



HAL
open science

Une aide à la conception de systèmes de production basée sur la simulation et l'analyse de données

Heritier-Pingeon Christine

► **To cite this version:**

Heritier-Pingeon Christine. Une aide à la conception de systèmes de production basée sur la simulation et l'analyse de données. Automatique. INSA de Lyon, 1991. Français. NNT : 1991ISAL0020 . tel-00840151

HAL Id: tel-00840151

<https://theses.hal.science/tel-00840151>

Submitted on 1 Jul 2013

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

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

T H E S E

présentée

devant L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

pour obtenir

Le grade de Docteur

Spécialité "Informatique et Automatique Appliquées"

par

Christine HERITIER-PINGEON

**Une aide à la conception de systèmes de production
basée sur la simulation et l'analyse de données
(VOLUME I)**

soutenue le 20 juin 1991 devant la Commission d'Examen

Jury	M. J-P. KIEFFER,	Professeur des Universités à l'Université d'Aix-Marseille, Rapporteur
	M. P. LADET,	Professeur des Universités à l'INP de Grenoble, Directeur de thèse
	M. A. MATHON,	Professeur, Directeur du Département "Stratégie du développement" de l'EMSE
	M. H. PIERREVAL,	Maître de Conférences au Laboratoire d'Informatique et Modélisation de Systèmes de Production, Université Claude Bernard, LYON I
	M. P. PREVOT,	Professeur des Universités à l'INSA de LYON, Directeur de la Formation Doctorale, Rapporteur

T H E S E

présentée

devant L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

pour obtenir

Le grade de Docteur

Spécialité "Informatique et Automatique Appliquées"

par

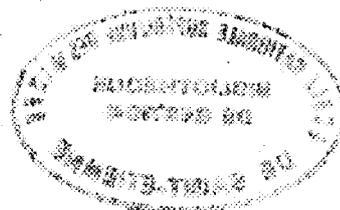
Christine HERITIER-PINGEON

**Une aide à la conception de systèmes de production
basée sur la simulation et l'analyse de données**

(VOLUME 1)

 soutenue le 20 juin 1991 devant la Commission d'Examen

Jury	M. J-P. KIEFFER,	Professeur des Universités à l'Université d'Aix-Marseille, Rapporteur
	M. P. LADET,	Professeur des Universités à l'INP de Grenoble, Directeur de thèse
	M. A. MATHON,	Professeur, Directeur du Département "Stratégie du développement" de l'EMSE
	M. H. PIERREVAL,	Maître de Conférences au Laboratoire d'Informatique et Modélisation de Systèmes de Production, Université Claude Bernard, LYON I
	M. P. PREVOT,	Professeur des Universités à l'INSA de LYON, Directeur de la Formation Doctorale, Rapporteur



INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

Directeur : J. ROCHAT

Chefs de Département :

G. PERACHON, Professeur	1° Cycle
P. NARDON, Professeur	Biochimie
N. MOGEREAU, Professeur	Génie Civil et Urbanisme
H. KLEIMANN, Professeur	Génie Electrique
A. LALLEMAND, Professeur	Génie Energétique
C. MARTY, Professeur	Génie Mécanique Construction
D. PLAY, Professeur	Génie Mécanique Développement
A. LAUGIER, Professeur	Génie Physique Matériaux
Y. MARTINEZ, Professeur	Informatique

Professeurs :

R. ARNAL	INFORMATIQUE APPLIQUEE
J. BAHUAUD	MECANIQUE DES SOLIDES
B. BALLAND	PHYSIQUE DE LA MATIERE
M. BOIVIN	MECANIQUE DES SOLIDES
H. BOTTA	GENIE CIVIL EN URBANISME (METHODES)
G. BOULAYE	INFORMATIQUE APPLIQUEE
J. BOUSQUET	THERMOCHIMIE MINERALE
J.P. CHANTE	ELECTRONIQUE DE PUISSANCE
M. CHEVRETON	ETUDE DES MATERIAUX
B. CLAUDEL	CINETIQUE ET GENIE CHIMIQUES
L. CRONENBERGER	CHIMIE BIOLOGIQUE
A. DOUTHEAU	CHIMIE ORGANIQUE
L. EYRAUD	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
G. FANTOZZI	GEMPPM *
J. FAVREL	INFORMATIQUE APPLIQUEE
Y. FETIVEAU	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
P. FLEISCHMANN	GEMPPM *
L. FRECON	DEVELOPPEMENT ET LANGAGES INFORMATIQUES AVANCES
R. GAUTHIER	PHYSIQUE DE LA MATIERE
M. GERY	GENIE CIVIL ET URBANISME (EQUIPEMENT DE L'HABITAT)
G. GIMENEZ	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
G. GOBIN	GEMPPM *
M. GODET	MECANIQUE DES CONTACTS
P. GONNARD	GENIE ELECTRIQUE
R. GOUTTE	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
G. GRANGE	GENIE ELECTRIQUE
G. GUENIN	GEMPPM *
C. GUILLAUD	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
G. GUILLOT	PHYSIQUE DE LA MATIERE
C. GUITTARD	DEVELOPPEMENT ET LANGAGES INFORMATIQUES AVANCES
J.L. GUYADER	VIBRATIONS-ACOUSTIQUE
R. HENRY	MECANIQUE DES STRUCTURES
J. JOUBERT	GENIE MECANIQUE
J.F. JULLIEN	BETONS ET STRUCTURES
A. JUTARD	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
H. KLEIMANN	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
J. KOULOUMDJIAN	INFORMATIQUE APPLIQUEE
M. LALANNE	MECANIQUE DES STRUCTURES
A. LALLEMAND	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE

* GROUPE D'ETUDES METALLURGIE PHYSIQUE ET PHYSIQUE DES MATERIAUX



P. LAREAL	GENIE CIVIL ET URBANISME (GEOTECHNIQUE)
A. LAUGIER	PHYSIQUE DE LA MATIERE
CH. LAUGIER	PHYSIOLOGIE ET PHARMACODYNAMIE
P. LAVIOLETTE	BIOLOGIE
C. LESUEUR	VIBRATIONS-ACOUSTIQUE
Y. MARTINEZ	INFORMATIQUE APPLIQUEE
C. MARTY	ETUDE DES PROCEDES DE FABRICATION
H. MAZILLE	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
N. MONGEREAU	GENIE CIVIL (GEOTECHNIQUE)
G. MONNIER	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
P. NARDON	BIOLOGIE
A. NAVARRO	CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRONNEMENT
H. PACHECO	CHIMIE BIOLOGIQUE
J.P. PASCAULT	MATERIAUX MACROMOLECULAIRES
J. PERA	SOLIDES ET MATERIAUX MINERAUX
G. PERACHON	THERMOCHIMIE MINERALE
M. PERDRIX	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
J. PEREZ	GEMPPM*
E. PERNOUX	GEMPPM*
P. PINARD	PHYSIQUE DE LA MATIERE ET PHYSIQUE INDUSTRIELLE
D. PLAY	CONCEPTION ET ANALYSE DE SYSTEMES MECANQUES
P. PREVOT	INFORMATIQUE APPLIQUEE
R. REYNAUD	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
M. RICHARD	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
E. RIEUTORD	MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE
R. RIVIERE	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
J. ROBERT-BAUDOY	MICROBIOLOGIE
J. ROBIN	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
M. ROLIN	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
J.F. SACADURA	MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE
L. SICARD	MECANIQUE
F. STOEBER	MICROBIOLOGIE
M. THEOLIER	METALLURGIE ET TRAITEMENTS THERMIQUES
J. TUSET	SOLIDES ET MATERIAUX MINERAUX
R. UNTERREINER	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
J. VERON	CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRONNEMENT
P. VUILLERMOZ	PHYSIQUE DE LA MATIERE

Directeurs de recherche C.N.R.S. :

P. CLAUDY	THERMOCHIMIE MINERALE
A. GROUILLER	CHIMIE BIOLOGIQUE
M. MURAT	SOLIDES ET MATERIAUX MINERAUX
A. NOUAILHAT	PHYSIQUE DE LA MATIERE

Directeurs de recherche I.N.R.A. :

M. BONNOT Guy
M. GRENIER Simon
M. MENEZO Yves

Directeurs de recherche I.N.S.E.R.M. :

M. LAGARDE



Remerciements

La thèse présentée ici a été réalisée au Département Stratégie du Développement de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne. Elle a, bien sûr, bénéficié des travaux et réflexions conduits collectivement par l'équipe du Groupe Automatisation de Systèmes de Production Industriels.

Je remercie tout d'abord M. Albert Mathon, directeur du département Stratégie du Développement, pour la qualité de son accueil, sa disponibilité et la confiance qu'il m'a témoignée au cours de ma recherche.

Je remercie également M. Pierre Ladet, qui a bien voulu encadrer cette thèse et apporter son ouverture scientifique.

Je remercie vivement M. Jean-Paul Kieffer, rapporteur, pour l'intérêt qu'il a marqué à l'égard de ce travail, au travers du volume et de la qualité de ses commentaires.

Tous mes remerciements, également, à M. Patrick Prévot, qui a accepté d'être rapporteur de ce mémoire, malgré de sévères contraintes temporelles.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude à Henri Pierreval, dont les critiques scientifiques et méthodiques, mais aussi les encouragements, m'ont guidé tout au long de ces travaux.

J'adresse mes remerciements les plus chaleureux aux membres du département, qui ont nécessairement participé, de près ou de loin à la réalisation de cette étude, par leurs critiques, leurs relectures et leurs conseils, tant sur le fond que sur la forme. Je remercie donc ici les spécialistes de la simulation, de l'analyse de données, de la gestion de production, des PC, des imprimantes laser, des Mac, des Word... : Lucien, Bertrand, Marie-Agnès, Bernadette, Zahia, Béatrix, Patrick, Saïd, Philippe, Didier, Pierre, François-Noël, Partha, Guillermo, Yé, Shim ... ainsi que les professeurs du département. Leur soutien amical et leur constante bonne humeur m'ont fait bénéficier d'une ambiance de travail très agréable.

Je remercie bien sincèrement le service reprographie de l'Ecole pour sa gentillesse à mon égard.

Enfin, tous les amis et parents qui ont suivi de plus près l'élaboration de ce mémoire savent bien tout ce que son achèvement doit à leur présence, à leur confiance et à leur patience sans limite ! ... Merci beaucoup.



Table des matières



VOLUME 1

1. INTRODUCTION GENERALE.....	14
1.1. MODES DE PRODUCTION ET SYSTEMES DE PRODUCTION.....	15
1.1.1. Un peu d'histoire	15
1.1.2. Automatisation et flexibilité.....	16
1.1.3. Enjeux et complexité de la conception de systèmes de production.....	18
1.2. L'AIDE A LA CONCEPTION.....	18
1.2.1. Le problème de la modélisation	19
1.2.2. Le problème de l'expertise en conception de systèmes de production.....	19
1.2.3. Les limites de la simulation	19
1.3. PLAN DE LA THESE	20
2. PREMIERE PARTIE : INTRODUCTION AU DOMAINE ET AUX OUTILS	22
2.1. LES SYSTEMES DE PRODUCTION.....	23
2.1.1. Le domaine d'étude et la problématique.....	23
2.1.1.1. Hypothèses de modélisation.....	24
2.1.1.2. Modèles conceptuels des systèmes de production.....	25
2.1.2. Conception des systèmes de production automatisés.....	27
2.1.2.1. Les problèmes.....	27
2.1.2.2. L'évaluation du système futur.....	30
2.1.2.2.1. Les objectifs.....	30
2.1.2.2.2. Un compromis à trouver.....	31
2.1.2.3. La notion de performance.....	33
2.1.2.4. Conception conjointe du système de transport et de l'interface de stockage	35
2.1.3. Les méthodes.....	36
2.1.3.1. Les méthodes analytiques.....	36
2.1.3.2. La simulation.....	38
2.1.4. Un outil d'aide à la décision s'appuyant sur la simulation.....	39

2.2. LA SIMULATION A EVENEMENTS DISCRETS.....	40
2.2.1. Les simulateurs à événements discrets	41
2.2.1.1. Principes de fonctionnement	41
2.2.1.2. Les modèles pour la simulation.....	42
2.2.1.3. Les langages de simulation.....	42
2.2.1.4. Caractéristiques du langage choisi (SIMAN V3.21).....	43
2.2.2. Les étapes du processus de simulation	45
2.2.2.1. La démarche d'ensemble.....	40
2.2.2.2. Analyse du problème et collecte des données	47
2.2.2.3. Elaboration d'un modèle	50
2.2.2.3.1. Modélisation - Programmation.....	50
2.2.2.3.2. Vérification.....	50
2.2.2.3.3. Validation.....	53
2.2.2.3. Construction d'expériences	55
2.2.2.4. Exploitation des résultats	58
2.2.3. Bilan et perspectives de la simulation	59
2.3. SYNTHESE DE LA PREMIERE PARTIE.....	59
3. DEUXIEME PARTIE : SIMULATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION	61
3.1. ANALYSE ET MODELISATION DE "MACSI"	62
3.1.1. Présentation du cas	62
3.1.2. Première étape du processus.....	62
3.1.2.1. Analyse et description du problème	62
3.1.2.2. Collecte des données et relevé des mesures	69
3.1.3. Deuxième étape du processus : de la modélisation à la validation	72
3.1.3.1. Modélisation.....	74
3.1.3.2. Programmation.....	81
3.1.3.3. Vérification	82
3.1.3.4. Validation.....	85
3.1.3.4.1. Les intervalles de confiance	88
3.1.3.5. Contrôle de la simulation	91
3.1.3.5.1. Compromis entre longueur de simulation et nombre d'échantillons.....	91
3.1.3.5.2. Détermination de la longueur des simulations (condition de terminaison).....	94
3.1.3.5.3. Calcul de "N", taille de l'échantillon	96
3.1.3.5.4. La période transitoire.....	97
3.1.3.5.5. Application : détermination de L (longueur de simulation) et de N (nombre de simulations).....	98
3.1.4. Synthèse du chapitre.....	103

3.2. CONSTRUCTION D'UNE CAMPAGNE DE SIMULATIONS.....	105
3.2.1. Pourquoi procéder par campagnes de simulation	105
3.2.1.1. Des questions multi-critères	105
3.2.1.2. Définition d'une "campagne"	107
3.2.2. Elaboration d'un plan de simulation	108
3.2.2.1. Les techniques existant pour la mise au point d'un plan.....	108
3.2.2.1.1. Plans d'expériences	109
3.2.2.1.2. Le test systématique partiel.....	111
3.2.2.2. La méthode retenue : le plan randomisé sur Test Partiel	111
3.2.2.2.1. Les facteurs du plan - Variation par groupe	112
3.2.2.2.2. Un plan "randomisé".....	115
3.2.2.2.3. Les indicateurs	115
3.2.3. Application : Génération Automatique de Plans de Simulations (GAPS)	117
3.2.3.1. Description de GAPS	117
3.2.3.2. Test partiel : le vecteur PLAN.....	120
3.2.3.3. Plan Randomisé : taille de l'échantillon.....	121
3.2.4. Synthèse du chapitre.....	121
3.3. CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	122

4. TROISIEME PARTIE : L'ANALYSE DES DONNEES COMME METHODE D'ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LE COMPORTEMENT DES SYSTEMES DE PRODUCTION

123

4.1. L'ANALYSE DES DONNEES POUR LES SIMULATIONS : PROPOSITION DE METHODE.....	124
4.1.1. Les apports attendus de l'A.D.....	124
4.1.1.1. Principes de l'ACP (Analyse en Composantes Principales)..	128
4.1.1.2. Principes de la classification automatique.....	130
4.1.1.3. Les limites de l'A.D.....	132
4.1.2. Proposition de méthode.....	134
4.1.2.1. Introduction à la démarche	134
4.1.2.2. Apports de l'analyse de données à l'analyse de systèmes de production : état de l'art.....	135
4.1.2.2.1. Apports de l'ACP.....	137
4.1.2.2.2. Apports de la Classification	138
4.1.2.3. Une démarche d'exploitation des résultats de simulation	138
4.1.2.4. Résumé de la procédure	141
4.1.3. Synthèse du chapitre.....	142

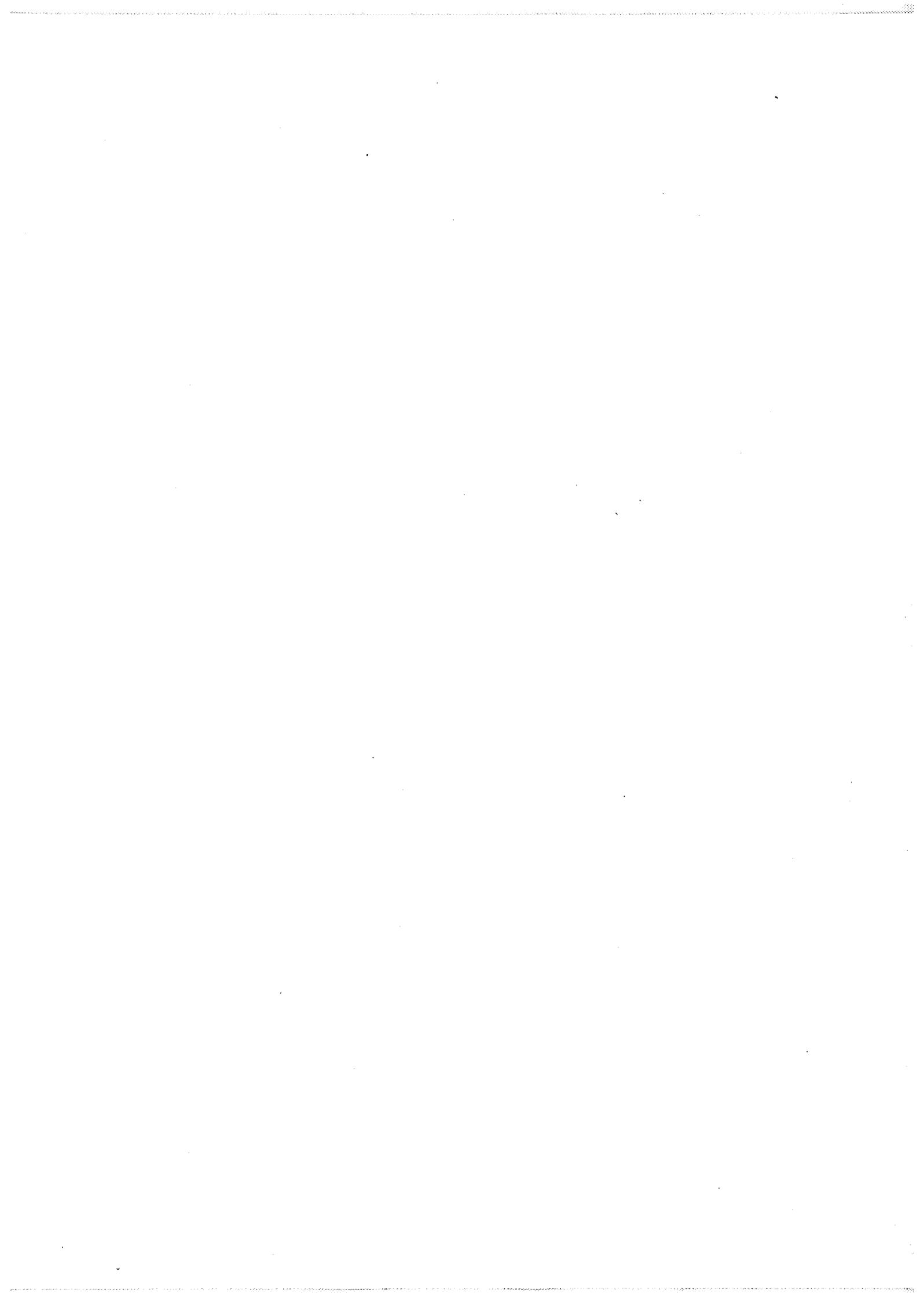
4.2. ETAPES 1 ET 2 : PHASES PREPARATOIRES.....	143
4.2.1. Etape 1 : cadrer les expériences / déterminer les valeurs standard de contexte	143
4.2.1.1. Les standards du bloc "T"	143
4.2.1.2. Les standards du bloc "O".....	150
4.2.1.3. Synthèse de la phase de cadrage des simulations	154
4.2.2. Etape 2 : Affinage des facteurs et des indicateurs	154
4.2.2.1. Affinage des indicateurs	154
4.2.2.2. Affinage des facteurs.....	163
4.2.2.3. Conclusion de la phase d'affinage	167
4.2.3. Synthèse du chapitre.....	167
 4.3. ETAPE 3 : DESCRIPTION SYNTHETIQUE DU NUAGE PAR ACP.....	168
4.3.1. Présentation de la campagne de test.....	168
4.3.2. Description de l'ensemble des simulations par ACP.....	171
4.3.2.1. Mise en oeuvre.....	171
4.3.2.2. Exploitation.....	171
4.3.2.2.1. L'interprétation des axes	173
4.3.2.2.2. Les points isolés.....	182
4.3.2.3. Synthèse de la description du nuage.....	182
4.3.3. Hiérarchie des facteurs d'influence	184
4.3.4. Liens entre indicateurs.....	184
4.3.4.1. Les non-corrélations.....	185
4.3.4.2. Les corrélations positives.....	186
4.3.4.2.1. Corrélations positives triviales	186
4.3.4.2.2. Corrélations positives non triviales.....	189
4.3.4.3. Remarques sur le graphe.....	189
4.3.5. Synthèse du chapitre : conclusions sur l'ACP.....	191
 4.4. ETAPES 4 ET 5 : RECHERCHE ET INTERPRETATION DE TYPES DE COMPORTEMENTS ET DE STRATEGIES.....	192
4.4.1. Etape 4 : Structuration du nuage - Typologie des comportements	195
4.4.1.1. Construction d'une partition sur l'ensemble des performances	195
4.4.1.1.1. Partition de référence.....	196
4.4.1.1.2. Stabilité de la partition	196
4.4.1.2. Interprétation des profils.....	199
4.4.1.2.1. Analyse de l'arbre de classification.....	199
4.4.1.2.2. Description des types de comportements	200
4.4.1.2.3. Comparaison des profils de comportement sur les facteurs principaux.....	206

4.4.2. Etape 5 : Caractérisation des classes (ou "stratégies").....	210
4.4.2.1. Puissance ségrégative des facteurs	212
4.4.2.2. Caractérisation de chacune des classes.....	214
4.4.2.3. Règle d'affectation d'un scénario à un comportement	219
4.4.2.4. Règle de passage d'un profil à l'autre.....	222
4.4.3. Synthèse du chapitre.....	224
 4.5.BILAN DE L'UTILISATION DE L'ANALYSE DE DONNEES.....	 226
 5. QUATRIEME PARTIE : BILAN ET PROSPECTIVES	 229
 5.1. QUANT A L'ENRICHISSEMENT DU PROCESSUS DE SIMULATION	 230
 5.2. QUANT A LA CONSTRUCTION D'UN MODELE DE COMPORTEMENTS : UNE APPROCHE "APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE"	 230
5.2.1.Principe de l'apprentissage a partir d'exemples.....	231
5.2.2. Application au cas des simulations.....	231
 5.3. LES APPORTS DE NOTRE DEMARCHE A L'ANALYSE DES SYSTEMES DE PRODUCTION : LIMITATIONS DE MACSI.....	 233
 BIBLIOGRAPHIE	 234



VOLUME 2

Annexe A	11
Annexe B	25
Annexe C	28
Annexe D.....	34
Annexe E	41
Annexe F	45
Annexe G	52
Annexe H	54
Annexe I	58
Annexe J	76



LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Souplesse et/ou automatisation des systèmes de production
Figure 21.1	Décomposition fonctionnelle du système physique de production
Figure 21.2	Modèle conceptuel GRAI
Figure 21.3	Triangle d'évaluation des performances
Figure 21.4	Domaines de fonctionnement satisfaisant
Figure 22.1	Relations entre les événements, les activités et les processus
Figure 22.2	Les étapes d'une simulation
Figure 22.3	L'analyse du problème
Figure 22.4	Etape modélisation
Figure 31.1	Architecture de MACSI
Figure 31.2	Blocs élémentaires
Figure 31.3	MACSI : un modèle conceptuel des données
Figure 31.4	MACSI : un modèle conceptuel des traitements
Figure 31.5	Etape modélisation
Figure 31.6	Les objets du modèle
Figure 31.7	MACSI : les ressources "transport"
Figure 31.8	MACSI : les ressources "fabrication"
Figure 31.9	Architecture d'une simulation
Figure 31.10	Vérification du caractère des distributions de probabilité utilisées dans le modèle
Figure 31.11	Normalité des distributions - Test du Chi-Deux
Figure 31.12	Construction d'échantillons indépendants
Figure 31.13	Caractère cyclique des indicateurs de performance de MACSI
Figure 31.14	Compromis entre longueur de simulation et taille de l'échantillon
Figure 31.15	Troncature des données
Figure 31.16	Détermination de L
Figure 32.1	Etape Exploitation
Figure 32.2	Exemple d'un fichier LOT
Figure 32.3	Environnement complet de simulation

Figure 41.1	Tableau initial des données (RES)
Figure 41.2	Structure du fichier des résultats (RES)
Figure 41.3	Algorithme des nuées dynamiques
Figure 41.4	Arbre de classification
Figure 41.5	Construction d'un méta-modèle de MACSI
Figure 41.6	Démarche en 5 étapes pour exploiter les résultats de simulation
Figure 42.1	Cadrage des simulations - Détermination du contexte
Figure 42.2	Environnement - facteurs F3, T2, T3
Figure 42.3	Facteurs "T" - Plan factoriel des axes 1 et 2 - Projection des individus
Figure 42.4	Facteurs "T" - Plan factoriel des axes 3 et 4 - Projection des individus
Figure 42.5	Environnement - Facteurs "O"
Figure 42.6	Facteurs "O" - Plan factoriel des axes 1 et 2 - Projections des objets
Figure 42.7	Affinage des indicateurs
Figure 42.8	Affinage des indicateurs - Plan factoriel des axes 1 et 2
Figure 42.9	Affinage des facteurs
Figure 43.1	Description des simulations avec l'ACP
Figure 43.2	Plan factoriel des axes 1 et 2
Figure 43.3	Domaine de variation du facteur "Stockage"
Figure 43.4	Plan factoriel des axes 2 et 3
Figure 43.5	Plan factoriel des axes 3 et 4
Figure 43.6	Graphes des corrélations positives
Figure 44.1	Structuration des simulations
Figure 44.2	Partition de référence
Figure 44.3	Projection des centres de gravité des classes sur les axes principaux de l'ACP
Figure 44.4	Caractérisation de stratégies de pilotage
Figure 44.5	Puissance ségrégative des facteurs (p.s.)
Figure 44.6	Profils des configurations de stockage
Figure 44.7	Affectation d'un scénario à un comportement
Figure 44.8	Coefficients d'affectation (* 100)
Figure 44.9	Exemples d'affectation de scénarios aux comportements à l'aide des coefficients d'affectation

1. INTRODUCTION GENERALE



1.1. MODES DE PRODUCTION ET SYSTEMES DE PRODUCTION

Le mode de production et l'organisation du travail des sociétés occidentales sont le fruit d'une évolution historique ; replaçons-les brièvement dans l'environnement économique, politique, technologique qui les a produits et au sein duquel ils se situent.

