR EST * VIDE 1 0 * PLEIN 1 230 *

FIGURE V.13



* CONVOYEUR NUMERO 1 5 *

* CARACTERISTIQUES *

* CAPACITE : 200 * STOCK A TERRE MAX : 0 * TEMPS DE TRAVERSEE A VIDE : 600

* NUMERO DE GROUPE OPERATEURS : 5 * TEMPS DE MANUTENTION D UNE PIECE : 1

* INITIALISATION *

* NOMBRE DE PIECES * DANS LE CONVOYEUR : 200 * A TERRE : 0

* RESULTATS *

* NOMBRE DE PIECES DANS LE CONVOYEUR * MINI : 174 * MOYEN : 199 * MAXI : 200 * A LA FIN DE L HISTOIRE : 200 *

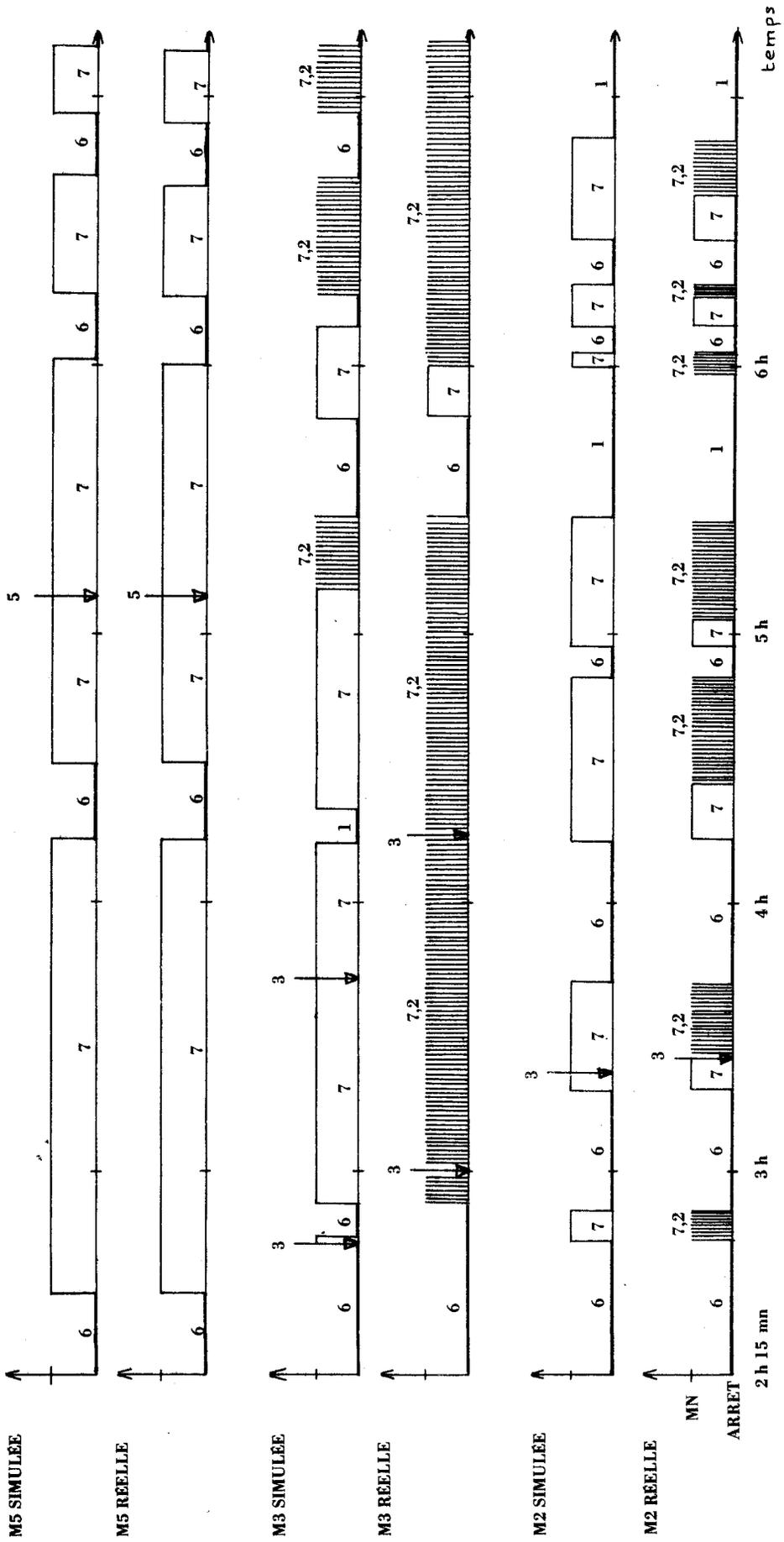
* NOMBRE DE PIECES A TERRE * MINI : 0 * MOYEN : 0 * MAXI : 0 * A LA FIN DE L HISTOIRE : 0 *

* NOMBRE DE FOIS OU LE CONVOYEUR EST * VIDE : 0 * PLEIN : 525 *

FIGURE Y.14



ÉVOLUTION
DANS LE TEMPS
DE LA MACHINE :



7 : MN 6 : DIS 5 : AM 4 : MP 3 : CO 2 : SAT 1 : DES



FIGURE V.18

EVOLUTION MACHINE NUMERO 1 2

HEURE	ETAT	MIN	DIS	DUREES	AM	MP	CO	SAT	DES	PIECES#NB	*NB
* RELAT * 7*6*5*4*3*2*1*											
* 9H44MN*1*		17619*	26523*				82*	846*	13323*	840*	18*
* 9H44MN*1*		17640*	26523*				82*	852*	13323*	841*	19*
* 9H44MN*1*		17661*	26523*				82*	858*	13323*	842*	20*
* 9H44MN*1*		17682*	26523*				82*	864*	13323*	843*	21*
* 9H45MN*1*		17703*	26523*				82*	870*	13323*	844*	22*
* 9H45MN*1*		17724*	26523*				82*	876*	13323*	845*	23*
* 9H45MN*1*		17745*	26523*				82*	882*	13323*	846*	24*
* 9H46MN*1*		17766*	26523*				82*	888*	13323*	847*	25*
* 9H46MN*1*		17787*	26523*				82*	894*	13323*	848*	26*
* 9H46MN*1*		17808*	26523*				82*	900*	13323*	849*	27*
* 9H47MN*1*		17829*	26523*				82*	906*	13323*	850*	28*
* 9H47MN*1*		17850*	26523*				82*	912*	13323*	851*	29*
* 9H47MN*1*		17871*	26523*				82*	918*	13323*	852*	30*
* 9H47MN*1*		17892*	26523*				82*	924*	13323*	853*	31*
* 9H48MN*1*		17913*	26523*				82*	930*	13323*	854*	32*
* 9H48MN*1*		17934*	26523*				82*	936*	13323*	855*	33*
* 9H48MN*1*		17955*	26523*				82*	942*	13323*	856*	34*
* 9H48MN*1*		17976*	26523*				82*	948*	13323*	857*	35*
* 9H49MN*1*		17997*	26523*				82*	954*	13323*	858*	36*
* 9H49MN*1*		18018*	26523*				82*	960*	13323*	859*	37*
* 9H49MN*1*		18039*	26523*				82*	966*	13323*	860*	38*
* 9H50MN*1*		18060*	26523*				82*	972*	13323*	861*	39*
* 9H50MN*1*		18081*	26523*				82*	978*	13323*	862*	40*
* 9H50MN*1*		18102*	26523*				82*	984*	13323*	863*	41*
* 9H50MN*1*		18123*	26523*				82*	990*	13323*	864*	42*
* 9H51MN*1*		18144*	26523*				82*	996*	13323*	865*	43*
* 9H51MN*1*		18165*	26523*				82*	1002*	13323*	866*	44*
* 9H51MN*1*		18186*	26523*				82*	1008*	13323*	867*	45*
* 9H51MN*1*		18207*	26523*				82*	1014*	13323*	868*	46*

FIGURE V.20



#EVOLUTION MACHINE NUMERO 1 5 #

HEURE	ETAT	MN	DIS	AM	DUREES D	EXISTENCE	DES VI	SAT	DES	PIECE#NB	NB
RELAT	#76#54#3#2#1	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
2H33MN	#1	*	15300*	*	*	*	*	*	*	230*	*
4H14MN	#1	*	15300*	*	*	*	*	*	*	231*	*
4H31MN	#1	*	10120*	*	*	*	*	*	*	313*	*
5H 8MN	#1	*	13855*	*	*	*	*	*	*	310*	*
5H 9MN	#1	*	16980*	86*	*	*	*	*	*	433*	*
6H 1MN	#1	*	19047*	86*	*	*	*	*	*	493*	*
6H16MN	#1	*	18467*	86*	*	*	*	*	*	494*	*
6H42MN	#1	*	21687*	86*	*	*	*	*	*	528*	*
6H56MN	#1	*	19827*	86*	*	*	*	*	*	529*	*
7H11MN	#1	*	23227*	86*	*	*	*	*	*	660*	*
8H38MN	#1	*	24227*	86*	*	*	*	*	*	661*	*
9H36MN	#1	*	29035*	86*	*	*	*	*	*	*	*
10H 1MN	#1	*	30979*	86*	*	*	*	*	*	*	*

FIGURE V.22

TEMPS	CONVOYEUR	NUMERU	3	VAL**	STOCK A TERRE ASSOCIE	5	10	15	20	25	VALE**	EXAC**	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	VALE*	EXAC*
H 1MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 5MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 10MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 15MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 20MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 25MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 30MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 35MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 40MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 45MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 50MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
H 55MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
1H MN	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