1.1.1. Un peu d'histoire

Le XIX^e siècle a connu le regroupement des ouvriers et des machines sur un même lieu, réservé à la production : c'est la première révolution industrielle et la naissance des usines. La productivité est alors accrue par une simple extension de la production manufacturière (qui supprime la production artisanale), [Bonetto 87].

Après cette phase, on assiste à un accroissement "intensif" de la productivité, par une décomposition extrême du travail et une spécialisation poussée des ouvriers : c'est le taylorisme et la production de masse, qui s'appuient sur une consommation également de masse (les besoins augmentent en volume mais non en diversité). C'est le règne de la ligne de production, à laquelle correspond la standardisation des produits.

Au début des années 50, ce mode de production éclate, avec l'arrivée de machines plus adaptables, aux possibilités plus étendues. La demande se diversifie, accompagnant l'augmentation du niveau de vie et la mondialisation des échanges ; les produits sont plus variés.

Une accélération de ce phénomène a lieu aujourd'hui. La demande, très diversifiée, s'accompagne, en outre, d'une exigence de qualité ainsi que de changements rapides et difficilement prévisibles. Bien sûr, il existe encore des besoins correspondant à une production de masse, mais la division du travail s'étend maintenant à l'échelle internationale et les productions de type "chaîne", qui n'exigent qu'une faible qualification des ouvriers, ont avantage à se délocaliser dans des pays où la main-d'oeuvre est peu coûteuse.

1.1.2. Automatisation et flexibilité

Les pays industrialisés sont donc concernés par un type de production non linéaire, en petite ou moyenne série, exigeant une main-d'oeuvre qualifiée et face à une demande plutôt imprévisible. De plus, la compétitivité se joue sur la qualité du produit ; on cherche par conséquent à atteindre le "zéro-défaut".

Pour faire face à ces exigences, on cherche à accroître d'une part l'automatisation des systèmes de production, afin d'améliorer le contrôle sur la fabrication et de limiter les imperfections d'usinage, et, d'autre part, leur souplesse, afin de pouvoir répondre rapidement à la demande du marché.

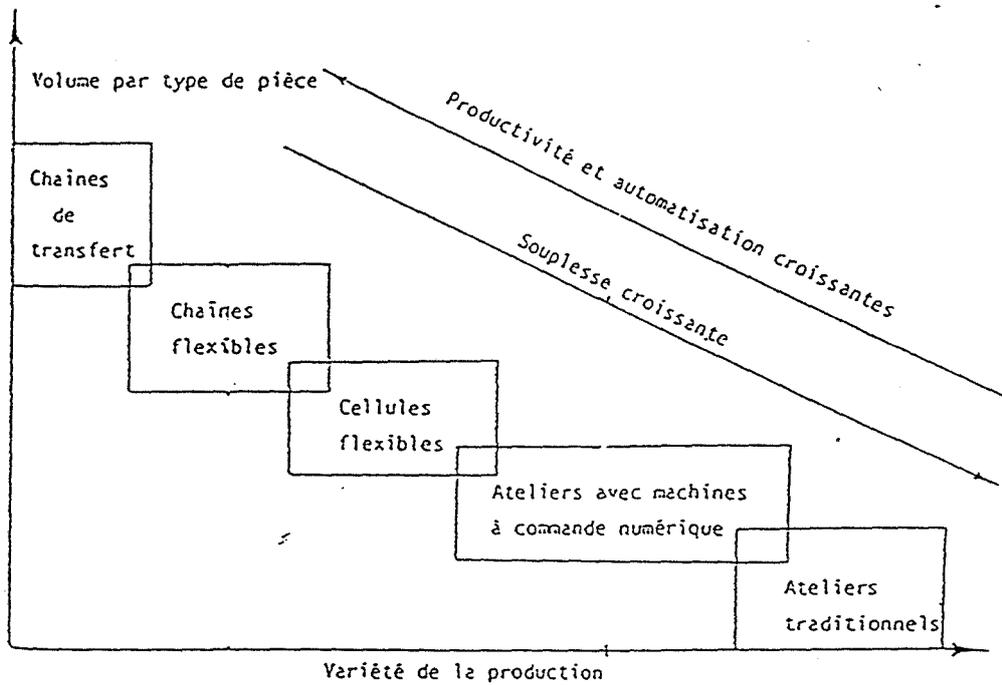
C'est la combinaison "souplesse" + "automatisation" qui constitue la "flexibilité" [Proth 86], bien que ces deux caractères soient antagonistes (cf figure 1.1).

La flexibilité est réalisée à travers la technologie des machines, mais aussi à travers le système de manutention et de transport, une logistique adaptée et enfin la gestion de l'atelier. Elle concerne les commandes imprévues autant que les changements de produits. Les problèmes qui se posent alors aux responsables de tels types de production sont ceux de la gestion des outillages et autres ressources, de la circulation des produits dans les ateliers et de leur ordonnancement sur les machines. Après une première phase d'automatisation et d'optimisation du processus de fabrication, on cherche maintenant à gagner sur les méthodes de gestion et d'organisation des flux.

A cet effet, on s'oriente actuellement vers une intégration des fonctions de l'usine (le CIM)¹ assurant une meilleure maîtrise des flux, associée à des modes de gestion de type "flux tendu".

¹ Computer Integrated Manufacturing

Souplesse et / ou Automatisation des systèmes de production



D'après (Proth 86)

Figure I.1

1.1.3. Enjeux et complexité de la conception de systèmes de production

Compte tenu des objectifs d'intégration et de flexibilité, c'est dès la conception du système de production qu'il s'agit de ne pas se tromper ; à ce niveau, toute erreur risque d'affecter plusieurs fonctions (commerciale, technique, sociale) et nuire à la compétitivité de l'entreprise, à sa productivité ou bien à son niveau d'emploi [Pierreval 87b]. Les conséquences financières peuvent être considérables. En effet, les solutions adoptées au niveau de la conception préliminaire (dimensionnement des installations) sont source d'investissements lourds (achats de machines, de chariots,...), donc coûteux et difficiles à remettre en cause (implantation d'atelier, par exemple).

Par conséquent, pour maîtriser la complexité des systèmes de production, il s'avère indispensable de proposer aux décideurs des outils et/ou des méthodes d'aide à l'évaluation de leurs choix en matière de conception. Une évaluation globale est difficile [Proth 86], compte tenu de l'impossibilité de chiffrer certains gains, comme l'amélioration de la qualité ou le temps de réponse aux imprévus. Cependant, il est primordial de s'en approcher, à l'aide d'une évaluation multicritère, par exemple.

1.2. L'AIDE A LA CONCEPTION

L'aide à la conception repose sur une modélisation du système de production à mettre en place. C'est sur ce modèle que le concepteur testera ses choix et en mesurera les effets. Les choix concernent soit des options de dimensionnement du système (capacité de transport, capacités des stocks,...), soit des options de gestion (taille des lots, plan de lancement, charge de l'atelier,...), soit encore plus fréquemment des conjonctions de ces options.

Aider à la conception, c'est ensuite fournir une connaissance du domaine sous forme de conseils, de règles de décision à appliquer afin de guider le décideur dans ses choix et dans ses tests.

1.2.1. Le problème de la modélisation

On procède d'abord à une analyse du système, afin de le modéliser selon un mode de représentation qui permettra de l'étudier. La première étape est d'ordre statique : repérer les objets et leurs relations. Parce que le fonctionnement dynamique du système intéresse en premier lieu le décideur, la seconde étape consistera à modéliser les règles de comportement du système.

Les composants d'un système de production sont liés par de fortes interactions, de type synchronisation d'événements dans le temps. La simulation est un outil intéressant car elle autorise précisément la modélisation de cette complexité ainsi que la prise en compte de l'aspect dynamique du système.

1.2.2. Le problème de l'expertise en conception de systèmes de production

Il s'agit de formaliser les connaissances et de les utiliser pour aider à la conception des systèmes. Or on bute ici sur un manque de connaissance en ce qui concerne les effets des décisions prises à ce niveau-là sur le comportement des divers composants du système. On s'est beaucoup plus intéressé jusqu'à présent, en effet, aux questions de gestion d'atelier ou d'ordonnancement des systèmes de production qu'à celles de leur conception. Ordinairement la connaissance est issue de l'expérience accumulée au fil des années mais, lorsque l'expérience n'a pas eu suffisamment de temps pour produire de la connaissance comme c'est le cas pour les systèmes de production très automatisés, on essaie de remédier à ce problème par la génération d'expériences artificielles. Par conséquent, là encore, la simulation est un outil particulièrement bien adapté. La connaissance sera ainsi tirée non du réel mais de sa représentation simulée.

1.2.3. Les limites de la simulation

Les outils de simulation, s'ils permettent une modélisation aisée, présentent par contre des insuffisances notoires en ce qui concerne l'obtention de résultats pertinents ainsi que leur exploitation [Cernault 88]. On constate en général que l'on tire relativement peu de connaissances de toutes les informations qui nous sont

fournies à l'issue des simulations. Plusieurs problèmes se posent :

- comment obtenir des données pertinentes, c'est-à-dire porteuses d'informations ?
- comment exploiter "au mieux" ces données dans un but descriptif ? dans un but explicatif ?
- selon quelle stratégie conduire les jeux d'essais ?

C'est à ces deux questions que le travail suivant a pour ambition d'apporter des éléments de réponse, en s'appuyant essentiellement sur des techniques d'analyse de données.

1.3. PLAN DE LA THESE

Dans une première partie, nous présentons le domaine d'application de notre travail : les systèmes de production automatisés et notamment le problème de leur conception. Nous évoquons les diverses méthodes qui permettent de les appréhender ; la simulation et sa mise en oeuvre sont davantage détaillées.

Dans une deuxième partie, nous montrons l'application de la simulation à un exemple particulier d'atelier, MACSI, dont un modèle de fonctionnement détaillé est élaboré. L'obtention de données pertinentes se jouant dès la phase des plans d'expériences, nous expliquons la démarche qui a guidé la construction de nos campagnes de simulations. Les expériences doivent être construites de façon à fournir le plus d'information possible.

La troisième partie concerne les questions d'exploitation des résultats proprement dites. La méthode que nous proposons procède en trois points :

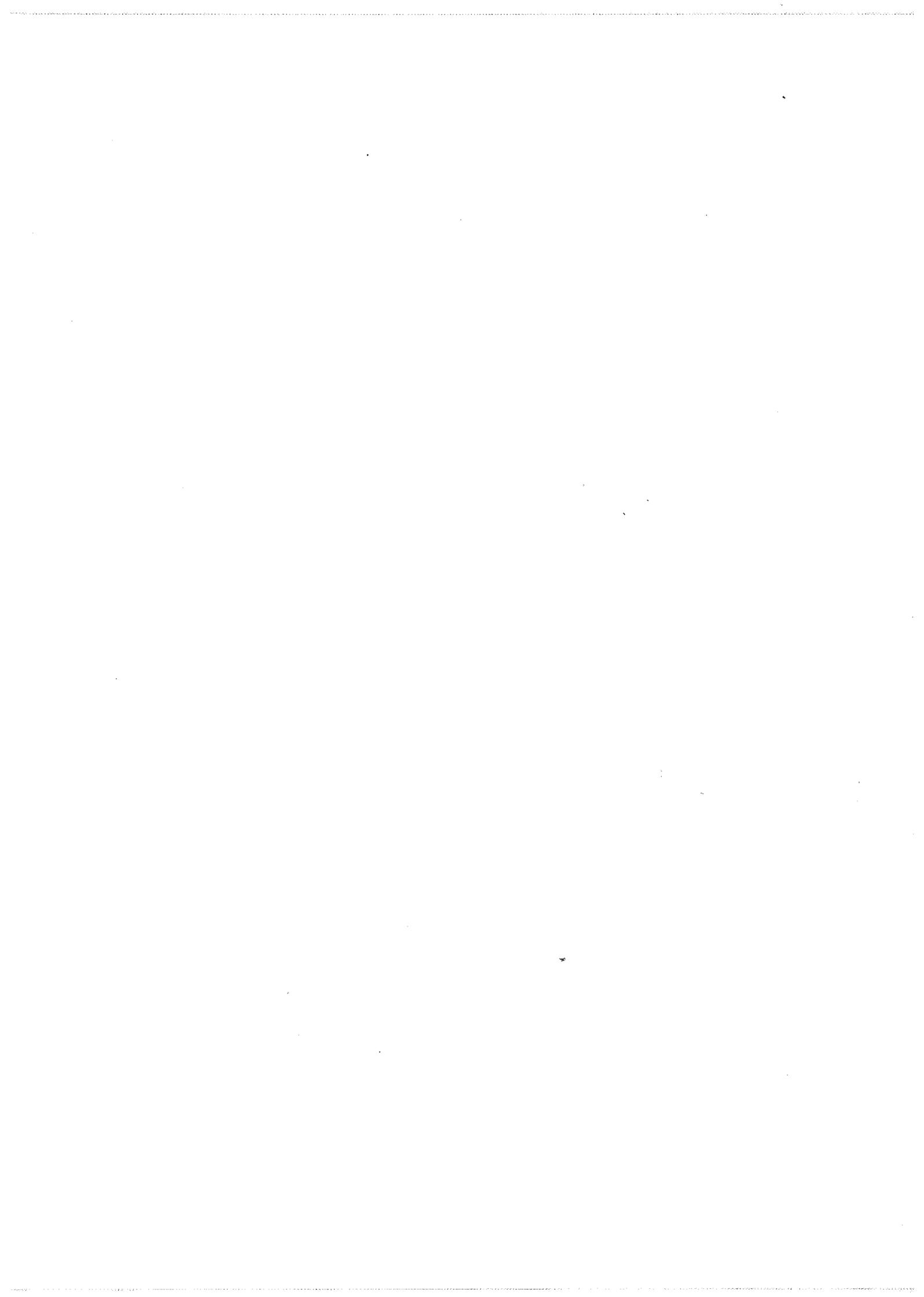
- une préparation des campagnes de simulation, qui comprend la définition du cadre de simulation et la recherche d'indicateurs représentatifs du système, à l'aide d'un processus d'"affinage", c'est-à-dire d'une sélection fine, des entrées du système d'une part, des variables observées d'autre part. Ce premier point s'appuie essentiellement sur l'Analyse en Composantes Principales.

- une description synthétique des expériences : il s'agit de décrire les comportements observés et d'élaborer un nouveau modèle du système, représenté cette fois-ci par des relations entre ses entrées et ses sorties et non plus par ses mécanismes de fonctionnement. L'analyse de données et plus particulièrement l'Analyse en Composantes Principales, constitue là encore un outil appréciable pour aborder cette phase.

- une structuration de l'ensemble des expériences par des techniques de Classification Automatique, afin de repérer les principaux profils à dégager. Nous cherchons à constituer, de façon systématique, et non par recueil d'expertise humaine, une "base de connaissance", ou "modèle comportemental" [Lhoste 88] du système de production. Il faut donc, pour cela, engendrer une connaissance supplémentaire, consistant en la généralisation des expériences, considérées comme autant d'exemples, en règles de comportement du système. En ce qui concerne ce travail, seule l'Analyse de Données a été utilisée, mais les techniques d'Apprentissage Automatique en semblent assez proches dans l'esprit.

L'originalité de la démarche tient dans le fait que nous supposons ne rien connaître du fonctionnement du système, notre ambition étant de montrer qu'il est possible d'en découvrir les principes à l'aide de l'expérience artificielle des simulations et de techniques numériques. Nous cherchons pour cela à bâtir une méthode assez générale d'extraction de connaissances à partir de simulations.

En ce sens, nous nous intéressons davantage au problème de l'apprentissage de connaissances sur le comportement de systèmes complexes qu'à l'aspect purement "production", les systèmes de production constituant pour nous un champ d'expérience intéressant dans la mesure où ils ne sont pas mathématiquement modélisables de façon simple.



2. PREMIERE PARTIE :

INTRODUCTION AU DOMAINE ET AUX OUTILS

Le domaine est celui des **systèmes de production**. Nous en donnons une classification sommaire afin de situer plus précisément notre domaine d'étude à l'intérieur de ce champ.

Le problème qui nous concerne plus particulièrement est celui de la **conception** des systèmes de production, et notamment des sous-systèmes de stockage et de manutention.

L'aide à la conception s'appuiera sur la **simulation** ainsi que sur les outils ou méthodes qui y sont liés. Nous présentons dans cette partie les différentes phases du processus de simulation.



2.1. LES SYSTEMES DE PRODUCTION

On entend par Système de Production un ensemble de ressources (équipements, hommes, matières, informations) dont la transformation conduit à la création de biens ou de services [Giard 88]. On peut dresser une typologie de ces systèmes à partir du mode d'organisation de la production.

On distinguera d'abord

- d'une part les industries de "process", qui traitent des flux continus de matière (c'est le cas de la sidérurgie, de la chimie, de la pétrochimie...),
- d'autre part les industries à flux de produits discontinus (ce sont les systèmes de production de type manufacturier).

Dans cette dernière catégorie, on peut encore effectuer une classification entre :

- les systèmes de production organisés en ligne de fabrication : un flux régulier de produits passe sur une succession de postes, toujours dans le même ordre. Cette structure très rigide est réservée à la production de masse,
- les systèmes de production organisés en ateliers spécialisés : les moyens de production sont alors organisés en îlots de production, dédiés à la fabrication d'une famille de produits. Les aspects "manutention" et "transport" sont très importants dans ce type d'organisation. Ces ateliers concernent une production diversifiée de produits finis ou de composants.

2.1.1. Le domaine d'étude et la problématique

A l'intérieur du champ de la production décrit ci-dessus, nous nous intéressons aux systèmes de **production manufacturière à forte composante transitive** [Woiret 88], c'est-à-dire avec une fonction de transport automatisé développée.

Il nous semble essentiel, aujourd'hui, de travailler sur l'aspect transitique des systèmes. En effet, les fonctions "manutention" et "stockage" constituent actuellement une réserve de productivité bien plus grande que la fonction "fabrication". Il est désormais bien connu que, dans les systèmes de production flexibles, à peine plus de **5% du temps** de passage des produits dans l'atelier est consacré à la **fabrication** au sens strict, les **95%** restant se répartissant entre **l'attente et le transport**. C'est donc en travaillant sur ce dernier aspect que l'on peut espérer gagner le plus. En outre, la fonction "fabrication" a été déjà beaucoup "optimisée" et automatisée et il paraît difficile de pouvoir gagner encore beaucoup ; par contre, jusqu'à présent, on s'est nettement moins préoccupé de la manutention.

2.1.1.1. Hypothèses de modélisation

Notre domaine concerne les **systèmes de production discrets**, par opposition aux systèmes continus. Les paramètres évoluent par sauts successifs et non de façon continue ; l'état du système reste le même entre deux événements consécutifs (production manufacturière, en opposition aux procédés continus de la chimie, par exemple). Notons que le caractère "discret" ou "continu" ne dépend pas seulement de la nature du processus modélisé, mais également du niveau de détail auquel on s'intéresse (au niveau "gestion", les produits pourront être considérés comme des flux continus, alors qu'au niveau "ordonnancement", chaque pièce sera modélisée individuellement) [Cavaillé 88]. Quant à la **transitique**, elle peut être définie [Woiret 88] comme la science du convoyage, perçu comme un système à part entière et non comme une somme de matériels indépendants. Nous nous intéressons au convoyage effectué à l'aide de chariots filoguidés (CFG). Les CFG sont des engins de transport assurant l'acheminement des pièces d'un poste à l'autre de l'atelier ou de l'usine. Ils se déplacent de façon automatique et autonome sur le réseau de transport de l'atelier. Le tracé du réseau est prédéfini et matérialisé par des fils souterrains. Les itinéraires des chariots ne sont pas fixés a priori et sont l'objet de stratégies de routage. Le pilotage élémentaire est assuré par un automate de commande. Le contrôle central des déplacements, s'il existe, est effectué par dialogue avec des plots spécialisés, situés sur le passage du chariot [Coiffet 88].

La production est de type atelier à tâches ou **job-shop**, c'est-à-dire que l'ordre de passage sur les machines des travaux à effectuer pour transformer la pièce brute en produit fini n'est pas le même pour tous les produits.

ex :

une pièce	p1	colonne 2	colonne 3	colonne 4	colonne 5	colonne 6	M1, M2, M3, M2
"	p2	"	"	"	"	"	M3, M2, M3
"	p3	"	"	"	"	"	M1, M3, M2, M3

Les gammes mises en jeu correspondent à des **gammes-types**, représentatives d'une famille de gammes : les pièces, codées, classifiées, sont regroupées en familles par des méthodes de TGAO (technologie de groupe assistée par ordinateur). Des gammes-types peuvent être définies pour chaque famille. En conception préliminaire, on travaille donc avec des données agrégées.

Les **temps de transport** ne sont pas insignifiants au regard des temps opératoires (au moins équivalents).

Nous faisons l'hypothèse que **l'implantation des machines et le tracé du réseau de transport** sont prédéterminés ; les décisions ne sont donc pas de type structurel.

Le **programme de fabrication** est calculé pour un horizon très court (la journée). On entend par programme de fabrication un programme glissant, à court terme (au minimum la durée du cycle de fabrication), traduisant le plan directeur de production pour les articles fabriqués par l'entreprise elle-même, et prenant en compte les différentes contraintes d'approvisionnement et de réalisation. Etabli par article, il exprime, sur l'horizon retenu, les quantités à fabriquer entre les dates de début et les dates de fin de période [Baglin 83].

2.1.1.2. Modèles conceptuels des systèmes de production

Il est utile, afin de disposer de concepts généraux et unifiés [Pierreval 87b], de définir un cadre conceptuel de modélisation de systèmes de production.

Décomposition fonctionnelle
du système physique de production

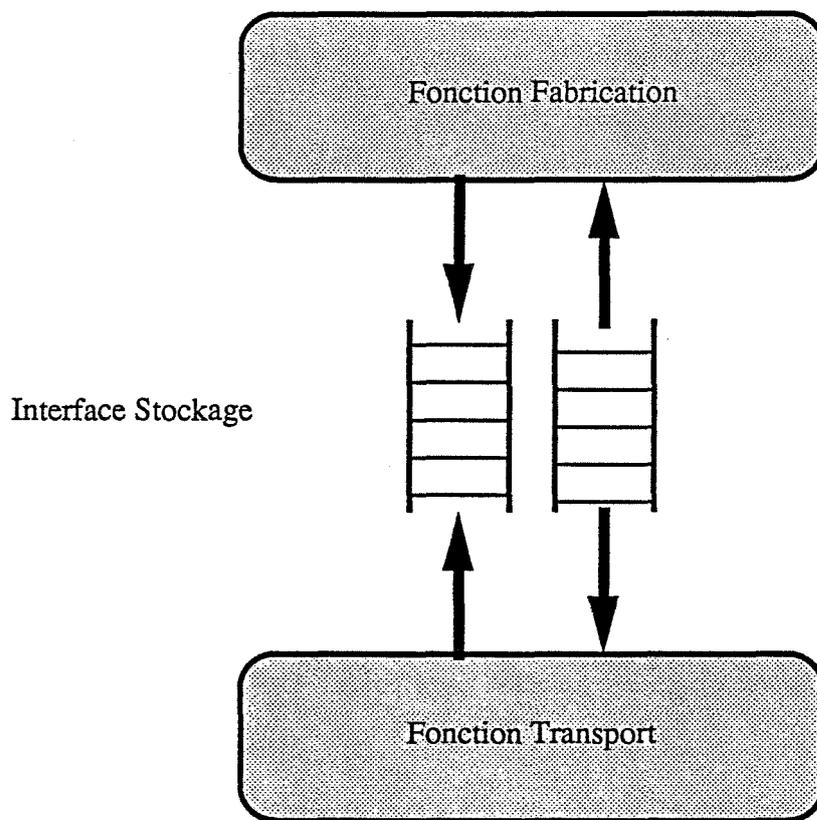


Figure 21.1

C'est l'objectif des **modèles conceptuels**. Ils décrivent, en termes abstraits, les différentes entités qui composent le système, ainsi que les relations qui les relient.

Pour notre part, nous utiliserons, de façon sous-jacente au long de l'étude, une vue du système de production structuré en 2 blocs fonctionnels coopérants (cf figure 21.1) :

- la fonction **fabrication** proprement dite,
- la fonction **transport**,

communiquant au moyen de l'interface des **stocks**. L'interface de stockage comprend l'ensemble des stocks amont et aval de l'atelier et représente le "tampon" d'accumulation entre les ressources de transformation et les ressources de manutention.

Chaque bloc peut alors lui-même être décomposé (cf figure 21.2) selon les 3 sous-systèmes désormais classiques du modèle GRAI [Doumeingts 84] :

- physique (les machines / les chariots et le réseau de transport),
- décisionnel (la gestion d'atelier, les règles de fonctionnement / le pilotage, la commande des chariots),
- informationnel (l'ensemble des données), commun aux deux sous-systèmes précédents.

2.1.2. Conception des systèmes de production automatisés

2.1.2.1. Les problèmes

La phase de **conception** d'un atelier doit envisager les multiples aspects du futur système pour assurer sa cohérence avec le reste de l'entreprise et tenir compte de l'**intégration des fonctions de la production** (gestion des pièces, des outils, des moyens de production, du programme de commande, de la nomenclature, des stocks, du carnet de commandes). Il faut aussi, et d'abord, assurer la cohérence des trois fonctions de base du système de production : fabrication, transport, stockage.

Modèle conceptuel GRAI

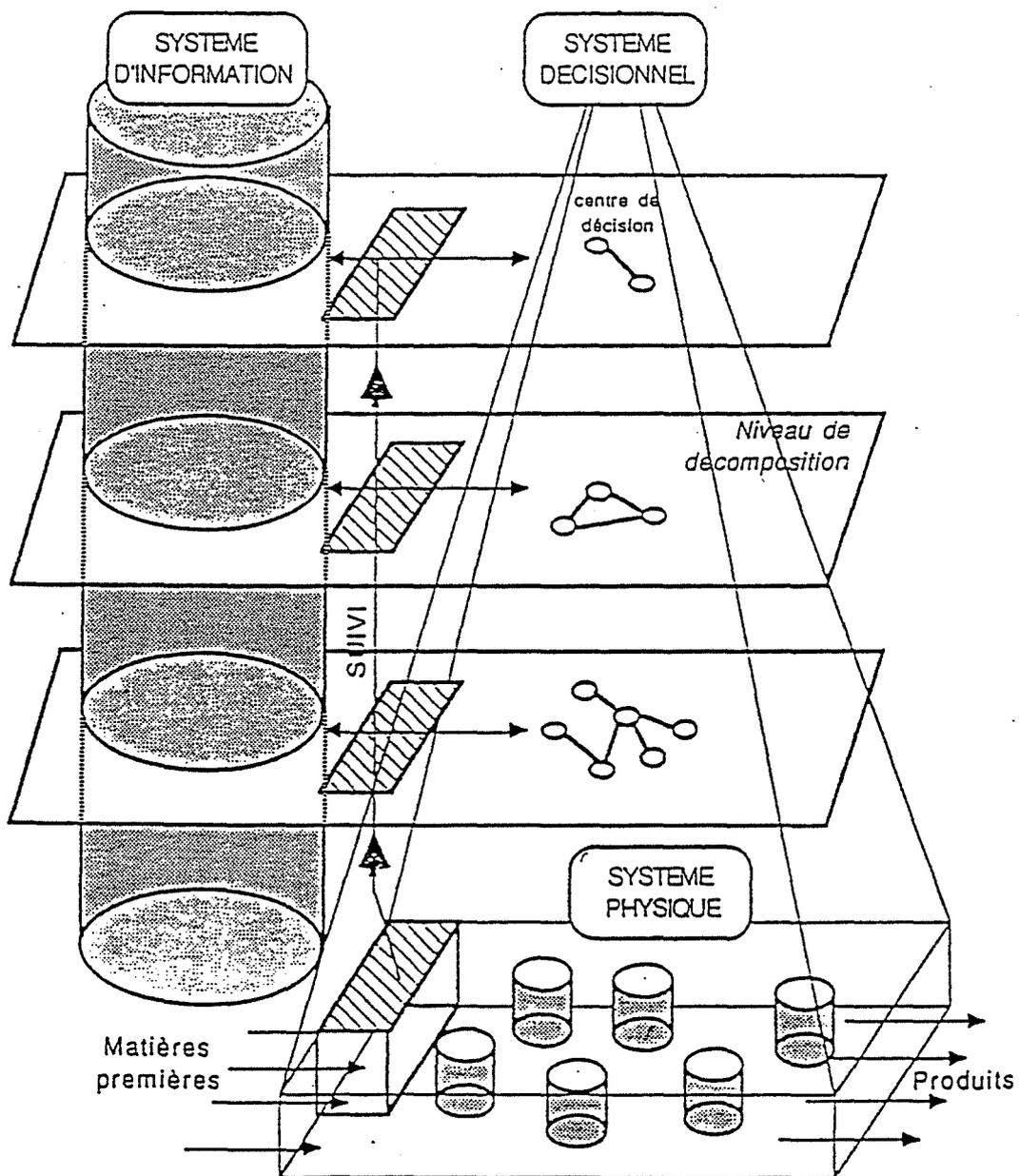


Figure 21.2

L'automatisation du transport des pièces pose plus particulièrement des difficultés de coordination et de synchronisation à l'ensemble du système ; la prise en compte de la dimension temporelle devient essentielle dans l'évaluation de la gestion et du fonctionnement de l'atelier ; les solutions fondées sur une représentation statique du système ne suffisent plus, il faut étudier la composante dynamique du système.

Il est d'autant plus important de bien réussir cette étape qu'une erreur de conception coûte très cher, dans la mesure où elle conditionne la totalité des phases ultérieures des choix étudiés et réalisés en aval.

Dans la mise en oeuvre de l'étude conceptuelle, deux niveaux sont généralement distingués [Cavaillé 88], la conception préliminaire et la conception détaillée :

- la conception préliminaire a pour objectif de mener une analyse fonctionnelle du système. Il s'agit de
 - structurer le système : décomposition ;
 - définir les éléments : place, rôle ;
 - caractériser le système global : critères de performance et schémas de comportement.
- la conception détaillée est la mise en oeuvre de l'étape précédente. Elle aboutit aux spécifications du système de fabrication et du système de commande.

Nous traitons ici de la conception préliminaire, et notamment du dimensionnement conjoint des fonctions transport et fabrication, définies plus haut. "Le problème primordial au niveau des coûts est celui du dimensionnement des installations (nombre de machines, volume des stocks, capacité du système de transport)" [Alanche 83].

Compte tenu des hypothèses que nous avons posées au départ, on sait que l'implantation et le nombre des machines ne sont pas susceptibles de remise en cause, pas plus que le tracé du réseau de CFG. Par contre, les décisions n'ont pas encore été prises en ce qui concerne les autres composantes du système :

- dimensionnement du parc-chariot,
- dimensionnement en capacités de stockage,
- gestion des équipements,

- taille des lots,
- charge de l'atelier,
- équilibrage des gammes, etc...

Aider à la conception, c'est apporter une réponse à des questions du type :

- "Combien de cfg et quelle capacité de stockage et quelle taille de lots faut-il choisir pour obtenir de bonnes performances sur les en-cours ? ou bien sur les durées de passage des pièces dans l'atelier ?"
- "Quelle capacité de stockage et quelle taille de lots et quelle taille de palettes faut-il choisir pour obtenir les performances les moins mauvaises sur les en-cours et les durées de passage et l'engagement des équipements ?"

Nous avons déjà montré, lors d'une étude de conception de système de transport, qu'il était indispensable de mesurer les effets conjoints et du nombre de cfg et de leur routage, sur les performances du système [Héritier 88]. Or on ne connaît pas, a priori, le comportement du système global sous l'influence des choix effectués sur ces différents points. Notre préoccupation est précisément de combler ce manque de connaissances.

2.1.2.2. L'évaluation du système futur

Il s'agit de comparer diverses stratégies de production : une mesure de performance, par rapport à des objectifs, doit donc être définie.

2.1.2.2.1. Les objectifs

De façon idéale, les systèmes de production cherchent à réaliser les sous-objectifs suivants [Woiret 88],

[Proth 86], [Pierreval 87b], l'objectif final étant de produire au moindre coût :

- minimiser les en-cours et les stocks intermédiaires ;
- minimiser les temps de passage dans l'atelier ;
- maximiser l'engagement des moyens de production (fabrication et transport).

Or ces objectifs sont parfois antagonistes et plutôt partiels (ils ne concernent qu'une partie du système).

2.1.2.2.2. Un compromis à trouver

La figure 21.3 illustre les rapports conflictuels entre les objectifs de production. En effet, si les stocks intermédiaires diminuent, les machines auront plus de risques de se trouver en famine, d'où une dégradation du taux d'engagement. Avec un engagement maximal, il y aura plus de pièces dans le système ; l'en-cours augmentera ainsi que le risque d'allonger les délais par engorgement du réseau de transport et des machines.

Le système de transport joue par ailleurs un rôle clé : on cherche généralement à **réduire les stocks et en-cours**, il faut donc que le **système de transport** ait une capacité suffisante pour assurer la bonne circulation des produits, sinon des accumulations vont se créer. De même, **l'engagement des machines** ne peut être maximal que si elles sont bien approvisionnées et qu'elles ne sont pas bloquées par un engorgement de leur stock aval, d'où l'importance du **système de transport** et de la fluidité du trafic pour l'évacuation des machines.

Inversement, en voulant augmenter **l'engagement du système de transport** (en augmentant les flux de transport ou bien en diminuant le nombre de chariots, par exemple), dans l'optique d'amortir les investissements, on risque d'accroître inutilement **l'en-cours** global (en introduisant dans l'atelier des pièces que le système de fabrication ne peut pas traiter tout de suite), ou bien d'allonger **les temps d'attente** des pièces dans les stocks aval (en diminuant le nombre des chariots pour accroître leur taux d'occupation moyen), ou encore de diminuer l'engagement des ressources de production.

Triangle d'évaluation des performances

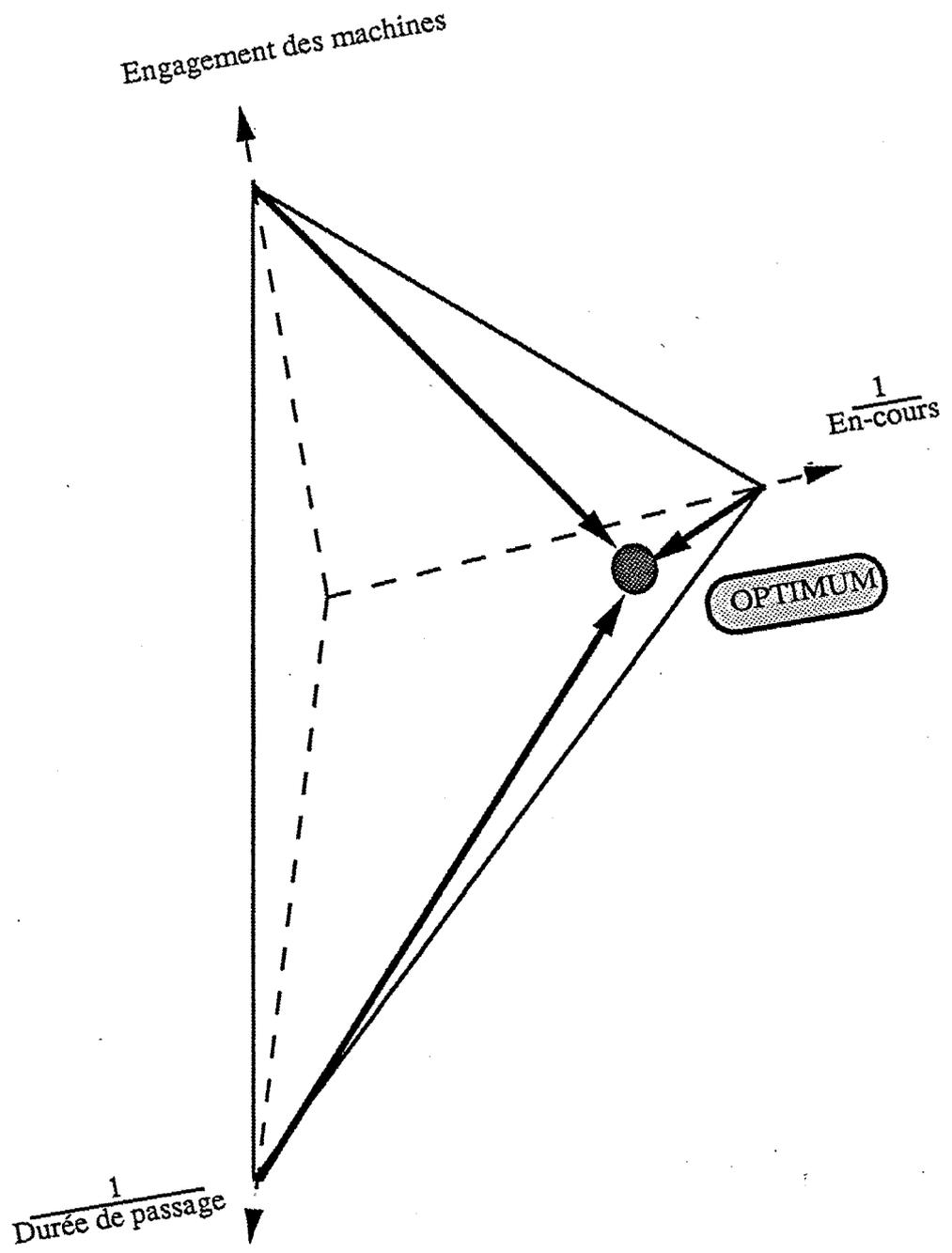


Figure 21.3

Il s'agit, une fois de plus, de trouver un **compromis** satisfaisant au regard des trois groupes de critères : en-cours, durées, engagement des équipements, qui constituent l'espace des performances [Mathon 90].

Arrêtons-nous là et interrogeons-nous sur la notion de **performance** d'un système de production. Qu'entend-t-on par ce terme et comment la mesurer ?

2.1.2.3. La notion de performance

La mesure d'une performance est indispensable pour comparer entre eux plusieurs ateliers expérimentaux. Habituellement on choisit un critère, que l'on estime le plus adéquat pour évaluer le système, puis on recherche LA solution qui optimise ce critère.

Cette méthode n'est cependant satisfaisante ni sur le plan du choix d'un critère unique en tant que mesure de performance ni sur celui de la notion d'optimisation.

Il existe effectivement des heuristiques pour satisfaire **isolément**, les critères d'en-cours, délais, retard, etc... [Mathon 85] ; on obtient des solutions critère par critère. Le choix du critère dépend de l'utilisateur, ce qui n'est pas choquant. En revanche, en négligeant les interactions entre critères, on occulte le fait que l'amélioration de l'un d'eux se réalise peut-être au détriment d'autres critères potentiels. Nous avons vu que les critères entretenaient entre eux des rapports conflictuels selon le modèle du "triangle de la performance".

L'utilisateur attend des réponses de la forme :

- "Pour avoir un compromis [durées de cycle / niveau d'en-cours / production réalisée] satisfaisant (aux yeux de l'utilisateur), il faut opter pour 3 chariots, une vitesse de 30 ou 60 m/min, etc..."

ou bien

- "Eviter absolument les configurations qui combinent telle et telle caractéristiques car elles conduisent à des performances globalement catastrophiques, ou bien catastrophiques en ce qui concerne le niveau maximal atteint par les en-cours", etc...

Ces réponses sont beaucoup plus utiles au gestionnaire du système qu'une solution unique, optimale certes, mais peut-être irréalisable techniquement ou trop coûteuse. En outre, la solution n'est vraiment "optimale" que si tous les critères de choix ont été pris en compte.

Qu'advient-il alors si l'outil ne donne que cette solution et qu'un critère supplémentaire s'impose ou bien que la solution proposée est trouvée trop onéreuse ? Et si, en cours de fonctionnement, le contexte initial, à partir duquel a été élaborée LA solution est un tant soit peu modifié ?... Alors, tout est à refaire, et qui nous dit que cette deuxième solution optimale sera proche, du point de vue de sa mise en oeuvre, de la première ? En effet, les performances ne varient pas de façon continue, il n'est donc absolument pas certain que les solutions les meilleures se trouvent au voisinage de l'optimum. Le passage d'une solution à l'autre risque d'entraîner des coûts importants... Le couple formé par ces deux solutions, isolément optimales, ne constitue pas forcément un optimum.

Ne serait-il pas mieux d'avoir, dès le départ, une vision globale de l'espace des solutions envisageables, de leur degré d'optimalité certes, mais aussi de leur proximité "technologique" ou "organisationnelle" ? C'est ce que nous avons pour ambition de fournir à l'utilisateur. Il nous paraît plus judicieux de mettre en évidence, plutôt qu'une solution optimale mais isolée, un (ou plusieurs) groupe(s) de solutions qui satisfassent un ensemble de critères, étant entendu que chacun ne sera peut-être pas optimal.

Performance = { ensemble de critères d'évaluation }

C'est cet ensemble tout entier qui constitue la performance à mesurer. L'avantage recherché est l'obtention de solutions "stables" (c'est-à-dire pas trop affectées par de petites variations du contexte) : un (ou plusieurs)

domaine(s) de "bon fonctionnement" en quelque sorte (cf figure 21.4). Dans la mesure où les systèmes de production se doivent d'être flexibles, la propriété de stabilité des résultats apparaît primordiale.

2.1.2.4. Conception conjointe du système de transport et de l'interface de stockage

Nous limitons volontairement notre champ d'investigation au problème de la conception, conjointe, du système de transport et de l'interface de stockage, en accord avec un système de fabrication imposé. La conception du système de fabrication proprement dit n'est pas abordée. Cela se traduit par l'absence de tout degré de liberté sur le système de fabrication, ainsi que nous l'avons vu plus haut.

Les enjeux de cette conception sont les suivants : si l'interface de stockage est trop faiblement dimensionnée au regard du transport, celui-ci ne pourra être utilisé à plein rendement ; l'atelier risque d'être engorgé de chariots ne pouvant pas déposer leur charge, tous les stocks étant pleins. Inversement, si le réseau de transport est sous-dimensionné, alors l'évacuation des machines sera plus lente, les stocks aval vont se remplir jusqu'à risquer de bloquer le système de fabrication.

Les interactions entre ces deux sous-systèmes étant particulièrement fortes, il est essentiel de parvenir à une bonne adéquation de leurs dimensionnements respectifs.

Les choix de conception effectués, la mise en place d'un atelier flexible peut s'étaler, par paliers successifs, sur plusieurs années. A titre illustratif, une étude d'Ingersoll Engineers, réalisée en 1982, [Ingersoll 83], comptait environ cinq ans entre le début des études et le fonctionnement effectif de l'atelier, les principales difficultés provenant d'une mauvaise analyse des besoins.

Citons quelques réalisations d'ateliers flexibles, avec fonction de transport automatisée :

- Citroën (81), à Meudon - Automobile - 3 centres d'usinage, 4 autres postes, chariots filoguidés pour le transport des pièces et des outils.
- Caterpillar (84), à Grenoble - matériel de travaux publics - 5 centres d'usinage, chariots filoguidés.

- RVI (82), à Bouthéon - Automobile - 7 postes d'usinage, chariots filoguidés.
- Ford (83), à Bordeaux - Automobile - 7 postes, convoyeur.
- Volkswagen (79), en RFA - Automobile - 7 postes d'usinage, convoyeur.
- Toshiba (80), au Japon - Machines-outils - 5 postes, lignes automatiques de manutention.

2.1.3. Les méthodes

Il existe deux grandes catégories d'approches pour la modélisation des systèmes de production [Bel 85], [Cavaillé 88], [Cernault 88] :

- les méthodes analytiques,
- la simulation.

2.1.3.1. Les méthodes analytiques

Elles s'appuient sur des modèles mathématiques du système, c'est-à-dire que l'on peut établir une relation entre un couple (état initial, commande) et des critères à observer. La relation peut être une fonction, un système d'équations différentielles, linéaires,... Les résultats fournis sont calculables par algorithmes et ne nécessitent pas le déroulement du temps. On distingue d'une part des méthodes de "résolution de problèmes", qui donnent une solution optimale, telles que :

- la programmation dynamique,
- la méthode PERT, pour des problèmes d'ordonnancement, de gestion de projets,
- la programmation linéaire, lorsqu'il s'agit d'optimiser une fonction linéaire sous contraintes.

D'autre part, il existe des méthodes d'"évaluation", dont l'objectif n'est pas la recherche d'un optimum mais l'observation de performances. Dans cette catégorie se rangent :

- les graphes d'états, les chaînes de Markov :

On représente tous les états possibles, avec les probabilités de changement d'état. Ces modèles sont essentiellement utilisés pour les problèmes de fiabilité ou encore pour les lignes de production. Ils ne sont pas toujours faciles à renseigner (on ne peut modéliser que le régime permanent), et rapidement lourds à manipuler (mal adaptés aux problèmes de taille élevée),

- les réseaux stochastiques de files d'attente [Gelenbe 82] :

Les modèles sont élaborés à partir de résultats sur le caractère stochastique des phénomènes. Les paramètres sont exprimés sous la forme de lois statistiques. Les machines, le système de transport sont représentés par les guichets, les pièces par les clients. Il faut connaître, pour chaque guichet, la loi d'arrivée, la loi de service, le nombre de serveurs, la capacité de la file d'attente, son mode de gestion ainsi que les lois de routage (probabilistes ou déterministes) entre les files. Cette méthode donne des valeurs moyennes. Elle convient bien à l'étude des régimes permanents car elle modélise l'état d'équilibre du système, mais elle est mal adaptée au régime transitoire [Bel 85].

La théorie stochastique nécessite, en outre, des hypothèses fortes de modélisation, qui limitent le champ d'application de ces modèles : durées de service exponentielles, pas de pannes, pas de blocages ni de collisions dans le système de transport.

- l'analyse opérationnelle des réseaux de files d'attente [Dallery 84] :

On travaille sur des fréquences observées et non sur les lois de probabilité théoriques. Les hypothèses sont moins restrictives que celles de l'analyse stochastique. En outre, on peut traiter les cas déterministes, pour des installations simples ou agrégées.

Conclusion : les méthodes analytiques donnent par le calcul les résultats recherchés, sans que le déroulement temporel du processus soit représenté. Ces méthodes sont intéressantes

pour évaluer rapidement des orientations générales, basées sur un "niveau agrégé" de représentation du système.

Mais l'utilisation de tels outils mathématiques exige, en général, des hypothèses simplificatrices importantes (arrivées poissonniennes, durées exponentielles, non prise en compte des conflits, hypothèses de comportement markovien,...). En outre, la plupart de ces méthodes n'autorisent que la représentation du régime permanent du système. Or avec la production en petites séries, on travaille sur des horizons très courts, et pratiquement toujours en régime transitoire. Les modèles analytiques sont trop agrégés pour être utilisés à un stade avancé de la conception, même préliminaire.

2.1.3.2. La simulation

La simulation consiste à reproduire le comportement dynamique d'un processus ; elle inclut donc une dimension temporelle. La technique de simulation peut s'appuyer soit sur les réseaux de Petri, soit sur les files d'attente.

Les réseaux de Petri sont particulièrement utilisés pour la modélisation de phénomènes parallèles et synchronisés. Ils se présentent [Brams 83] sous la forme de graphes composés de places et de transitions sur lesquelles circulent des jetons.

Les modèles ainsi construits possèdent des propriétés mathématiques qui permettent de détecter d'éventuelles situations bloquantes du système, de calculer la borne du modèle (si elle existe) en termes de jetons, de vérifier l'accessibilité aux places. Par contre, les réseaux de Petri posent des difficultés pour la représentation de règles de décision (ordonnancement ou pilotage) fondées sur l'état du système.

Le simulateur SEDRIC, par exemple, a été développé sur cette base, de même que le simulateur ARCANTIEL, qui a fait l'objet d'un couplage avec un système-expert lors des travaux réalisés par B. Besombes pour inclure la fonction "décision" dans la simulation des systèmes de production par réseaux de Petri [Besombes 90].

Cependant les réseaux de Petri sont mal adaptés à la prise en compte de l'évolution dynamique du système ou à celle des phénomènes aléatoires (pannes).

C'est pourquoi nous nous tournerons vers d'autres méthodes de simulation à événements discrets, dérivées de la théorie des files d'attente et sur lesquelles nous reviendrons dans le chapitre suivant. La simulation événementielle permet une étude dynamique et détaillée du comportement du système ; elle peut, en particulier, prendre en compte conjointement des caractéristiques physiques et décisionnelles.

Les modèles pour la simulation peuvent être très représentatifs de la réalité. Ils offrent la possibilité d'observer le fonctionnement pas à pas du système. A la différence des modèles mathématiques, ils ont un caractère descriptif et non résolutif ; ils se contentent d'évaluer les propositions de l'utilisateur. Les apports de la simulation ne se limitent pas à la phase de conception de l'atelier ; ils peuvent également s'étendre à l'aide à la décision en exploitation du système et notamment à la fonction d'ordonnancement [Ammar 85a].