FIGURE V.26



EVOLUTION MACHINE NUMERO 1 3

HEURE	RELAT	*7*6*	5*4*3*2*1*	ETAT	MN	*DIS	AM	MP	CD	SAT	DES	*PIECERNB	*NB
H MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 2MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 3MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 4MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 5MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 6MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 7MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 8MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 9MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 10MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 11MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 12MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 13MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 14MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 15MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 16MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 17MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 18MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 19MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 20MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 21MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 22MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 23MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 24MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 25MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 26MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 27MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 28MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 29MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 30MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 31MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 32MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 33MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 34MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 35MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 36MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 37MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 38MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 39MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 40MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 41MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 42MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 43MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 44MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 45MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 46MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 47MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 48MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 49MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 50MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 51MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 52MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 53MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 54MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 55MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 56MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 57MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 58MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 59MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*
H 60MN	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*	*	*	*

FIGURE V.28



CONCLUSION

Les essais ont montré que le modèle reproduisait assez fidèlement le comportement des machines, les divergences constatées provenant principalement de l'insuffisance actuelle des informations retraçant l'évolution de la chaîne.

En raison de ce manque d'information, l'évolution des en-cours et le comportement des opérateurs n'ont pu être vérifiés.

La mise en exploitation future du modèle demandera quelques aménagements qui permettront d'une part, d'accroître sa précision, et d'autre part, de faciliter sa mise en œuvre et de diminuer le temps d'occupation de l'ordinateur utilisé.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les essais effectués ont montré que les résultats globaux sont les mêmes que pour le système réel étudié, et que les machines réelles et les machines simulées évoluaient de façon semblable dans le temps.

A l'opposé du modèle établi à partir des phénomènes d'attente, le modèle que nous avons construit, à partir de la logique de fonctionnement d'une chaîne, est d'une grande souplesse d'utilisation. De plus, l'analogie directe de fonctionnement avec une chaîne réelle permet à l'utilisateur d'employer son mode de raisonnement habituel.

La simulation des phénomènes aléatoires coute très cher en temps calcul car, seule la simulation d'un grand nombre d'histoires utilisant des échantillons artificiels de loi de probabilité différents pour chaque histoire, permet de s'assurer de la convergence statistique des résultats. Nous avons préféré la simulation du passé à la simulation stochastique : le modèle reproduira le fonctionnement d'une chaîne d'usinage réelle pendant une ou plusieurs journées passées. Le choix de ces journées et l'interprétation des résultats sont du ressort de l'utilisateur qui, en l'absence d'informations statistiques suffisantes, doit pouvoir se baser sur son expérience et son intuition.

Comme dans toute application informatique, la validité d'une simulation dépend des informations d'entrée et du traitement qu'elles subissent. La mise en place d'un système de saisie d'informations adéquat doit permettre de reproduire l'évolution dans le temps de tous les éléments de la chaîne, à partir des conditions initiales identiques.

L'utilisation future du modèle révélera sans doute certaines imperfections ; nous pensons en particulier aux différentes politiques d'exploitation de la chaîne (gestion des stocks inter-opérations, gestion des outils, ...). Une meilleure connaissance de ces politiques (différents types et conditions d'application) doit permettre d'accroître le réalisme du modèle.

Dans ces conditions, le modèle de chaîne d'usinage que nous venons de décrire constituera un outil très puissant pour les services chargés d'améliorer le fonctionnement des moyens de production installés. Son utilisation nous semble liée à l'existence d'un système du type « Assistance de Fabrication » qui est particulièrement apte à délivrer des informations suffisantes en qualité et en quantité. Ces deux outils font partie d'un ensemble de moyens nouveaux répondant à un besoin d'aide à la décision, et sont conçus dans le cadre général du contrôle et de l'optimisation des processus appelé à prendre des dimensions de plus en plus importantes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- /1/ D.N. CHORAFAS : «Systems and Simulation»
Mathematics in Science and Engineering. Academic Press.1965.
- /2/ J.W. FORRESTER : «Industrial Dynamics»
MIT Press.1972.
- /3/ A. KAUFMANN - R. CRUON : «Les Phénomènes d'Attente»
Dunod. 1961.
- /4/ A. KAUFMANN : «Méthodes et Modèles de la Recherche Opérationnelle»
tome I. Dunod. 1972.
- /5/ A. PAPOULIS : «Probability, Random Variables, and Stochastic Processes»
Mc Graw - Hill Book Company. 1965.
- /6/ Groupe de spécialistes animés par J. AGARD : «Les méthodes de Simulation»
Monographie de Recherche Opérationnelle. n° 7. AFIRO. Dunod. 1968.
- /7/ Revue «Informatique» : n° 52. juin 1974.
n° 53. juillet/août 1974.
- /8/ J.D. WARNIER : «Entraînement à la Programmation»
Les Éditions d'Organisation. 1971.