2.1.4. Un outil d'aide à la décision s'appuyant sur la simulation

En conclusion, la conception de systèmes de production est une opération difficile parce que les relations entre les composants sont trop fortes et trop complexes pour que l'on puisse savoir a priori comment se comportera le système global en fonction d'actions exercées sur l'un ou l'autre de ses composants (dimensionnement, gestion, ...). Notre ambition est de fournir au concepteur un outil lui permettant d'appréhender et de comprendre son système dans sa globalité. Pour cela, nous construirons, à partir de nombreux cas simulés sur ordinateur un modèle agrégé, ou encore "généralisé", des réactions antagonistes des critères du système en fonction d'un contexte et de contraintes de fabrication (que nous retrouverons par la suite sous le terme de "facteurs de simulation").

L'objectif est de construire un **modèle comportemental** de système de production capable de répondre à des problèmes généraux de conception d'atelier et pas seulement à un cas particulier. Nous entendons par "modèle

comportemental" une description des comportements du système au travers d'un langage mettant en relation :

- des facteurs d'entrée et des performances observées : les **règles de comportement** (ex : SI le niveau de charge est élevé ALORS l'en-cours est élevé),
- les performances entre elles : les **modes de fonctionnement** (ex : mode de fonctionnement n°1 = en-cours élevé + durées élevées + engagement-machines faible).

Il s'agit de **comprendre** le système et ses réactions, la question de l'optimisation étant secondaire. En ce sens, nous pensons que les simulateurs à événements discrets, parce qu'ils fournissent une information conséquente sur leur état en cours ou en fin de simulation, constituent un bon outil pour repérer les règles de comportement ou les modes de fonctionnement du système.

2.2. LA SIMULATION A EVENEMENTS DISCRETS

"This is precisely what simulation is : the representation of the dynamic behavior of the system by moving it from state to state in accordance with well-defined operating rules."

Cette définition de [Pritsker 86a] replace la simulation événementielle dans son cadre d'utilisation : l'étude des systèmes à états. Cela suppose que l'on puisse trouver un ensemble d'indicateurs représentatifs de l'état (ressources, stocks, ...).

La simulation est, en fait, l'animation d'un modèle, "implémenté" sur l'ordinateur ; tout système réel n'est, en effet, manipulable qu'au travers de modèles représentatifs. Or, chacun d'eux correspond à une vue particulière sur le système ; il n'y a donc pas unicité du modèle de simulation.

Par conséquent, l'étape de modélisation, préalable à la simulation proprement dite, ne doit pas être négligée ; elle implique des choix de représentation de la part du modélisateur. Il faut toujours poser la question "modéliser pourquoi ?" autant que "modéliser quoi ?".

remarque : dans la suite de l'exposé, nos exemples seront pris dans le domaine de la production bien que la simulation soit utilisée dans de nombreux autres domaines (réseaux informatiques ou électriques, systèmes d'exploitation, trafic, ...).

2.2.1. Les simulateurs à événements discrets

Nous présentons les principes généraux des langages et outils de simulation. On trouvera une étude plus poussée dans [Bel 85] ou [Alanche 84].

2.2.1.1. Principes de fonctionnement

Un **événement** est l'instant d'un changement d'état (ex : entrée d'une pièce en stock, fin d'usinage ...). Il se produit de manière ponctuelle, à des instants prévus ou calculables, appelés "dates d'événement".

On entend par **simulateurs** les logiciels qui fournissent au minimum :

- un mécanisme d'avancement du temps. Celui-ci se fait à pas constant dans les approches par activités (voir plus loin), sinon par gestion d'échéancier ou calendrier des événements. L'échéancier est une liste dans laquelle sont rangés tous les événements prévus, avec leurs dates d'occurrences. L'algorithme recherche l'événement le plus imminent, incrémente la date courante à celle de l'événement et traite ce dernier [Leroudier 77 & 80] ;
- des générateurs de nombres aléatoires et de distributions stochastiques ;
- un langage de simulation, constitué d'un ensemble de primitives de base pour la description statique et dynamique du système ;
- des procédures de stockage et de traitement statistique des variables.

Les langages de simulation ont en commun d'être fondés sur des théories logico-mathématiques (Petri, files d'attente, graphes, réseaux), qui s'appuient souvent sur un formalisme graphique.

2.2.1.2. Les modèles pour la simulation

Les modèles pour la simulation se décomposent en deux parties :

- une partie **statique**, qui correspond à la structure du système, c'est-à-dire ses données et son organisation fonctionnelle.

On repère, à ce niveau, les objets (machines, pièces, stocks, etc...), leurs attributs (n° de gamme, capacité, état, etc...) et leurs relations (topologie de l'atelier, par exemple).

- une partie **dynamique**, qui correspond aux lois d'évolution temporelle du système, c'est-à-dire les règles de fonctionnement des divers composants mis en évidence ci-dessus.

Les variables d'état peuvent évoluer soit de façon continue au cours du temps, selon un modèle différentiel par exemple, soit de façon discrète à des dates précises ; l'état du système reste alors inchangé entre deux événements. La modélisation des ateliers manufacturiers se situe dans ce dernier cas.

Les lois d'évolution appartiennent soit au registre des règles opératoires soit à celui des règles de conduite, de gestion, et selon le cas se rattachent plutôt au système physique ou plutôt au système de décision.

C'est l'activation de la partie dynamique qui va animer les éléments de la partie statique.

2.2.1.3. Les langages de simulation

On distingue, parmi les langages de simulation, les **langages généraux** et les **langages dédiés**. Ceux-ci sont conçus pour un domaine d'application particulier ; par exemple, l'usinage (MAP/1), le convoyage (SAME/AGVS), l'ordonnancement (PARSIFAL), les cellules flexibles (SIMULFLEX). Dans [Conesa 90], par exemple, sont présentées des applications de Simulflex à la conception et au dimensionnement d'une cellule flexible.

Les éléments de base d'un langage dédié sont très marqués sémantiquement (poste de montage, d'usinage, convoyeur, navette, etc) alors que le vocabulaire d'un langage général sera plus abstrait (file d'attente, ressource, etc), de façon à ne pas dépendre d'un domaine d'application. A la frontière de ces deux types de

langages ont été développés des macro-langages de simulation, composés de macro-primitives, orientés "Systèmes de Production" et fonctionnant comme un traducteur entre le langage de l'utilisateur et le langage général de simulation [Ammar 85b].

La description de la partie dynamique du modèle utilise des logiques de changement d'état différentes selon les langages :

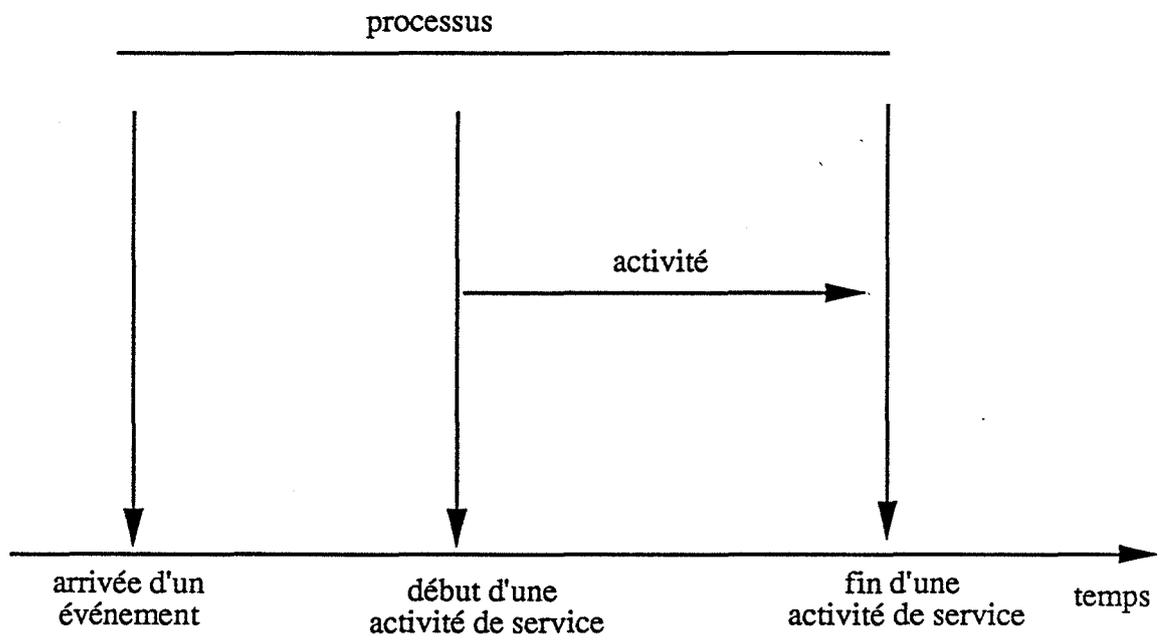
- **orientation activités (CAPS/ESL)** ; il s'agit de spécifier, pour chaque activité répertoriée, ses conditions d'activation et de fin ; cette méthode, à cause de la scrutation systématique de toutes les variables, est coûteuse en temps de calcul ; on la réserve aux cas où les durées d'activités ne sont pas connues.
- **orientation événements (GPSS, SIMSCRIPT)** ; l'utilisateur définit les événements (entrée en file, sortie de file, etc...) et les logiques de changement d'état correspondantes (algorithmes) ; l'état du système n'est scruté qu'aux dates où se produisent les événements ; ces langages sont moins utilisés car ils ont cédé la place à ceux de la catégorie suivante [Cavaillé 88] ;
- **orientation processus (QNAP2, SLAM, SIMAN)** ; un processus est comparable à une macro-primitive, une séquence prédéterminée d'événements ou d'activités (déplacement d'un objet dans une file, allocation de ressource, etc...) ; les processus facilitent la description de situations répétitives ; c'est actuellement l'approche la plus utilisée (cf figure 22.1).

2.2.1.4. Caractéristiques du langage choisi (SIMAN V3.21)

Notre choix s'est porté

- sur un langage de simulation général. En effet, les langages dédiés offrent, certes, l'avantage d'un apprentissage rapide et d'une bonne convivialité, mais leur capacité de modélisation est limitée au contenu de leur bibliothèque d'éléments de base. Les langages généraux, de par leur abstraction, autorisent plus de souplesse et de variété dans la modélisation ;
- sur une description "orientée processus" de la partie dynamique. En fait, la programmation par événements tend à disparaître au profit de l'approche processus.

Relations entre les événements, les activités et les processus



d'après (Pritsker 86)

Figure 22.1

Il ne nous restait plus qu'à trancher entre quelques simulateurs (parmi les plus reconnus) : QNAP2, SIMAN et SLAM [Simulog 83], [Pegden 86a], [Pritsker 86a]. Nous avons choisi de nous appuyer sur le plus connu et le plus répandu actuellement, SIMAN, enrichi par ailleurs d'un outil de suivi d'exécution du programme de simulation ("debugger") et d'un post-processeur de traitement des résultats. Cependant, QNAP2 autant que SLAM aurait tout-à-fait été capable de simuler l'atelier que nous avons choisi d'étudier et de relever des observations de même nature et de même qualité.

2.2.2. Les étapes du processus de simulation

Nous nous sommes inspirés du formalisme de la méthode SADT [Softech Inc. 81] pour la représentation du processus car ses diagrammes sont d'une compréhension aisée ; ils sont utilisés à titre d'illustration et n'ont pas la prétention d'intégrer toute la rigueur inhérente à la démarche SADT.

2.2.2.1. La démarche d'ensemble

On distingue classiquement plusieurs étapes dans la démarche de simulation.

Nous proposons (cf figure 22.2) une démarche en quatre phases [Duffau 84] :

- analyse du problème et collecte des données ;
- modélisation, programmation, vérification, validation ;
- définition des expériences, exécution du modèle ;
- exploitation des résultats.

Précisons que l'ensemble de ces étapes ne se déroule pas selon un processus strictement séquentiel. La démarche est au contraire de caractère très itératif.

Les étapes d'une simulation

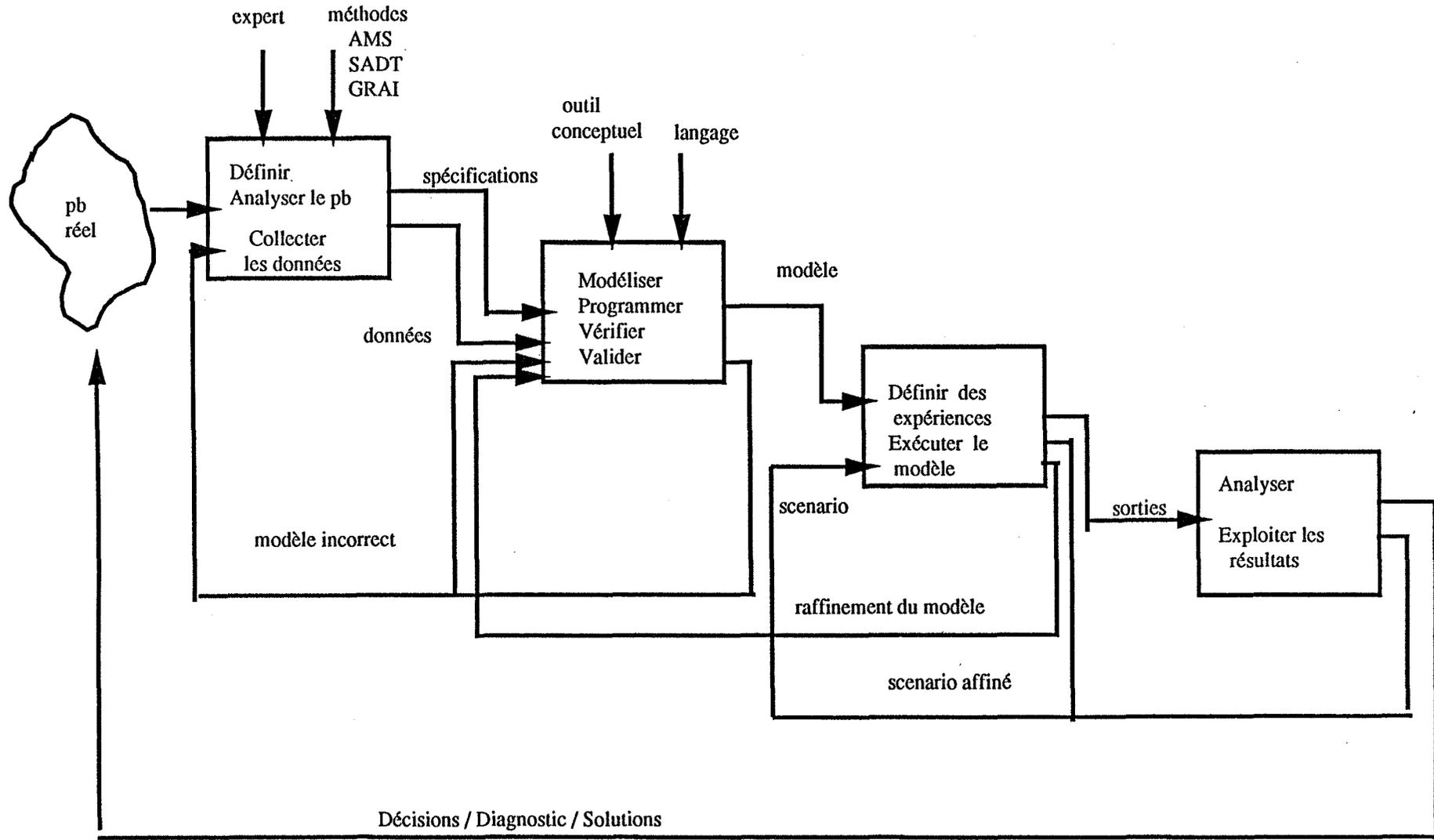


Figure 22.2

Remarque :

La validation a été mentionnée explicitement et non sous-entendue, dans la deuxième phase, car elle nous semble trop souvent négligée au regard de la programmation. Chaque phase comporte, bien sûr, une obligation de validation que nous n'avons pas forcément détaillée ; en revanche, la validation consécutive à la modélisation/programmation fait appel à des techniques statistiques qui valent la peine d'être développées, dans la mesure où elles ne sont pas toujours bien connues ou comprises des utilisateurs de la simulation.

L'accent est également porté sur la façon d'utiliser le modèle et d'exploiter les résultats fournis. Les phases post-modélisation sont encore trop peu, ou mal abordées, par les analystes, faute de méthodes et d'outils pour le traitement des observations. Elles méritent pourtant d'autant plus d'intérêt qu'elles débouchent sur l'émission de conclusions, ce qui confère à la simulation son titre d'outil d'aide à la décision.

2.2.2.2. Analyse du problème et collecte des données

La première étape demande la collaboration étroite des "pilotes" du système à concevoir et à gérer, confrontés au problème concret, et des analystes qui se voient confier l'étude.

Le problème réel, souvent pas très bien formalisé, est traduit dans un langage symbolique manipulable par les analystes. On définit les objectifs de l'étude ainsi que ses limites. Le contexte est fixé, les frontières du système sont délimitées, le niveau de détail est précisé ainsi que les données nécessaires (cf figure 22.3).

Cette étape est donc descriptive, mais aussi structurante, dans la mesure où sont modélisés les liens entre les éléments mis en jeu.

Certains dysfonctionnements du système existant (mauvaise organisation des tâches, informations absentes, floues, inaccessibles ou imprécises) sont souvent mis en lumière lors de cette étape.

L'analyse du problème

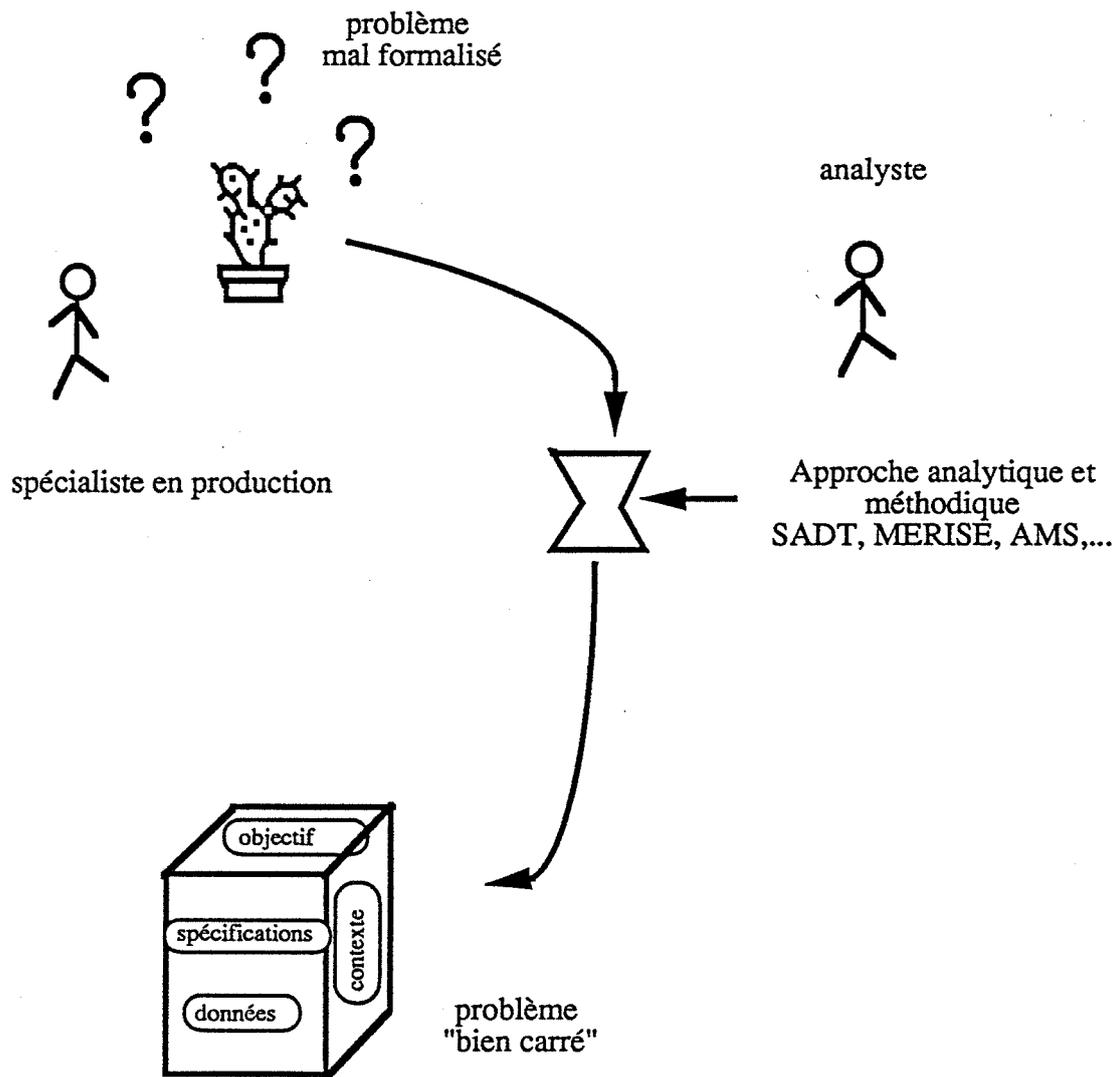


Figure 22.3

D'autre part, l'ensemble des flux d'informations, c'est-à-dire l'ensemble des données nécessaires au modèle, est répertorié (données techniques, temps opératoires, prévisions de demande, taux de panne des machines...). On procède alors à leur collecte, sur documents, par entretiens ou encore par saisie directe, sur le terrain (pour les durées, notamment) mais cette dernière éventualité est coûteuse en temps.

Les données issues de mesures ne sont cependant pas exploitables sous leur forme brute ; on en cherche une représentation stochastique, si cela est possible. Il s'agit alors d'ajuster les données collectées par une distribution de probabilité théorique. C'est une procédure qui demande une certaine rigueur et expérience dans le domaine, qualités qui sont parfois mises en défaut dans la pratique de la simulation. Il existe encore peu d'assistance à l'utilisateur dans ce domaine. Citons quand même WATSON², logiciel graphique et interactif, qui propose des tests d'indépendance, d'uniformité et d'adéquation pour l'ajustement des données à des distributions théoriques [Pierreval 87a].

Cette première phase est un processus d'extraction, par l'analyste, de la connaissance du spécialiste en production.

Des difficultés de compréhension et de communication se posent souvent, d'où l'importance de fournir aux interlocuteurs un langage commun. En outre, on procédera à une validation de l'analyse par l'ensemble des participants afin de se garantir l'accord de tous pour les étapes suivantes.

De la bonne réalisation de cette procédure (analyse du problème et préparation des données), située en amont de la simulation proprement dite, va dépendre la représentativité des résultats obtenus.

² Développé par le Laboratoire d'Informatique et de Modélisation des Systèmes de Production de l'Université Claude Bernard à Lyon I.

2.2.2.3. Elaboration d'un modèle.

Le processus d'élaboration est détaillé dans la figure 22.4.

2.2.2.3.1. Modélisation - Programmation

En fonction des conclusions tirées de la phase précédente, on choisit ici de poursuivre l'étude à l'aide de méthodes analytiques ou bien de faire des simulations. Nous nous plaçons, bien sûr, dans le cas où la simulation a été préférée.

Cette seconde étape débute par la traduction du modèle issu de l'analyse en un modèle pour la simulation. On adopte maintenant le formalisme de description du langage de simulation. Cette phase est donc en partie dépendante du simulateur utilisé. Ainsi, le modèle pour la simulation se présentera, sur le papier, sous forme de blocs, de flux... ou bien encore de réseaux de processus, de noeuds. On passe d'une représentation statique à une représentation dynamique, avec l'introduction de la variable "temps", gérée par le simulateur.

La traduction, ainsi que nous l'avons dit plus haut, est à la charge du modélisateur (pas de translation automatique).

La programmation effectuée, on vérifie le fonctionnement du programme, puis on procède à la validation du modèle, qui conclut cette seconde étape et autorise le passage à la troisième.

2.2.2.3.2. Vérification

Par vérification on entend la procédure qui permet d'obtenir un programme conforme au modèle. Les fonctionnalités qu'offrent les logiciels pour la mise au point des programmes sont les suivantes :

- une vérification syntaxique "classique", assurée par le compilateur du langage.

Etape modélisation

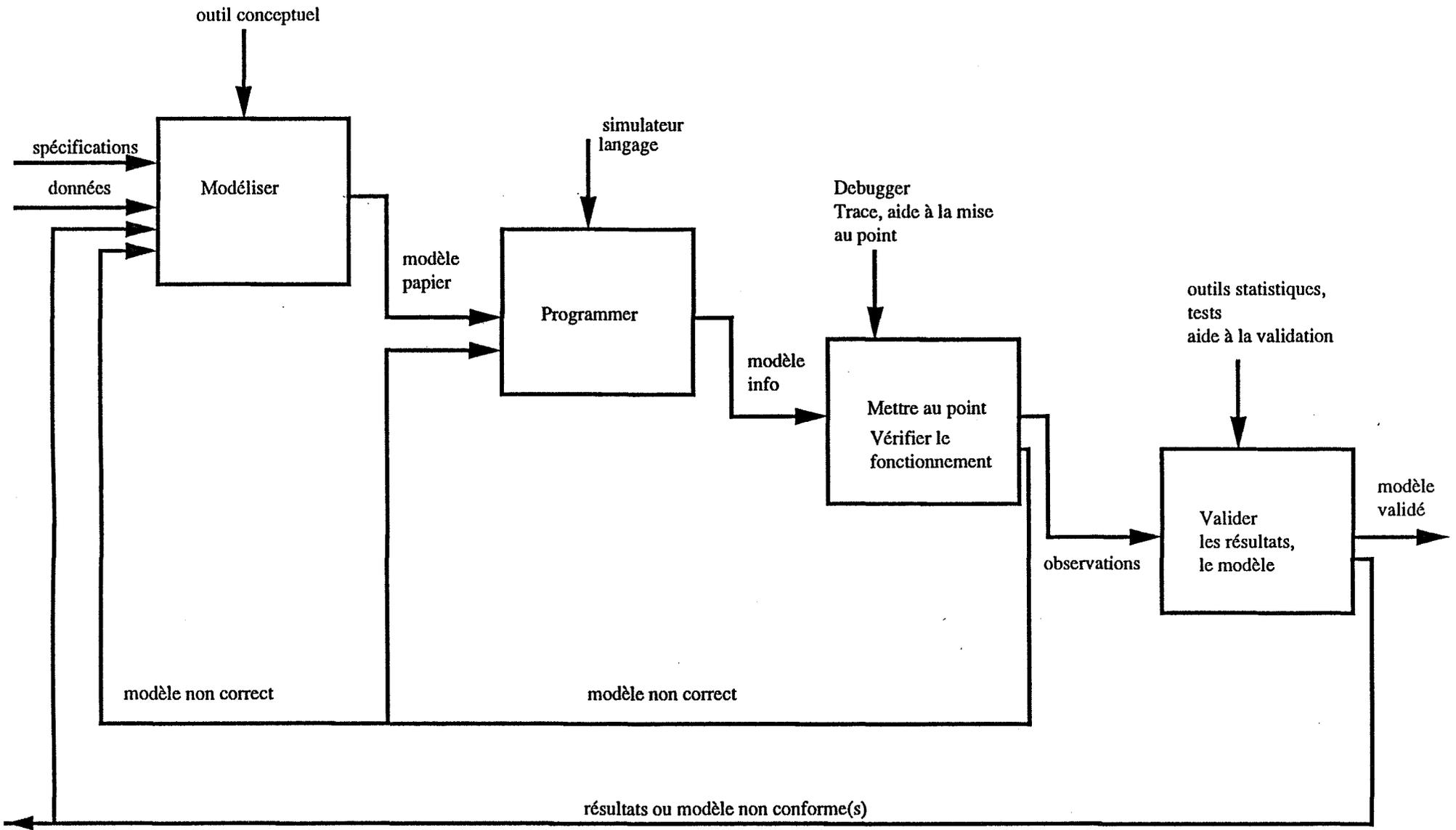


Figure 22.4

- la **trace** (SLAM, SIMAN) : c'est la liste du déroulement, date par date, de tous les événements. On suit ainsi pas à pas l'exécution du programme.

- le **debugger** (SIMAN), qui donne la possibilité d'intervenir sur le modèle en cours de simulation, et notamment de visualiser certaines variables ou de placer des points d'arrêt lorsqu'une variable donnée atteint une valeur particulière. Il est aussi possible de modifier, en cours de simulation, la valeur des variables d'état ou des paramètres des fonctions.

- On pourrait envisager (cela n'existe pas avec SIMAN), un **préprocesseur d'instrumentation automatique**, fondé sur l'analyse du graphe d'événements ou du diagramme de processus. L'instrumentation du système, pour reprendre les termes de Balci [Balci 85], consiste à introduire dans le modèle des "**mouchards**", chargés d'informer sur le comportement du système. Cette opération est effectuée "manuellement". Les mouchards consistent en des comptages d'entités ou des calculs statistiques (durées, taux d'utilisation,...) ; il serait également intéressant qu'ils évaluent le comportement du modèle face à des assertions logiques (par exemple : durée de cycle < durée-max) ce qui permettrait de repérer les cas de violation de ces assertions.

- le **rapport statistique** (Summary Report de SLAM et SIMAN, par exemple) sur le comportement dynamique des variables d'état (longueur de file d'attente, nombre d'unités de ressource occupées,...). Il est établi sur la base des mouchards définis plus haut. Il fournit, outre la moyenne, les valeurs minimales et maximales atteintes, ce qui permet de détecter certaines erreurs de programmation ; d'autre part, l'écart-type, également calculé, mesure la dispersion des valeurs autour de la moyenne.

- l'**animation graphique** ; elle est comprise dans TESS, l'environnement de simulation de SLAM ; elle existe aussi pour SIMAN, avec CINEMA. Le comportement dynamique du modèle est visualisé à l'écran à l'aide d'un ensemble d'icônes représentant les entités, les ressources, etc... On peut ainsi rapidement repérer les erreurs logiques de programmation.

2.2.2.3.3. Validation

Le système représenté intègre :

- des **facteurs non contrôlés** ou "paramètres internes", c'est-à-dire des valeurs admises mais imprécises, susceptibles de variations faibles. Ex : les durées opératoires.

- des **facteurs contrôlés** ou "options de fonctionnement", qui peuvent prendre un certain nombre de modalités dont on veut tester les conséquences : ce sont les entrées du modèle.

La phase de validation consiste, en fait, en un double test de fonctionnement du système. On s'assure, d'une part, de la validité des résultats issus de la "fonction de transformation" des entrées, et, d'autre part, de la validité du modèle. On mesure la validité du modèle par :

- sa **stabilité** face à de petites variations des facteurs non contrôlés,
- sa **résistance** face à des entrées non prévues.

- validation des résultats

Elle consiste à tester la conformité des sorties mesurées à des résultats connus lorsque ces derniers existent. Dans le cas de la conception de systèmes, les valeurs de référence ne sont pas connues. On se contentera donc de s'assurer de la validité "intrinsèque" des sorties fournies par le modèle.

En effet, du fait de l'utilisation de processus aléatoires dans le modèle, les résultats sont eux-mêmes des réalisations de variables aléatoires et doivent être traités comme tels. Il s'agit d'estimer si les résultats mesurés (moyenne, écart-type, min, max) sont bien représentatifs du phénomène à observer ; ils pourraient être faussés par les conditions de simulation ou d'observation statistique (état transitoire, échantillonnage).

En résumé : on relève, à l'issue d'une simulation, des valeurs de variables aléatoires dont la loi est mal connue : nature, moments, paramètres. Afin d'appréhender au mieux ces paramètres inconnus, on construit des **intervalles de confiance** autour des valeurs observées.

Nous verrons plus loin comment construire ces intervalles dans la pratique.

- validation du modèle

Elle consiste à s'assurer que le modèle donne des résultats cohérents pour des valeurs de facteurs contrôlés et des valeurs de facteurs non contrôlés autres que celles qui ont servi à sa construction. On teste sa stabilité, sa sensibilité face à ces deux types de variations.

On va mesurer la **variabilité** des réponses du système afin de tester sa stabilité face à de petites variations sur les facteurs non contrôlés (aléas sur les durées, sur les dates de lancement, état initial du système) ; on vérifie que ceux-ci n'altèrent pas les sorties. Dans cet objectif, on peut donc procéder à plusieurs simulations consécutives, sans remise à zéro de l'état initial du système, puis apprécier la variabilité des réponses à l'aide de tests appropriés (analyse de la variance, par exemple).

Un degré trop élevé de variabilité rend difficile l'interprétation des résultats car cela signifie que ces derniers sont très dépendants de facteurs non contrôlés. On y remédie en transformant, si on le peut, ces paramètres en **facteurs contrôlés** (donc en entrées du système).

On testera ensuite la **résistance** du modèle face à des cas "extrêmes". Cela consiste à s'assurer que le modèle donne des résultats cohérents pour des valeurs de facteurs contrôlés autres que celles qui ont servi à sa construction. Si les résultats fournis par le fonctionnement "aux limites" du modèle ne sont pas aberrants, alors celui-ci est robuste. Balci suggère de faire fonctionner le modèle avec des ensembles d'entrées ne faisant pas partie du domaine [Balci 85] :

- toutes les valeurs maxima,
- toutes les valeurs minima,

- un mélange des deux,
- un tirage au hasard parmi les entrées.

2.2.2.3. Construction d'expériences

Cette phase consiste à organiser l'exploitation du modèle élaboré à l'étape précédente. L'exécution des simulations va se dérouler conformément à un **plan** de scénarios. On entend par **scénario** un jeu particulier de paramètres d'entrée (ou facteurs contrôlés) dont on veut observer l'effet sur les indicateurs de sortie (ou réponses) du système.

Construire un plan d'expérience (ou de simulations), c'est générer des changements sur les entrées du modèle (chaque facteur prend un certain nombre de niveaux, quantitatifs ou qualitatifs), de façon à apprendre le plus possible sur les réactions des sorties.

La phase d'expérimentation, de mise au point des combinaisons de facteurs, dépend donc fortement de l'exploitation finale des résultats.

On peut s'inspirer, pour l'élaboration de ce plan, des méthodes de construction de **plans d'expériences** qui sont utilisées depuis longtemps, notamment en contrôle de qualité.

Cependant :

Les données issues des simulations, à cause des distributions aléatoires incorporées dans le modèle de simulation, posent un problème de **variabilité**, tout comme les expériences réelles. En effet, si un plan d'expérience est composé de facteurs contrôlés, ceux que l'on maîtrise et dont on cherche à observer les effets sur les sorties, ce plan comprend aussi des **facteurs non contrôlés**, qui engendrent une variabilité parasite, ou résiduelle. On fera l'hypothèse classique [Kleijnen 87] que celle-ci est distribuée selon une loi normale. Afin de s'affranchir de l'effet de ces facteurs non contrôlés, on procède à des répétitions des simulations (**randomisation**, ou **aléarisation**).

Il sera donc prudent de faire appel à l'analyse de la variance, pour mesurer l'effet des facteurs non contrôlés, avant d'exploiter les résultats.

Nous avons vu également que des intervalles de confiance sont ensuite calculés, afin d'estimer les valeurs réelles. Le plan d'expérience élaboré doit donc avoir la capacité d'engendrer des intervalles de confiance suffisamment petits, avec une précision maximale (pour chaque configuration, respecter le nombre de répétitions et la longueur des simulations, calculés pour avoir un bon intervalle de confiance).

La méthode de construction de tels échantillons sera détaillée plus loin, en deuxième partie, dans un paragraphe sur la validation (paragraphe 3.1.3.4).

Quant aux sorties, le choix est effectué, à ce stade de la simulation, de recueillir des valeurs moyennées, ou bien ponctuelles, selon que l'on s'intéresse plutôt au régime permanent ou à l'état transitoire du système, à des résultats de type "synthèse" (évolution des variables d'état au cours du temps) ou bien "photographie" (état instantané des éléments du système).

Une expérience est complètement caractérisée par les trois éléments qui la composent [Zeigler 76] :

- l'objet expérimental (le modèle de l'atelier),
- le cadre expérimental,
- les données générées.

Dans notre cas, le modèle restera inchangé tout au long de l'expérimentation : une expérience est donc entièrement définie par le cadre expérimental et les sorties. Le cadre expérimental lui-même, tel qu'il est défini dans [Ören 79], regroupe cinq ensembles : les variables observables, la planification des entrées, les initialisations, les conditions de terminaison et les spécifications quant à la manière de collecter les données. A l'intérieur d'une même campagne de simulation, seules nos entrées sont variables (elles forment un scénario) ; les initialisations sont identiques au générateur aléatoire près, on ne les prendra donc pas en compte.

En résumé : une expérience = { [scénario],[performances] },

un scénario étant composé de paramètres d'entrée, les performances étant des observations sur les indicateurs de sortie.

Il s'agit maintenant d'élaborer un plan d'expérience qui fournisse un maximum d'information sur le comportement du système avec un minimum de scénarios.

Les méthodes de construction de plans d'expérience seront présentées dans la troisième partie.

Le "pouvoir informatif" des expériences dépend non seulement de la bonne composition des plans, mais aussi de la pertinence des observations relevées. Nous avons, pour cela, mis au point et utilisé une méthode qui permet, en préalable à la campagne de simulation, de procéder à un premier **affinage des paramètres et indicateurs**. Notre méthode consiste à mettre en oeuvre un processus itératif tant en ce qui concerne la construction du vecteur scénario (quels facteurs et quelle plage de variations) que celle du vecteur performances (quels sont les indicateurs les plus significativement représentatifs des ateliers mis en comparaison).

Le processus d'affinage que nous avons défini repose essentiellement sur l'analyse factorielle en composantes principales (ACP) des résultats. Par exemple :

- * La plage de variation des **paramètres d'entrée** est élargie quand ils ne permettent pas de différencier assez bien les simulations. On élimine les cas extrêmes qui perturbent l'analyse. On a intérêt, dans un premier temps, à paramétrer un grand nombre de caractéristiques, que l'on fixera à une valeur moyenne si on constate qu'elles n'ont pas d'influence sur la forme du nuage.

- * Au niveau des **indicateurs de sortie**, on cherche une combinaison qui traduise bien la diversité des comportements : le processus consiste à repérer ceux qui sont les plus dispersés - allongeant la forme du nuage -, et à éliminer progressivement les redondances et les indicateurs non porteurs

d'information. Les indicateurs qui ne varient pas d'une simulation à l'autre apportent des informations sur les **invariants** du système.

2.2.2.4. Exploitation des résultats

Nous allons travailler sur l'ensemble des observations relevées au cours d'une campagne de simulation pour extraire une information maximale de cette campagne.

L'exploitation des résultats issus des simulations doit déboucher sur une prise de décision de la part du "client" : choix d'une solution, affinage/réorientation de l'étude, etc... L'exécution de cette phase est plus ou moins bien prise en charge par les simulateurs, suivant le niveau d'aide à la décision recherché.

Par "exploitation des résultats", on peut en effet entendre divers types de traitements :

- **visualisation**, sous forme de **graphiques**, des performances ou de l'état du système : courbes, histogrammes, diagrammes, etc... On vise là une présentation synthétique du rapport de simulation, mais aucune information supplémentaire n'est apportée ; seule la représentation des données est modifiée. Le décideur dispose ainsi d'une vision globale et rapide des résultats ; il peut facilement effectuer des comparaisons entre différents cas. En général, les simulateurs offrent quelques-unes, au moins, de ces fonctions. Avec le post-processeur OUTPT, de SIMAN, on dispose des commandes de tracé de courbe (PLOT) et de tracé d'histogramme (HISTO) ; SLAM fournit des possibilités similaires avec TESS. Autrement, on récupère les fichiers de valeurs (commande EXPORT de OUTPT) pour les mettre ensuite sous présentation graphique avec un logiciel externe.

- **élaboration de conseils** pour aider le décideur ; génération d'informations supplémentaires sur les résultats : analyse statistique, corrélations, analyse de la variance, modèles paramétriques, analyses factorielles, classifications... En ce domaine, la pratique est encore peu formalisée ; il n'existe pas de

méthode générale quant à la manière d'exploiter les résultats de simulation. Par conséquent, cet aspect a été peu développé dans les logiciels de simulation du marché.

De façon générale, on arrive, en fin de cycle de simulation, à un modèle et un cadre expérimental validés. On est capable de mettre au point et de lancer des plans de simulation qui nous fournissent un volume considérable de résultats numériques mais on n'utilise qu'une très faible part du potentiel d'information de ces données car on ne sait pas comment extraire toute la connaissance qu'elles contiennent.

2.2.3. Bilan et perspectives de la simulation

Le processus de simulation comporte encore des "zones d'ombre". Les principales lacunes se situent au niveau de la validation statistique du modèle, de la construction de scénarios de simulations, et enfin essentiellement de l'analyse et de l'interprétation des résultats fournis [Cernault 88]. Les lacunes concernent soit la théorie (construction de scénarios, exploitation de résultats), soit l'utilisation de méthodes existantes (statistiques pour la validation, par exemple).

D'autre part, les compétences mises en oeuvre (analyse système, modélisation, programmation, validation...) sont actuellement dispersées dans une multitude de logiciels. La tendance est à une intégration plus complète des outils afin de constituer un environnement propre à la conduite de projets incorporant la simulation [Kiran 89].

2.3. SYNTHÈSE DE LA PREMIÈRE PARTIE

Les questions liées à la conception de systèmes de production soulèvent le problème de la connaissance des comportements du système en réponse à des stimulations de type organisationnel (plan de fabrication, options de gestion) ou bien technologique (dimensionnement des équipements). Dans l'état actuel des choses cette connaissance est plutôt faible. En effet, l'espace des réponses est très complexe, du fait des effets combinés des stimulations et de leurs interactions, effets difficilement prévisibles.

La meilleure façon d'améliorer sa connaissance du système de production est encore d'en faire une expérimentation directe. En ce sens, la simulation est un outil particulièrement intéressant.

Nous avons vu que la conduite d'une simulation ne s'arrête pas à l'élaboration d'un modèle du système. Elle comprend aussi des questions de validation et d'exploitation du modèle. L'accent a été mis sur la faiblesse de l'assistance logicielle et/ou théorique et/ou méthodique en ce qui concerne notamment l'exploitation du modèle de simulation :

- construction des expériences,
- analyse, interprétation des résultats.

Nous nous attacherons surtout à éclairer ces deux derniers points.

La partie suivante détaille notre pratique de la simulation pour la conception d'atelier sur un cas précis. C'est à partir de campagnes de simulation "bien construites" qu'il sera ensuite possible d'exploiter les expériences obtenues par simulation et de décrire le système par un modèle de ses comportements et non plus de ses mécanismes de base.

3. DEUXIEME PARTIE :

SIMULATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION

La deuxième partie présente la mise en oeuvre du processus de simulation sur un cas particulier d'atelier à concevoir (MACSI). Nous avons construit MACSI de telle sorte qu'il nous permette de tester de façon générale le dimensionnement et les choix de fonctionnement conjoints des moyens de stockage et des moyens de manutention.

L'accent est particulièrement porté sur la phase de construction automatique de plans d'expériences. Nous proposons une méthode de plan partiel, fondée sur le regroupement des facteurs en ensembles sémantiquement homogènes. Le plan est ensuite construit par tirages aléatoires ; cette procédure est automatisée par un programme de Génération Automatique de Plans de Simulations (GAPS).

3.1. ANALYSE ET MODELISATION DE "MACSI"

Cette partie est consacrée à la description du modèle d'atelier que nous avons simulé. Après une présentation des objets et processus constitutifs du modèle, nous nous intéressons à sa vérification puis à la validation des simulations mises en oeuvre. Nous mettons l'accent sur la détermination des conditions de simulation : longueur de simulation, nombre d'exemplaires de chaque simulation, calcul des statistiques.

3.1.1. Présentation du cas

Nous appelons **MACSI**, ce qui signifie "Modèle d'Atelier à Concevoir par Simulation" (cf figure 31.1), l'atelier que nous avons choisi pour mettre au point et tester notre démarche.

Le schéma est composé de symboles que nous appelons "blocs élémentaires" et dont la liste est donnée en figure 31.2 ; des précisions sur les blocs se trouvent en annexe B.

Nous détaillons les spécifications de **MACSI** dans le paragraphe suivant.

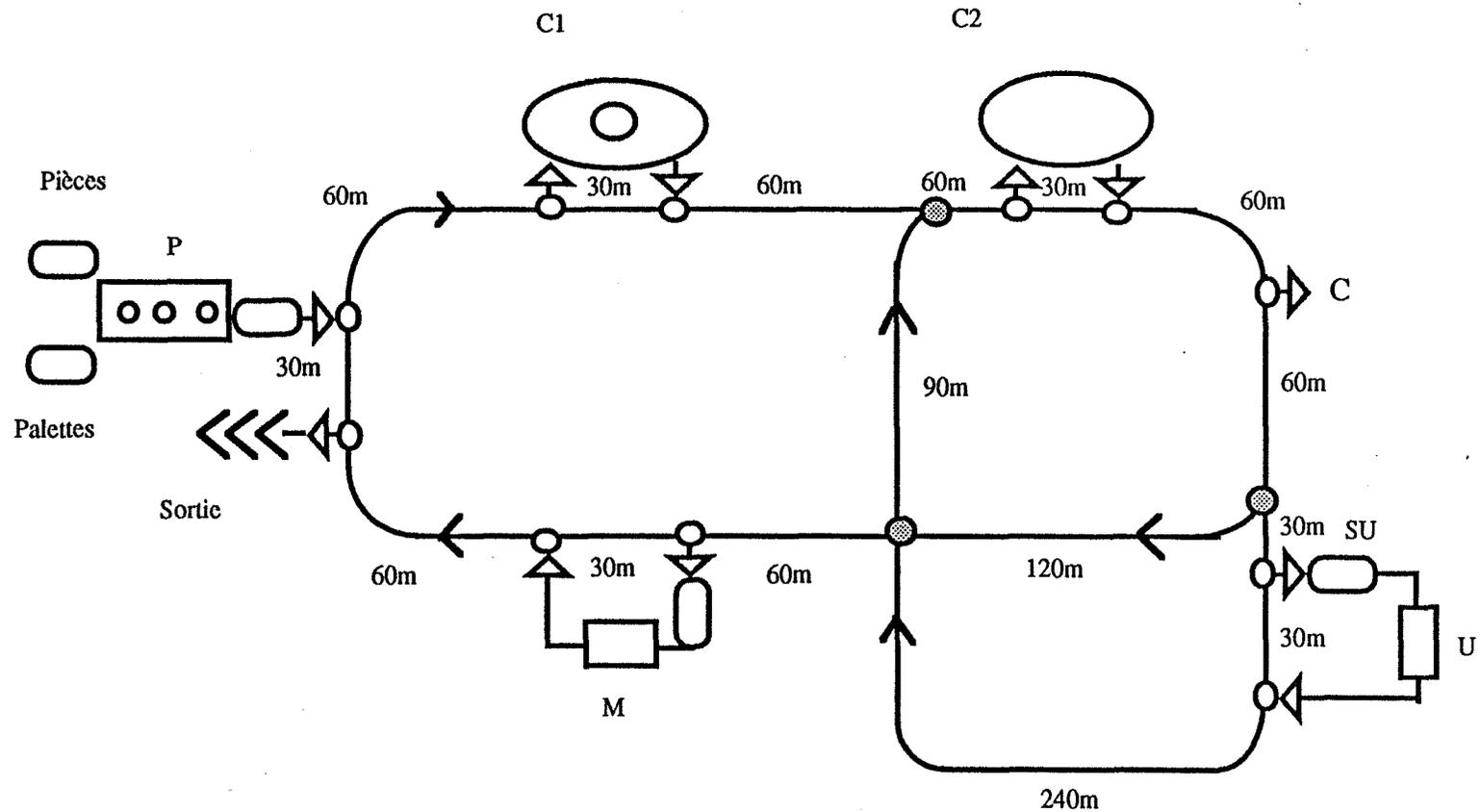
3.1.2. Première étape du processus

3.1.2.1. Analyse et description du problème

Il s'agit, ainsi que nous l'avons dit plus haut (première partie), de définir l'objectif, le contexte et les données de l'étude.

L'objectif est d'aider à la conception des systèmes de production. Pour cela, nous avons besoin d'acquérir une connaissance qui nous fait défaut. Ainsi notre travail consiste à mettre en lumière des règles de comportement et des modes de fonctionnement d'ateliers de production manufacturière sous l'influence du dimensionnement des

Architecture de MACSI



C1 : cellule 1

C2 : cellule 2

P : palettisation

M : centre de montage

U : centre d'usinage

C : poste de contrôle

SU : stock amont du centre d'usinage

Figure 31.1

ressources et des stratégies de gestion ou d'ordonnancement. Le support de l'étude est constitué par MACSI et son environnement, dont nous allons décrire les caractéristiques.

Les méthodes disponibles pour cette première phase d'analyse procèdent généralement d'une décomposition hiérarchique du système, plus ou moins inspirée de la théorie des systèmes [Walliser 77], [LeMoigne 77]. Elles ont en commun de s'appuyer sur une représentation ou un langage de description graphique, ce qui constitue un support de communication efficace entre les différents interlocuteurs et permet la validation des résultats. On peut citer AMS [Melese 72], GRAI [Doumeingts 84], MERISE [Tardieu 83], SADT [Softtech Inc. 81].

On trouvera une revue comparative des méthodes dans [Delgoulet 86]. Selon ce rapport, AMS serait bien adaptée à la représentation du pilotage, pour les données on préfèrera MERISE, quant aux traitements on a le choix entre SADT, MERISE ou GRAI.

Notre cas est un peu particulier, puisque nous avons construit nous-mêmes le cadre de l'étude. Il n'y a, par conséquent, pas d'extraction préalable de connaissances. Nous nous contentons d'une présentation descriptive.

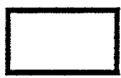
MACSI est un système, une "boîte noire", dont la fonction est de produire, c'est-à-dire de transformer le plan de lancement en entrée du modèle en produits sortis. Les éléments qui composent le système de production proprement dit sont détaillés dans la figure 31.2. MACSI, construit de toutes pièces, se veut "atelier exemplaire" en ce sens qu'il comporte une occurrence, au moins, de chacune des primitives structurelles d'un système de production flexible de la classe de ceux que nous avons définis en introduction.

Réseau de fabrication :

Palettisation : machine à remplir des palettes vides avec des pièces.
 (machine 1) Un lot de N pièces est réparti sur K palettes. La dernière palette peut être incomplète. Le stock amont du poste palettisation est un stock en vrac de

BLOCS ELEMENTAIRES

Postes de travail :



: machine



: poste de palettisation



: cellule de machines identiques



: cellule de machines différentes

Stockage :



: stock en vrac

Transport

tronçons



: section de réseau

cantons



: entrée-machine



: sortie-machine



: aiguillage divergent



: aiguillage convergent



: aiguillage en X

Figure 31.2

capacité non limitée et de délai d'obtention nul ; il est considéré comme extérieur à l'atelier.

- C1-Cellule 1** : 2 machines différentes (en série) alimentées par un robot à partir d'un stock de type carrousel qui est utilisé comme stock amont et aval.
- (machines 2 et 3) Le délai d'obtention d'une pièce à partir du stock est nul car les palettes sont chargées en temps masqué. La règle de gestion du stock est modifiable. Les machines sont consacrées à des opérations de transformation : usinage, tournage... Le robot est une machine particulière à temps opératoire fixe (20 s) qui met à disposition des machines les pièces de chaque palette.
- C2-Cellule 2** : 3 machines identiques (en parallèle) alimentées par un robot à partir d'un stock de type carrousel qui est utilisé comme stock amont et aval.
- (machines 4,8,9) Le délai d'obtention d'une palette est nul (voir plus haut). La règle de gestion du stock est modifiable. La durée opératoire d'une manutention-robot est de 20 s.
- U** : poste d'usinage alimenté à partir d'un stock en vrac (règle de gestion modifiable).
- (machine 5) Les palettes sont évacuées dans un stock aval géré en premier entré premier sorti (FIFO).
- M** : poste de montage alimenté à partir d'un stock en vrac (règle de gestion modifiable).
- (machine 6) Des composants, ressource éventuellement critique, sont montés sur la pièce-maîtresse, portée par la palette. Les palettes sont évacuées dans un stock aval géré en premier entré premier sorti (FIFO).

C : poste de contrôle : les palettes présentant un défaut sont comptées et évacuées à cet endroit. Ce poste a été modélisé mais n'est pas utilisé dans la pratique car les palettes sont supposées sans défaut.

Hypothèses :

- Les machines sont totalement fiables (pas de pannes).
- La palette vide n'est pas une ressource critique, au niveau du poste de palettisation ; on ne connaît pas de rupture de stock.
- Le taux de rebut est nul.

Réseau de transport :

Il est composé d'une succession de **cantons** et de **tronçons**. On retrouve dans [Ammar 84] une structuration et des primitives de systèmes de transport assez proches des nôtres.

Les **tronçons** sont des portions du réseau de transport [Héritier 88] délimitées par des points particuliers (entrée ou sortie d'une station de travail, d'un stock, etc...). Les tronçons qui ne peuvent contenir qu'un seul chariot sont appelés **cantons**. Les cantons correspondent aux points particuliers ou "zones critiques" du circuit, sur lesquelles les chariots risquent de ralentir ou de s'arrêter (chargement, déchargement, aiguillage).

Les chariots filoguidés (CFG) qui circulent sur ce réseau ont une longueur de 2 mètres. Pour des raisons techniques de sécurité, on maintient une distance minimale de 15 mètres (chariot compris) entre deux CFG. Leur vitesse peut être fixée entre 10 et 60 m/min.

Les entrées/sorties du système :

- En entrée du système :

- Un **plan de lancement** en fabrication, c'est-à-dire une séquence de lots de produits préalablement ordonnés. Ce plan est défini en amont de la simulation par un calcul de

plan de charge admissible. Pour chaque produit, la quantité à lancer est fixée, ainsi que la date de début au plus tôt de chaque lot (ensemble de pièces de même gamme). Les pièces sont donc introduites dans l'atelier par lots de lancement. Les lots sont ensuite réorganisés en palettes, pour le transport. Le programme de lancement en fabrication est journalier. Le niveau d'ordonnancement est donc celui d'une planification à très court terme.

- Un **contexte** de fabrication, c'est-à-dire un ensemble d'informations telles que : période de production, niveau de charge de l'atelier, taille des lots, nombre des lots, nombre de CFG, etc....

- En sortie :

- Les **produits finis**, toujours palettisés, évacués au poste "Sortie".

- Un **compte-rendu des performances** du système pour la période de production.

- Les données "environnement" :

- La liste des **gammes**, les caractéristiques des **palettes**, des **machines**. Ce sont des données techniques de production, qui ont un caractère permanent.

Les gammes ont été regroupées en familles (type TGAO) afin de garder un niveau de détail en accord avec celui de la modélisation (on ne prend en compte ni les temps de réglage ni les changements d'outillage), et de représenter plutôt les flux principaux de palettes entre les machines que les déplacements exhaustifs de tous les produits. Une famille regroupe des gammes présentant un ensemble d'opérations semblables³.

Nous présentons maintenant le fonctionnement et la structure de données de MACSI dans un formalisme inspiré de MERISE. Ce qui nous intéresse, au niveau de la structure des données, est la mise en évidence des

³ La technique des blocs empiétants [Proth 87] permet, par exemple, de construire de telles familles.

objets du modèle et des liens, ou **relations**, entre ces objets. Le codage sous forme de base de données ou de fichiers en découle ainsi assez facilement. La décomposition des traitements en **processus** est également intéressante, puisqu'on la retrouve en programmation SIMAN. L'un des points importants est de trouver un équilibre quant au niveau de détail de la représentation, en fonction de l'objectif visé et des données disponibles (il est inutile de représenter quelque chose d'aussi détaillé que l'usure des outils de la machine pour un problème de dimensionnement du parc chariot, par exemple ; en revanche, il faudrait sans doute prendre en compte les phénomènes d'accélération et de ralentissement des chariots). Nous présentons les modèles conceptuels des traitements et des données de MACSI dans les schémas 31.3 et 31.4.

3.1.2.2. Collecte des données et relevé des mesures

Les informations à rassembler pour l'étude sont finalement les suivantes :

- des caractéristiques physiques : architecture et dimensions de l'atelier (cf figure 31.1) ;
- des données "environnement de production" : taille des palettes, gammes opératoires et durées associées, vitesse des CFG, politiques de routage des CFG, règles de gestion des stocks.

Compte tenu du niveau assez global des objectifs (aide à la décision pour le dimensionnement conjoint des sous-systèmes de transport et de stockage), le niveau de modélisation doit rester en accord et ne pas être trop détaillé. On travaillera sur des données agrégées : familles de gammes, îlots de fabrication, tout en sachant que l'agrégation engendre une perte d'information⁴.

Les données telles que les durées opératoires ou les intervalles d'arrivée des lots dans l'atelier apparaîtront dans le modèle sous forme de variables. On affecte une valeur constante à ces grandeurs (la moyenne, par exemple) lorsque leurs variations sont faibles, mais bien souvent on utilise plutôt une représentation stochastique, à

⁴ Sur les questions d'agrégation et de désagrégation des données et des mesures de performances, on peut consulter les références suivantes, dans lesquelles sont discutées les questions de hiérarchisation des systèmes de production : [Ketcham 89], [Hillion 88], [Erschler 88].

MACSI : un modèle conceptuel des données

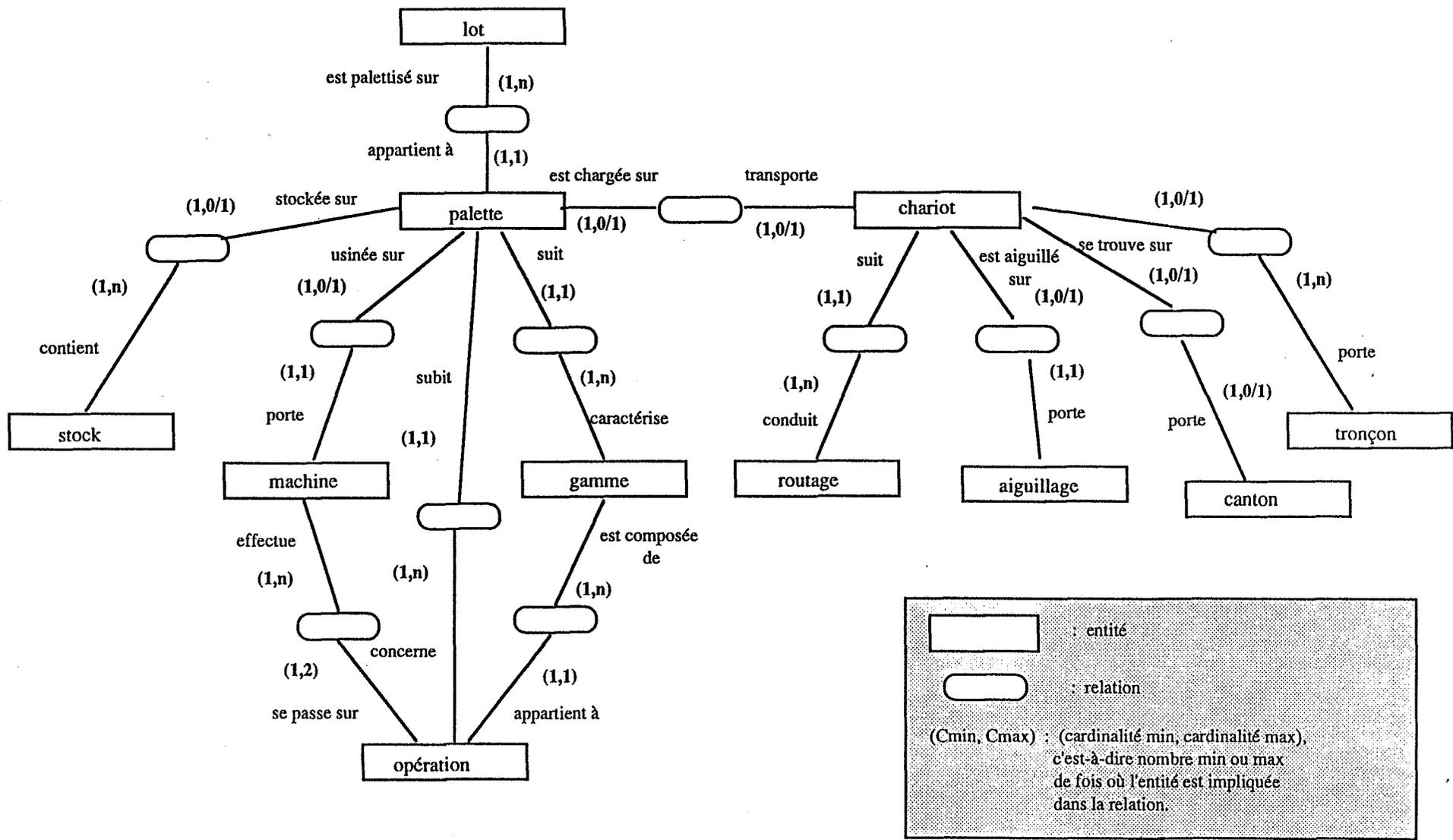


Figure 31.3

MACSI: un modèle conceptuel des traitements

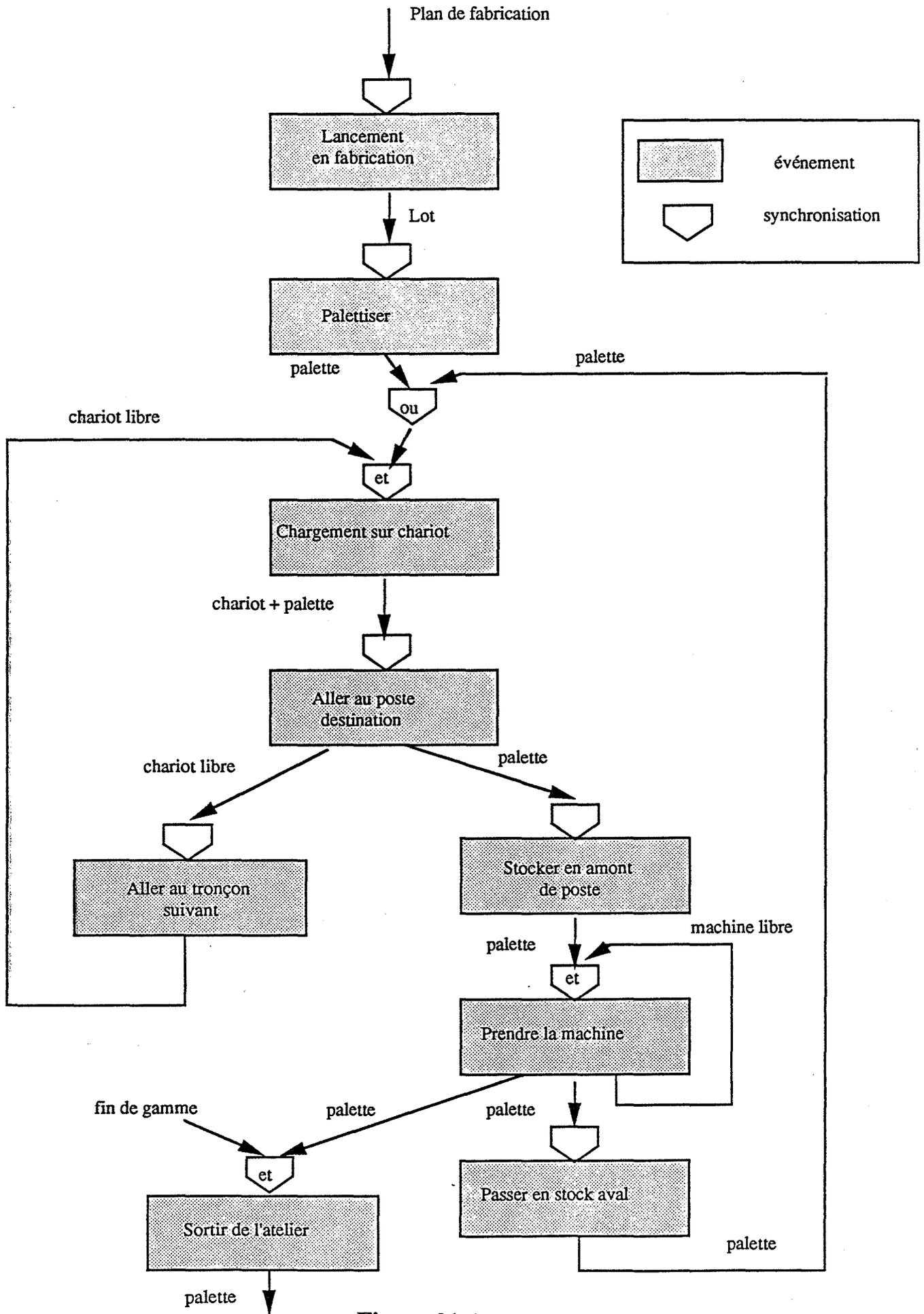


Figure 31.4

l'aide d'une distribution de probabilité fournie par le logiciel, car l'erreur d'approximation par une constante serait trop forte.

Des mesures sont effectuées sur le modèle afin d'évaluer le système de production ; ce sont les variables de sortie. Elles sont organisées autour de trois points forts, antithétiques : en-cours, durées de passage dans l'atelier, engagement des équipements.

Conclusion de la première étape

A l'issue de la première phase est donc construit un **modèle statique**, où sont mis en évidence des relations et des liens "fixes" dans le temps.

Cette étape, analyse et décomposition du problème, est rarement intégrée dans les logiciels de simulation du marché. La traduction de ce formalisme à celui du langage de simulation est le plus souvent effectuée "manuellement".

3.1.3. Deuxième étape du processus : de la modélisation à la validation

Cette étape est elle-même divisée en 4 parties (cf figure 31.5).

Notre langage de référence est SIMAN, avec ses caractéristiques et ses lacunes, mais la plupart des remarques restent valables pour d'autres langages de même catégorie.

Un modèle SIMAN se décrit à l'aide des concepts d'entité, de file d'attente, de ressource, de processus [Jullien 89]. Ce sont les entités qui donnent vie au modèle, en se déplaçant de processus en processus et en mobilisant, pour une certaine durée, les ressources dont elles ont besoin.

Comme il a été précisé dans la partie précédente, le modèle pour la simulation est composé d'une partie statique et d'une partie dynamique.

Etape modélisation

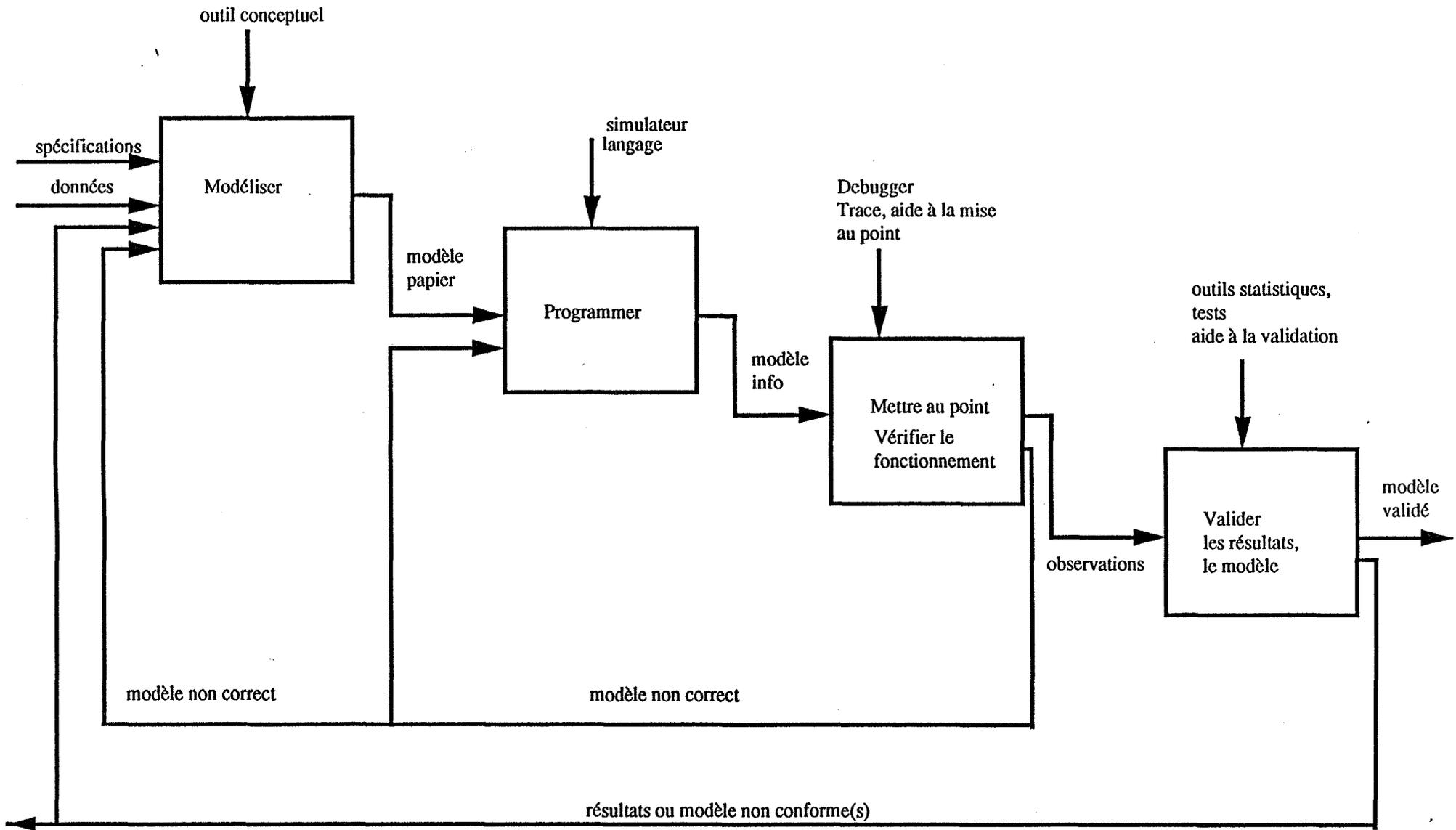


Figure 31.5

3.1.3.1. Modélisation

La modélisation SIMAN s'appuie sur les objets et relations décrits à l'étape précédente. A cet effet, nous avons vu dans la section précédente que le modèle conceptuel des données de MERISE est particulièrement intéressant pour représenter la partie statique car il répertorie, sous la forme entité-relation, tous les objets, avec leurs caractéristiques, et permet de visualiser la structure des données dans son ensemble. Il s'agit ensuite de transcrire celle-ci dans les structures de données du simulateur à moins qu'on ne choisisse de coupler celui-ci à une base de données-atelier.

Avant de détailler la procédure de modélisation, rappelons qu'un atelier se compose de deux sous-systèmes (fabrication et transport), coopérant et communiquant au moyen d'une interface (stocks). Cette décomposition se traduit par la structuration du modèle de simulation en deux diagrammes de blocs séparés, avec chacun ses objets et ses entités spécifiques.

Le sous-système de fabrication est composé de machines sur lesquelles sont usinées des pièces. Le trajet des pièces sur les machines est déterminé par leur gamme opératoire. Les pièces ont été regroupées en palettes pour le transport. La machine s'approvisionne dans un stock amont et évacue la palette traitée dans un stock aval.

Les informations nécessaires sont les gammes (ou plutôt "familles" de gammes) avec les temps opératoires, l'implantation physique de l'atelier, les caractéristiques de fonctionnement des machines, la taille des palettes.

Le sous-système de transport est constitué d'un réseau de transport, suite de tronçons et de cantons, sur lequel circulent des CFG. Leur trajet est déterminé par un itinéraire. Les chariots sont chargés automatiquement aux postes de prise de palettes, ils sont libérés aux postes de déchargement.

Les informations nécessaires sont l'implantation physique du réseau, son découpage, la capacité des tronçons, la vitesse des chariots, leur nombre, leur mode de routage.

Les objets du modèle

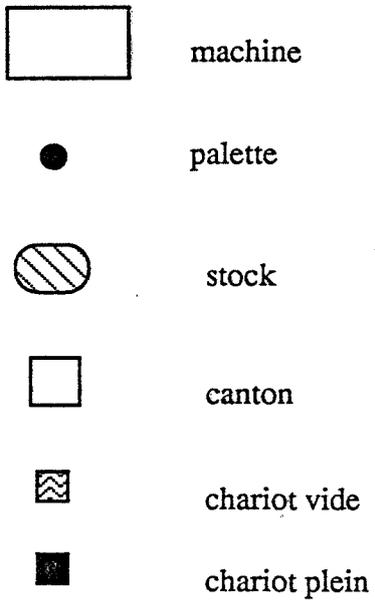
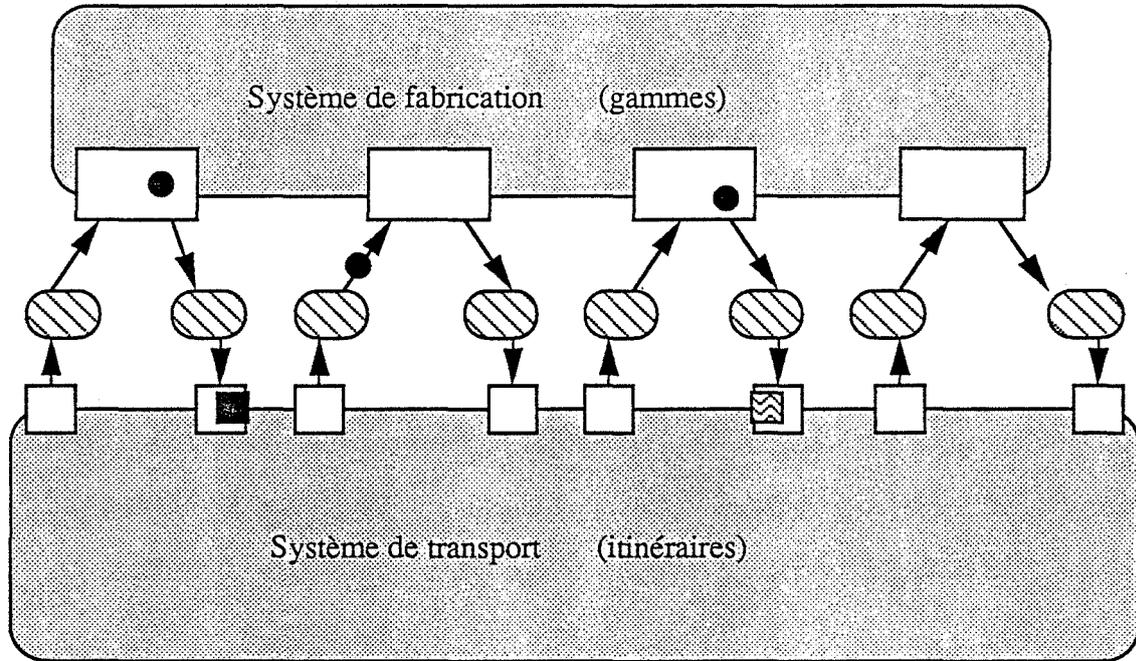


Figure 31.6

L'interface entre les deux sous-systèmes est composée des stocks, qui sont constitués pour le système de fabrication des stocks amont et aval des machines et pour le système de transport des "zones de chargement et de déchargement". Physiquement, cette interface est la même (stocks) pour les deux systèmes qui coopèrent. Malgré tout, il faut choisir d'inclure cette interface dans l'un ou l'autre des sous-systèmes. Il paraît plus naturel de la joindre aux machines, c'est-à-dire de la considérer plutôt comme un ensemble de stocks amont et aval que comme un ensemble de zones de prise et dépose de pièces [Vincent 87].

Les informations nécessaires sont la capacité des stocks d'en-cours, leur mode de gestion.

Les données nécessaires à la modélisation ont dû être répertoriées et collectées à l'étape précédente et sont, normalement, disponibles. S'il en manque, on procède à une collecte complémentaire.

La modélisation de MACSI selon les deux aspects : statique et dynamique (cf figure 31.6) est détaillée en annexe I.

*** MACSI - Partie statique : les éléments (entités, ressources, files d'attente)**

* repérer les entités. Ce sont les éléments qui bougent, qui circulent dans le système.

Fabrication : les entités entrantes sont les lots, qui sont ensuite "éclatés" en entités-palettes.

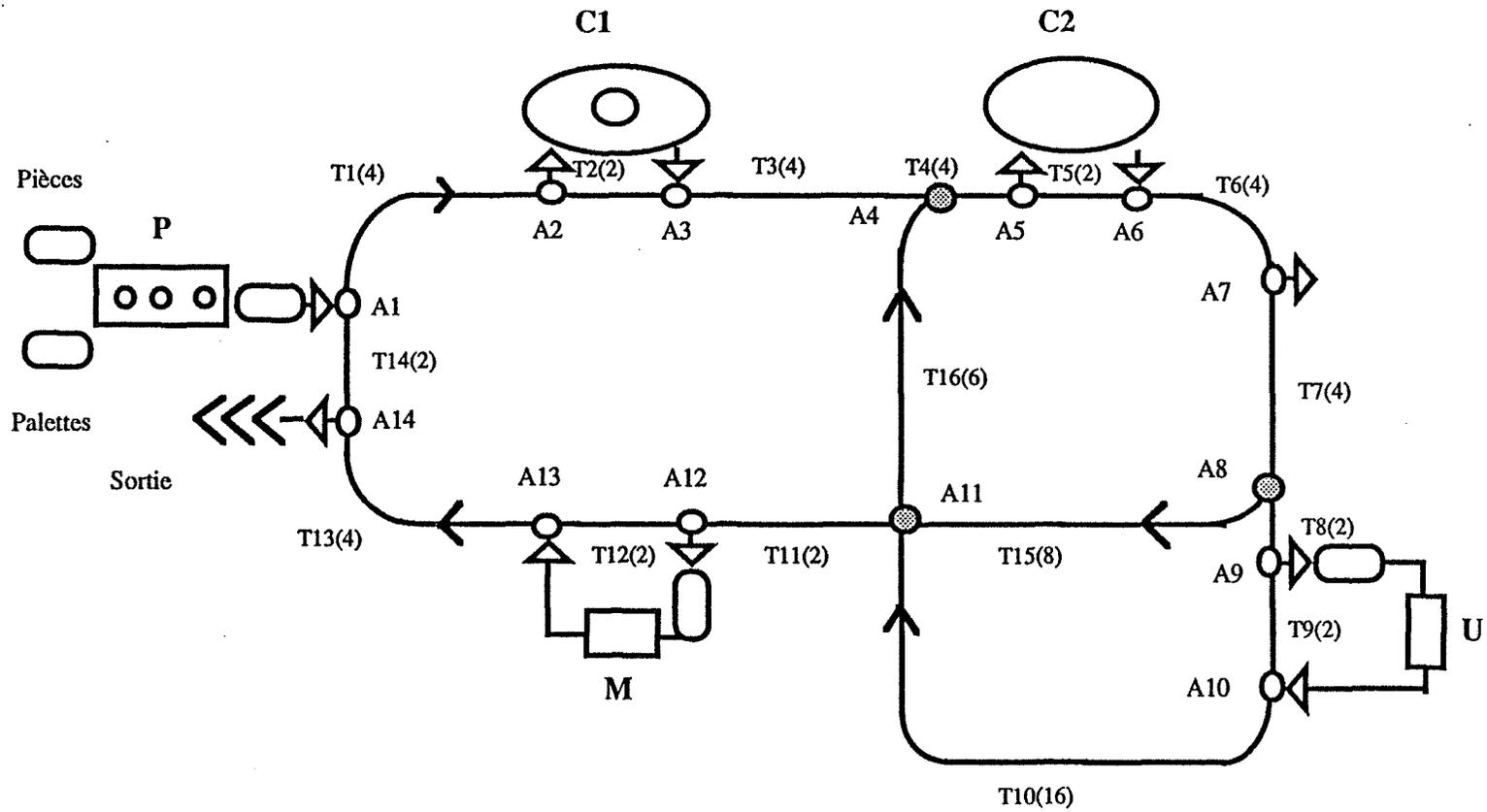
Transport : les entités sont les chariots filoguidés.

Remarque : nous n'avons pas utilisé le bloc TRANSPORTERS de SIMAN car il conduit à une modélisation des CFG en tant que ressource or les CFG-ressources sont des éléments passifs, à la différence des CFG-entités, qui offrent de plus grandes possibilités de gestion.

* repérer les ressources et files d'attente associées (cf figures 31.7 et 31.8). Les ressources sont des éléments nécessaires à l'exécution des processus mais leur quantité est limitée.

Fabrication : machines et robots M1 à M11.

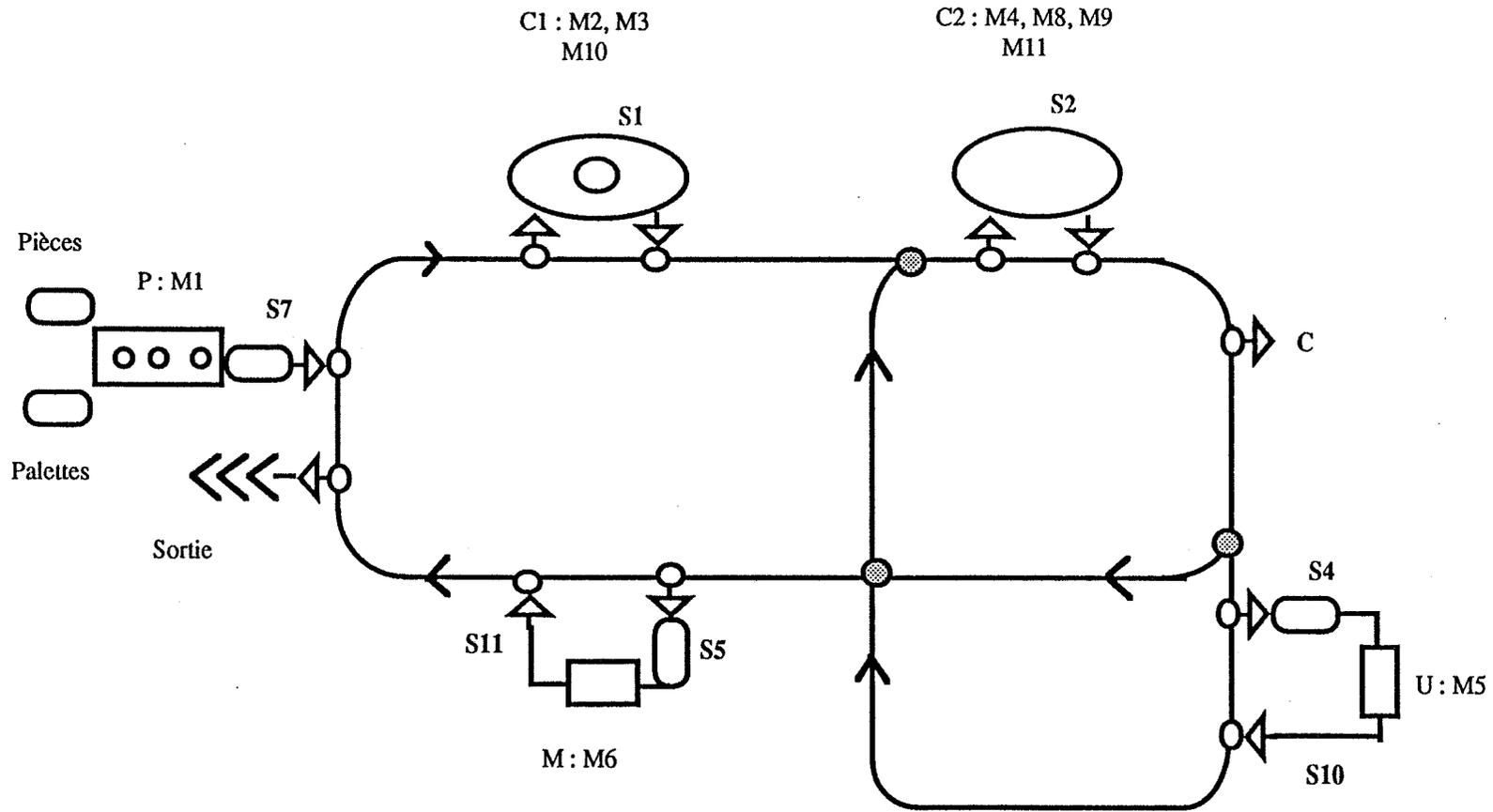
MACSI : les ressources "transport"



A_i : Ressource-Canton n°i, $i = 1, 14$
 $T_i(n)$: Ressource-Tronçon n°i (capacité), $i = 1, 16$

Figure 31.7

MACSI : les ressources "fabrication"



S_i = Ressource-Stock n°i
 M_i = Ressource-Machine n°i

Figure 31.8

Transport : tronçons et cantons. On a 16 ressources-tronçons T1 à T16 (les capacités sont indiquées sur le schéma), et 14 ressources-cantons A1 à A14.

Interface : stocks amont et aval des machines, qui sont à dimensionner.

Les ressources sont caractérisées par leur nombre d'unités disponibles.

*** MACSI - Partie dynamique : les traitements (processus)**

On repère maintenant les **processus**. Ce sont les traitements qui s'exercent sur les entités : création, transformation, attente, déplacement, destruction. Ils sont caractérisés par les ressources mobilisées et par une durée constante, probabiliste ou indéterminée.

Les processus de MACSI sont les suivants (on trouvera en annexe I les schémas en blocs SIMAN) :

- initialisation et lancement en fabrication ;

A partir d'un fichier ordonné des lots à lancer sont créées les entités entrantes du système. Les lots sont introduits dans le système à leur date de début si elle est indiquée, sinon le lancement de l'ensemble est réparti uniformément au cours de la période de production. On calcule un délai moyen entre deux lancements : $d_0 = (\text{durée période} \cdot 0.95) / \text{nombre de lots}$. L'arrivée réelle des lots dans l'atelier se fait alors suivant une distribution triangulaire de mode d_0 , de valeur minimale $(0.9 \cdot d_0)$, de valeur maximale $(1.1 \cdot d_0)$. La distribution triangulaire a la particularité d'être bornée en minimum et surtout en maximum, ce qui nous offre la garantie de ne pas engendrer des intervalles de lancement prohibitifs pour le fonctionnement du système.

exemple : pour un fichier de 26 lots, le délai moyen vaut $(1440 \cdot 0.95) / 26$ soit 53 min. On adopte alors une distribution triangulaire de mode 53, minimum 47.7 et maximum 58.3.

Lors de la première création, le système est initialisé, c'est-à-dire que les données concernant les gammes, les machines, les palettes sont lues sur des fichiers externes, que les entités chariots sont mises en place et que les capacités de stockage sont dimensionnées.

- processus archivage ;

Les performances, l'état du système, sont enregistrés à chaque fin de simulation afin de constituer une mémoire des comportements du système.

- processus-machines ;

Il s'agit de traduire le déplacement des palettes sur les machines, suivant leur gamme. L'avancement dans la gamme est géré par un sous-programme. Les valeurs moyennes des temps opératoires sont données par la gamme. Leur distribution réelle suit une loi normale centrée sur cette valeur moyenne et d'écart-type égal à la durée moyenne sur 10.

exemple: pour une durée opératoire de "30" indiquée dans le fichier GAMME, les temps opératoires réels seront distribués selon une loi normale $N(30,3)$. A chaque poste de travail est utilisée une source aléatoire propre.

- processus-chariots

Il s'agit de traduire le déplacement des chariots sur le réseau de transport. Le routage des chariots est géré par un sous-programme. Le fonctionnement des tronçons est très simple : on affecte uniquement une durée de transfert au chariot après avoir vérifié qu'il y a une place disponible sur le tronçon d'arrivée.

On a ainsi modélisé les déplacements d'entités sur l'un et l'autre des sous-systèmes.

La communication entre les deux parties est assurée, au niveau de l'interface, par le partage des ressources STOCK (requête/libération). En effet, le niveau d'un stock est modifié soit du fait de la

fabrication qui prend des palettes en amont pour les évacuer en aval, soit du fait du transport qui charge des palettes en aval de machines et les dépose en amont d'autres.

Il faut régler la **synchronisation** entre les activités de transport et de fabrication : par exemple, une palette transportée ne doit entrer dans son stock de destination que lorsque l'opération de transport s'achève. Or la durée de cette opération est indéterminée car elle dépend de l'état du réseau : les processus-machines et chariots ont besoin d'être synchronisés.

3.1.3.2. Programmation

C'est le passage du modèle "papier", diagramme de blocs, de flux, réseau de processus ... à un programme exécutable. La programmation SIMAN en deux fichiers indépendants permet de séparer la structure et le fonctionnement du modèle de ses paramètres d'exécution.

La traduction du modèle s'effectue de façon assez systématique en remplaçant les blocs, noeuds, files d'attente,... par les processus (SLAM [Pritsker 86a]), blocs (SIMAN [Pegden 86a]) ou commandes (QNAP2 [Simulog 83]) du langage de simulation. Ces éléments de base sont affinés à l'aide des fonctions prédéfinies (politiques de gestion des files, d'allocation de ressources).

Les distributions stochastiques permettent de représenter le caractère aléatoire dont sont entachées les durées opératoires ou les dates d'entrée dans l'atelier. Nous utilisons le **générateur aléatoire** en 4 circonstances :

- tirage de la source aléatoire principale,
- cadence d'entrée des lots dans l'atelier,
- durées opératoires sur les machines,
- aiguillage probabiliste des chariots vides, donc sans destination affectée.

Finalement (cf figure 31.9), le programme exécutable de MACSI est constitué de 3 fichiers :

- description des processus dans le langage de blocs de SIMAN.
- valorisation des paramètres, dimensionnement des ressources.
- programmation Fortran spécifique.

En entrée :

- Le plan de lancement (fichier LOT) établi à l'horizon d'une période élémentaire. La période élémentaire de MACSI est la journée, soit 1440 minutes. Le plan de lancement est une liste des lots, dans l'ordre où ils doivent entrer dans l'atelier. Un lot du fichier est caractérisé par un numéro d'ordre, une gamme de fabrication, un nombre de pièces, et éventuellement une date de début.
- Le contexte de la simulation (fichier CONTEXTE).

En sortie :

- Un fichier de résultats (fichier RES). Ce fichier est créé et rempli par le processus d'archivage.

En environnement :

- Des données "permanentes" (fichiers GAMME, MACHINE, PALETTE).

3.1.3.3. Vérification

Dans un premier temps, afin de disposer d'un contrôle total de toutes les valeurs numériques, nous avons fixé les paramètres (temps opératoires, cadence de lancement,...) à des valeurs constantes (leurs moyennes), de façon à pouvoir calculer par avance les résultats escomptés. Ayant rendu le modèle complètement déterministe, nous avons ensuite fait circuler une à une des palettes de chaque gamme, afin de vérifier nos procédures de gestion des gammes, de déplacement des chariots, ainsi que la programmation des mécanismes de prise et dépose de palettes.

Architecture d'une simulation

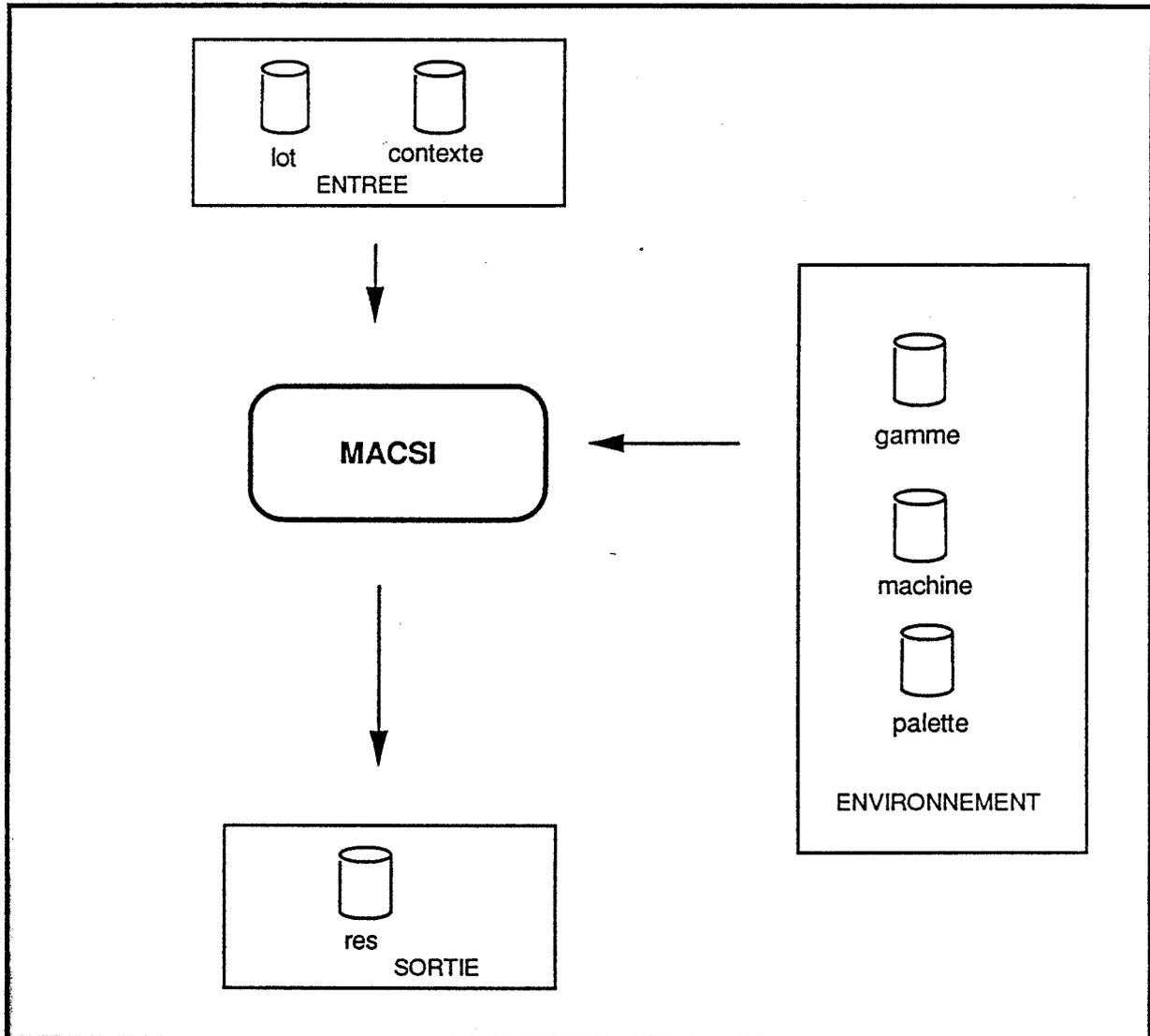


Figure 31.9

Nous avons d'abord utilisé le "debugger" pour suivre le cheminement des entités sur les blocs, les changements de valeur des variables, l'état des ressources... A cet effet, la commande "trace" est particulièrement utile si on a peu d'entités dans le système, sinon la liste des événements devient rapidement illisible. Le rapport statistique est ensuite analysé : il donne un résumé, une image synthétique, de la simulation et indique notamment le nombre d'entités passées sur les compteurs et autres capteurs statistiques. On peut ainsi déceler, en cas d'entités perdues ou accumulées, les zones où se concentrent les anomalies.

Dans un deuxième temps, on rétablit l'usage des tirages aléatoires et on vérifie alors, en plaçant des mouchards sur les distributions stochastiques, que ceux-ci fournissent bien la distribution souhaitée. On s'aide, pour cela, des commandes "tracé de courbes et d'histogrammes" du post-processeur OUTPT [Pegden 86b].

Application :

Vérification des distributions aléatoires concernant les cadences d'arrivée des lots dans l'atelier ainsi que les durées opératoires sur les machines.

On utilise un plan de fabrication composé uniquement de produits de la "gamme 14" (cf annexe D) car celle-ci présente la particularité de passer sur tous les postes. On peut donc vérifier le comportement de toutes les durées opératoires : palettisation, machines 2 et 3, cellule 2, usinage et montage. Les délais d'arrivée des lots seront également vérifiés à l'aide de ce plan.

Les lots arrivent dans l'atelier suivant une cadence moyenne, calculée ainsi : (horizon du plan de production - marge)/nombre de lots à fabriquer.

Dans le cas d'un plan constitué exclusivement de gamme14 pour une charge de l'atelier à 70%, l'intervalle moyen entre 2 arrivées est de 53 minutes. Supposons alors, par exemple, que la distribution réelle des intervalles est effectuée selon une loi triangulaire de mode 53, de minimum $53 \cdot 0.9 (=47.7)$ et de maximum $53 \cdot 1.1 (=58.3)$, afin de prendre en compte les inévitables fluctuations.

Les distributions des durées opératoires sont les suivantes :

- loi normale de moyenne	30, d'écart-type	3	pour la	palettisation ;
- "	10	"	"	machine 3 ;
- "	20,	"	"	machine 2 ;
- "	130,	"	"	cellule 2 ;
- "	30,	"	"	l'usinage ;
- "	30,	"	"	le montage.

La répartition des délais d'arrivée engendrés par SIMAN est visualisée dans l'histogramme (a) de la figure 31.10. L'histogramme (b) de la figure 31.10 fournit la répartition des durées opératoires sur le poste montage.

On vérifie à l'aide du test statistique du Chi-Deux, dont on trouvera une présentation dans [Saporta 90] par exemple, que la distribution observée correspond bien à la distribution spécifiée dans le programme (cf figure 31.11). On vérifie de même les distributions des durées opératoires de chaque poste.

Lorsque la vérification des mécanismes et de la conformité des distributions des générateurs est achevée on peut considérer que la partie "programmation" a été correctement effectuée.

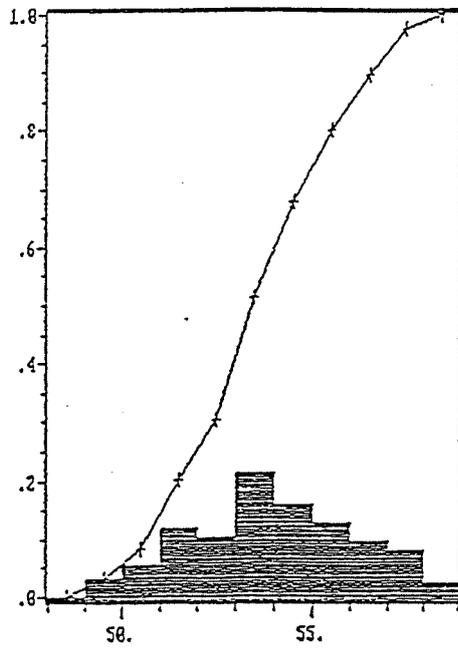
On procède alors à la validation du modèle.

3.1.3.4. Validation

Ainsi que nous l'avons déjà précisé (paragraphe 2.2.2.3.3), la validation porte sur :

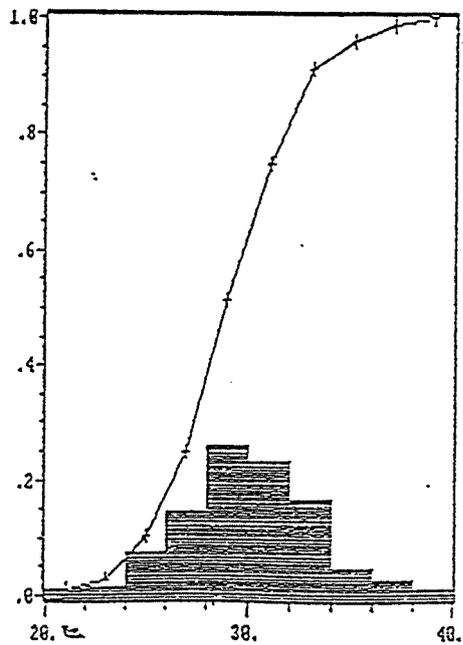
- les résultats : il s'agit de confronter les sorties fournies par la simulation aux résultats attendus (historiques, réels, théoriques...);

Vérification du caractère des distributions
de probabilité utilisées dans le modèle



(a) Délai d'arrivée

loi triangulaire mode = 53
min = 47.7
max = 58.3



(b) Durée opératoire sur machine 6
(montage)

loi normale $N(30,3)$

Normalité des distributions - Test du Chi-Deux

Nombre d'observations de chacun des échantillons : 175.

X_i : variable observée
 Z_i : variable centrée réduite
 n_i : effectif observé
 F_i : fréquence théorique
 N_i : effectif théorique

Durée opératoire sur montage (histo b figure 31.10)

Hypothèse : distribution normale - moyenne 30 - écart-type 3

Z_i		X_i		n_i	F_i	N_i
-infini	-1.33	-infini	26	18	0.09	15.75
-1.33	-0.67	26	28	26	0.16	28
-0.67	0	28	30	46	0.25	43.75
0	0.67	30	32	41	0.25	43.75
0.67	1.33	32	34	29	0.16	28
1.33	+infini	34	+infini	15	0.09	15.75

Chi2 = 0.82.

Pour 3 degrés de liberté et 10% d'erreur en cas de rejet, la valeur-seuil
 de la zone de rejet vaut 6.25. 0.82 est inférieur à la valeur-seuil,
 donc on ne rejette pas l'hypothèse de normalité

Figure 31.11

- le modèle lui-même : on s'applique alors à tester la stabilité du modèle face aux aléas, sa résistance face à des cas non prévus.

Dans les deux cas on a besoin de mesurer la représentativité des observations obtenues (et donc de l'information qu'elles fournissent). On cherche notamment à estimer certains caractères de la distribution réelle, tels que la moyenne ou bien la variance.

On peut distinguer, dans ce cadre, deux grandes catégories de techniques, complémentaires l'une de l'autre :

- les statistiques "classiques", qui conduisent à la construction d'intervalles de confiance, de tests d'hypothèses, d'analyse de variance, fonctions disponibles sous le post-processeur de SIMAN (OUTPT). Ces méthodes font appel à des hypothèses fortes concernant les distributions des variables : indépendance, normalité ;
- les techniques qui prennent en compte l'aspect chronologique des observations et ne supposent donc pas l'hypothèse d'indépendance (analyse spectrale, analyse des séries chronologiques...). L'analyse spectrale permet à partir de l'estimation des autocovariances d'estimer la variance de la distribution et de construire un intervalle autour de la moyenne réelle. Ces techniques sont cependant peu faciles d'emploi, OUTPT n'offre que peu de fonctionnalités en ce domaine : nous ne les avons pas utilisées.

Les résultats seront donc étudiés selon les procédés classiques de la statistique. Nous cherchons notamment à constituer des échantillons qui permettent de construire un intervalle de confiance assez "étroit" pour donner une indication précise de la valeur vraie du ou des paramètre(s). On exprimera l'étendue de cet intervalle par $[m - 1/2 m\alpha ; m + 1/2 m\alpha]$, (cf annexe A).

3.1.3.4.1. Les intervalles de confiance

Tout le problème consiste, dans cette méthode, à constituer des échantillons adéquats d'observations :

- indépendants,
- à caractère normalement distribué si possible .

Il suffit cependant que les échantillons soient indépendants et assez nombreux car alors la normalité est induite. D'autre part, l'identité des distributions est garantie par l'utilisation du même modèle de simulation pour l'obtention de tous les résultats. Cela fait, les précautions nécessaires au calcul des estimations déduites des observations issues de simulations, sont remplies.

On utilise couramment trois techniques pour construire de tels échantillons (cf figure 31.12) :

- les **replications indépendantes**. Une replication est une exécution unitaire du programme (un "run"). Chaque exécution, du fait de l'utilisation de générateurs aléatoires, génère un échantillon indépendant des autres.
- le **découpage en blocs**. Les échantillons sont les "paquets" d'observations obtenus par le découpage d'une replication.
- les **points de régénération**. Le système repasse périodiquement par un certain état. Les échantillons sont compris entre deux de ces passages.

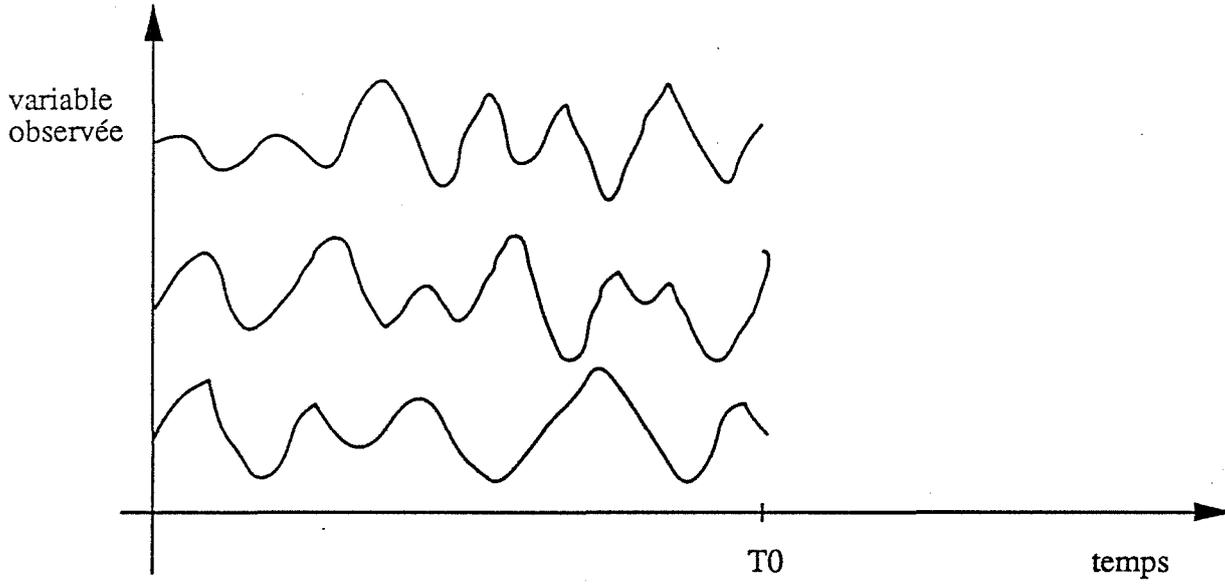
La méthode des points de régénération est difficile à mettre en oeuvre, sauf à prendre l'état "système vide". Or notre modèle n'est pas conçu pour repasser par l'état initial en cours de simulation ; en effet, le plan de charge est calculé pour alimenter "continûment" l'atelier au cours du temps. A moins de largement sous-utiliser les capacités de l'atelier, celui-ci ne devrait pas connaître d'oisiveté complète en cours de période.

La difficulté de la technique des blocs réside dans le choix d'un découpage qui minimise la corrélation entre blocs.

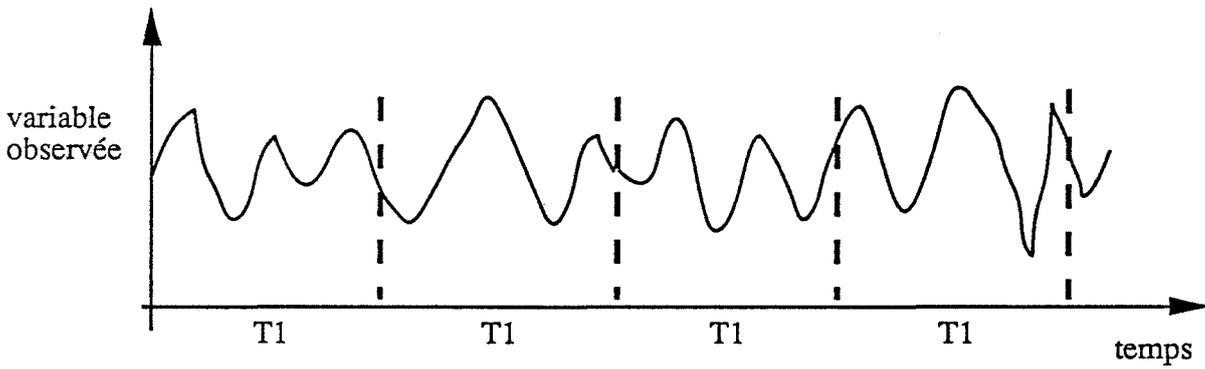
Quant aux replications indépendantes, la difficulté se situe dans la détermination d'une durée de simulation qui permette aux variables d'atteindre leur état stable.

En fait, étant données les conditions de notre simulation, le choix de la méthode des replications s'impose. En effet, notre système ne fonctionne pas vraiment "en continu". Son rythme d'activité est cyclique, en liaison

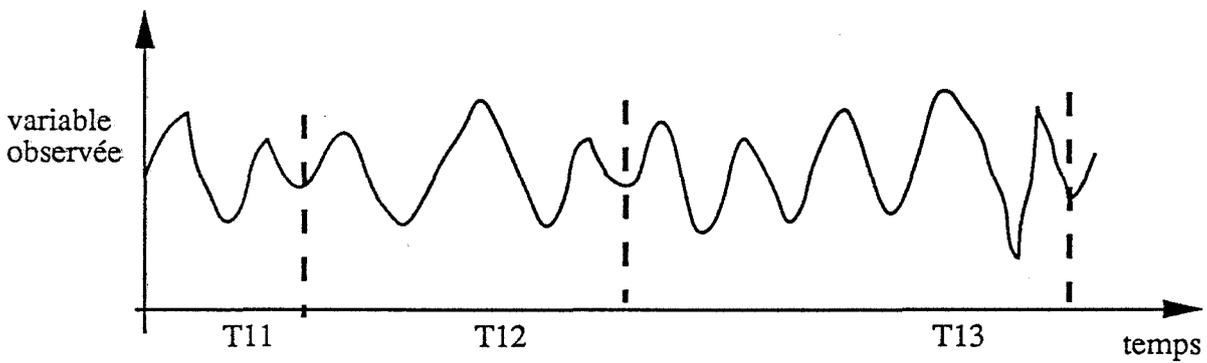
Construction d'échantillons indépendants



Replications indépendantes



Découpage en blocs



Points de régénération

Figure 31.12

avec l'horizon du plan de lancement. Le découpage logique est donc celui des périodes d'activité. Faire des blocs de périodes incomplètes n'aurait pas de sens.

Les courbes de la figure 31.13 illustrent bien le comportement cyclique de l'état de MACSI (en-cours) ainsi que de ses performances (durées de passage des produits) : les statistiques ont été enregistrées sur une durée de simulation de 21 périodes élémentaires pour les durées de passage et de 7 périodes pour les en-cours. Ces statistiques sont issues d'un atelier moyennement chargé (70%) et dimensionné plutôt largement en chariots (7) comme en capacités de stockage.

La question se pose ensuite du nombre de périodes consécutives à simuler, de façon à ce que la variance des observations soit acceptable, compte tenu de la précision désirée sur les intervalles de confiance. La détermination de ces deux paramètres : longueur de simulation et nombre de replications, fait partie de ce que l'on peut appeler le **contrôle de la simulation**.

3.1.3.5. Contrôle de la simulation

Il s'agit :

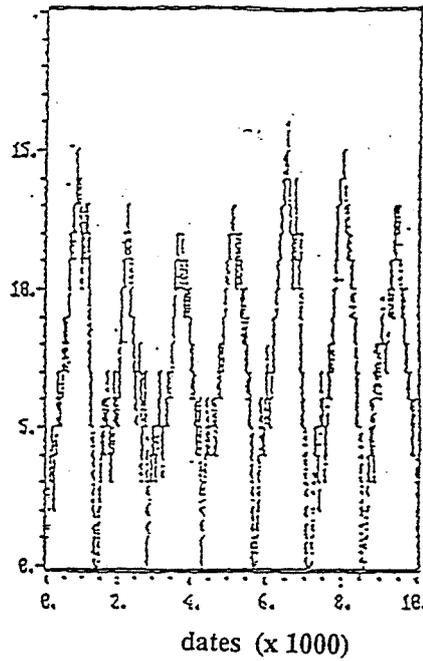
- 1 - de fixer les conditions d'arrêt de la simulation et d'en déterminer la longueur ;
- 2 - de fixer le nombre de simulations à effectuer pour un scénario donné ;
- 3 - d'éliminer des statistiques le biais dû à l'effet "transitoire".

3.1.3.5.1. Compromis entre longueur de simulation et nombre d'échantillons

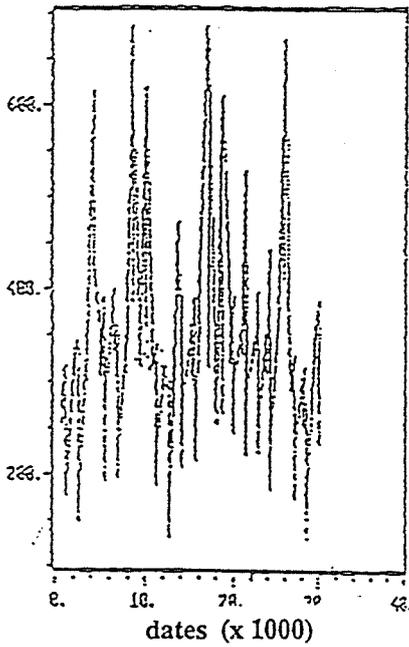
Le nombre d'échantillons (N), représente soit le nombre de replications (méthode des répétitions de simulations), soit le nombre de blocs (méthodes du découpage et du point de régénération). La longueur (L) représente soit la longueur d'une replication, soit celle d'un bloc.

De façon idéale, il faudrait faire des simulations nombreuses et de longue durée (afin d'éliminer le biais initial et de réduire la variance interne à l'échantillon), mais on est limité, en général, par le temps de calcul. Ce dernier

Caractère cyclique des indicateurs de performance de MACSI



Niveau d'en-cours global
(sur 7 périodes élémentaires)



Durée de cycle de la gamme 14
(sur 21 périodes élémentaires)

Durée de cycle de la gamme 5
(sur 21 périodes élémentaires)

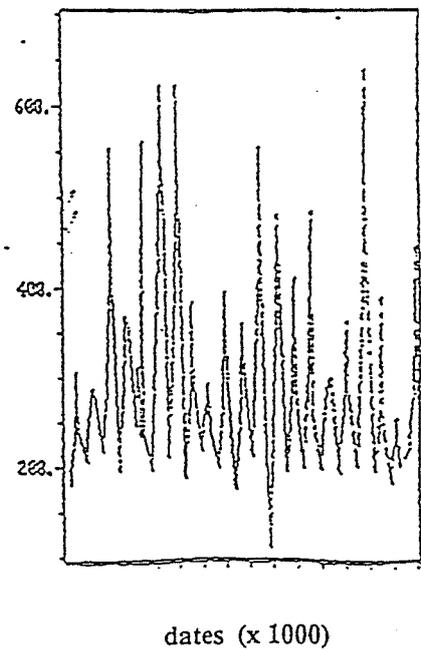


Figure 31.13

étant supposé fixé, on doit donc envisager les cas de figures correspondant à N "grand" et L "petit" d'une part, N "petit" et L "grand" d'autre part.

On considérera que chacun des N blocs ou replications correspond à un échantillon permettant le calcul d'une valeur moyenne expérimentale du paramètre suivi m_i . La précision de ce calcul sera d'autant plus forte que L (la longueur du bloc ou de la replication, en durée) est grand et qu'il intègre des données fiables. Si le nombre d'échantillons est important, et qu'ils sont indépendants, alors la variance de l'estimateur sera d'autant plus faible.

N = nombre de replications (les échantillons sont indépendants)

N petit, L grand : **Le biais** introduit, dans l'estimation de m_i , par les données de la phase transitoire, **est réduit** car on a peu de répétitions de la phase transitoire mais **la variance de l'estimateur est élevée**.

N grand, L petit : cette option conduit à une **réduction de la variance** de l'estimateur, mais une **augmentation du biais** du fait de la répétition de la phase transitoire.

En combinant avec l'une des techniques d'élimination de l'effet "transitoire" (voir plus loin), on devrait cependant pouvoir minimiser les problèmes de biais dus aux conditions initiales.

N = nombre de blocs.

Les blocs sont constitués par un découpage de la simulation en tronçons, décomposition effectuée selon le principe des points de régénération si c'est possible ou bien selon une technique visant à minimiser l'autocorrélation des blocs entre eux. Dans ce cas de figure on peut considérer qu'il n'y a plus de biais initial (il suffit d'éliminer les blocs correspondant à la phase transitoire). Par contre, le problème consiste alors à obtenir des échantillons indépendants.

N petit, L grand : m_i est précis, les blocs sont peu corrélés mais la variance de l'estimateur est importante.

N grand, L petit : m_i est moins précis et les blocs davantage susceptibles de corrélation, donc non indépendants.

Tout le problème consiste à fixer N et L de façon à minimiser ces risques (cf figure 31.14).

Les courbes d'équilibre entre N et L vont avoir sensiblement l'allure de la courbe ci-dessus. L'abscisse varie entre un Lmin, au-dessous duquel on ne peut descendre sans que les résultats de simulation ne perdent leur sens et un Lmax qui correspond à un temps de calcul maximal. L'ordonnée, simultanément, évolue entre un Nmax, nombre maximal d'échantillons de taille minimale que l'on peut faire sans dépasser la contrainte de temps, et un Nmin, égal à 1, qui correspond à l'échantillon composé de la seule simulation de longueur maximale.

3.1.3.5.2. Détermination de la longueur des simulations (condition de terminaison)

Les différentes manières de terminer une simulation [Pritsker 86b], [Fishman 73] :

- * donner une date de fin : le nombre d'intervalles (dans l'éventualité d'un découpage en blocs) est fixé ; par contre, le nombre des observations est alors une variable aléatoire. La variabilité de cette variable, d'un run à l'autre, va introduire un biais dans toutes les estimations qui en tiennent compte (temps d'attente moyen des lots, par exemple).

- * fixer un nombre d'entités à traiter : ce sont alors les longueurs de simulation qui varient, introduisant un biais dans les estimations utilisant les durées (taux d'utilisation,...) ; il faut en outre s'assurer que les entités restant dans le système sont

Compromis entre longueur de simulation et taille de l'échantillon

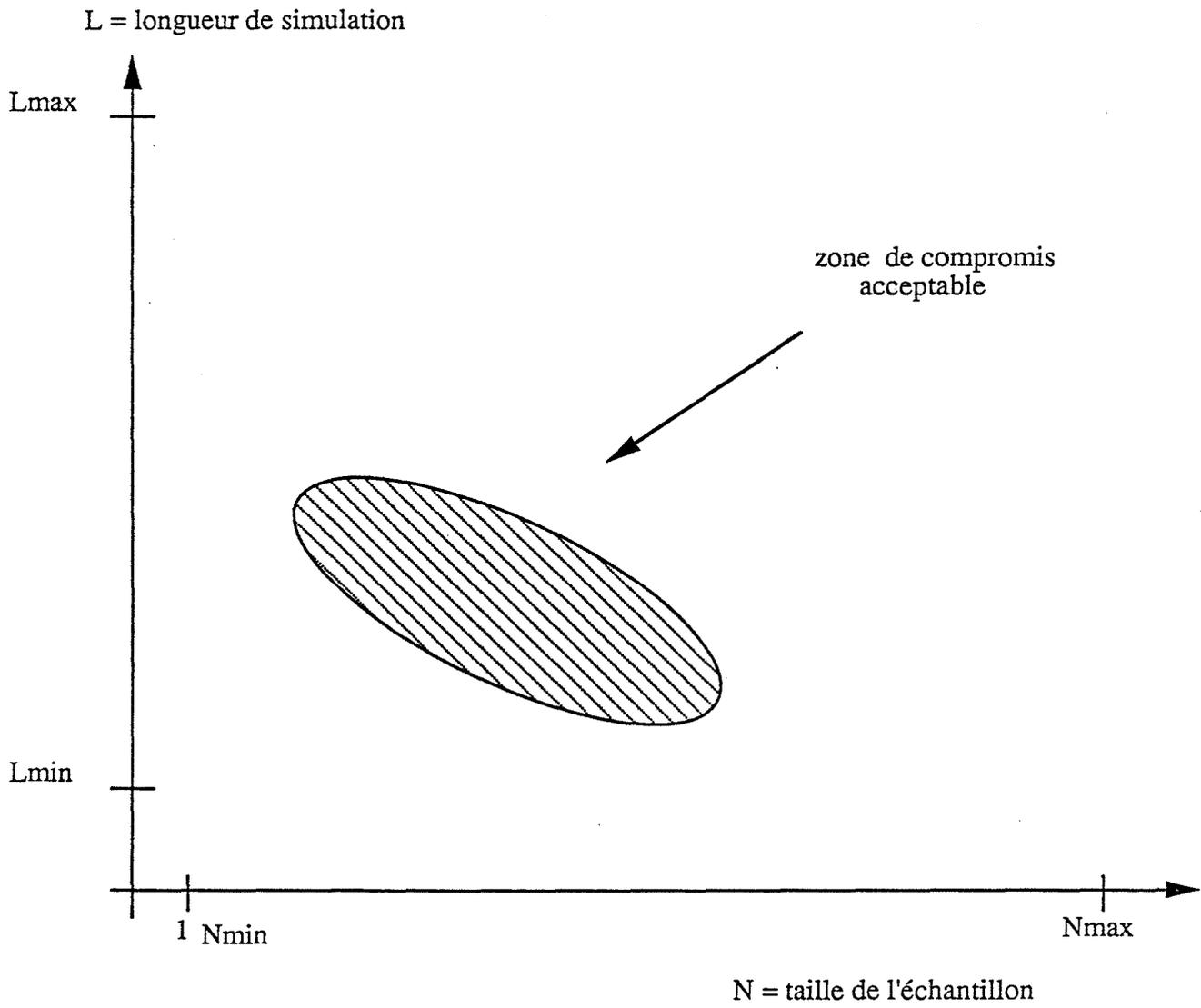


Figure 31.14

représentatives de l'ensemble (afin d'éviter de tirer des conclusions générales sur des coïncidences).

* fixer un niveau de précision à atteindre sur l'estimation de la moyenne : au fur et à mesure que la simulation se déroule, l'intervalle de confiance est recalculé. On s'arrête lorsque l'estimation est assez précise.

Dans la pratique, la troisième méthode est rarement implantée, parce qu'elle demande un temps de calcul important. Concernant l'étude de systèmes de production, il paraît plus naturel d'arrêter la simulation au bout d'un temps, fixé a priori, et correspondant à un certain nombre de "périodes élémentaires" de fabrication.

3.1.3.5.3. Calcul de "N", taille de l'échantillon

Le nombre de simulations nécessaires, N, augmente avec :

- l'accroissement de la dispersion de X, la variable observée,
- la réduction de la largeur désirée de l'intervalle de confiance,
- l'accroissement du degré de confiance souhaité.

N doit être suffisamment élevé, de façon à ce que l'intervalle de confiance soit assez resserré autour de la moyenne. Kleijnen [Kleijnen 87] montre qu'on peut fonder le choix de N sur la formule suivante, dans laquelle N_0 (effectif initial) et s_{0X} (variance estimée initiale) sont réactualisés par itérations successives :

$$N_k = \text{ENT} \left\{ \left[\frac{(T_{N_{k-1}-1})^{a/2}}{c} \right]^2 * (s_{X_{k-1}})^2 \right\}$$

avec c = demi-largeur désirée de l'intervalle de confiance,
 $(T_{N_{k-1}-1})^{a/2}$ = variable de Student, à N_{k-1} degrés de liberté,
 a = degré de confiance,
 $(s_{X_k})^2$ = estimation de la variance de l'échantillon .

On suppose que X est une variable normalement distribuée.

L'auteur lui-même précise que d'un point de vue rigoureux la formule est fautive puisque N est devenue une variable aléatoire, dépendant de l'estimateur de la variance s_x^2 . Dans la pratique, cependant, elle donne des résultats tout-à-fait satisfaisants⁵.

En fait, pour la suite de notre étude, nous n'avons pas réellement besoin de procéder à l'estimation des paramètres des phénomènes. Nous nous attachons à intégrer dans l'analyse le caractère aléatoire des résultats en travaillant sur l'ensemble de l'échantillon et non sur une valeur unique telle que la moyenne, par exemple. On a utilisé cette procédure afin d'obtenir des données de qualité et en nombre suffisant.

3.1.3.5.4. La période transitoire

Le délai de "chargement" du système, avant qu'il n'atteigne son état stable (steady-state), constitue la période transitoire (transient period), qui va fausser l'analyse sur le fonctionnement "en charge" du système.

Trois méthodes permettent de remédier à cet inconvénient [Fishman 73], [Kleijnen 87] :

- se donner un état initial (nombre et position des entités dans le système, status de ces entités, des serveurs, des ressources) correspondant à un état possible du régime permanent ;
- faire des simulations suffisamment longues pour atténuer l'effet de l'initialisation ;
- détruire les premières données.

La première solution présente l'avantage de contrôler les conditions de départ, mais elle est délicate à mettre en oeuvre car un système peut être caractérisé par un nombre de variables d'état très important et plus ou moins faciles à repérer.

⁵ "In practice it often works, which is substantiated by a number of statistical studies. These studies prove analytically that when s_x^2 is updated after each additional observation, then for large sample sizes the equation is consistent and efficient." in [Kleijnen 87], pp47, 48.

La seconde solution pose le problème du temps de calcul et de la détermination de la longueur de la simulation.

La dernière solution, souvent adoptée, repose sur la détermination du point de troncature des données, c'est-à-dire la longueur de la phase transitoire.

Il n'existe pas de méthode pour procéder à cette opération ; on utilise les courbes de valeurs et on tronque la partie des données qui, d'après l'allure de la courbe, correspond à la montée en régime du système (cf figure 31.15).

Mais : une surestimation de la période transitoire conduit à un élargissement de l'intervalle de confiance autour de la valeur estimée car il est calculé sur un nombre réduit d'informations ;

une sous-estimation de cette période conduit, elle, à l'introduction d'un biais dans les résultats par la prise en compte de valeurs non significatives.

Dans le cas de MACSI, le comportement des caractéristiques de l'atelier est cyclique, de façon plus ou moins parfaite selon la charge et le dimensionnement imposés à l'atelier. Il n'y a donc pas véritablement de phase transitoire puisque le régime permanent est cyclique. Cependant, par mesure de sécurité et souci de réalisme, on ne démarre pas "système vide" ; on élimine des statistiques les valeurs issues de la première période de production, qui incorporent le démarrage du système et risquent donc d'être un peu biaisées par rapport aux autres.

3.1.3.5.5. Application : détermination de L (longueur de simulation) et de N (nombre de simulations).

C'est à partir d'une configuration d'atelier assez standard mais choisie de façon à ne pas poser de problèmes que l'on détermine les valeurs de L et de N qui seront utilisées dans toute la suite.

Troncature des données

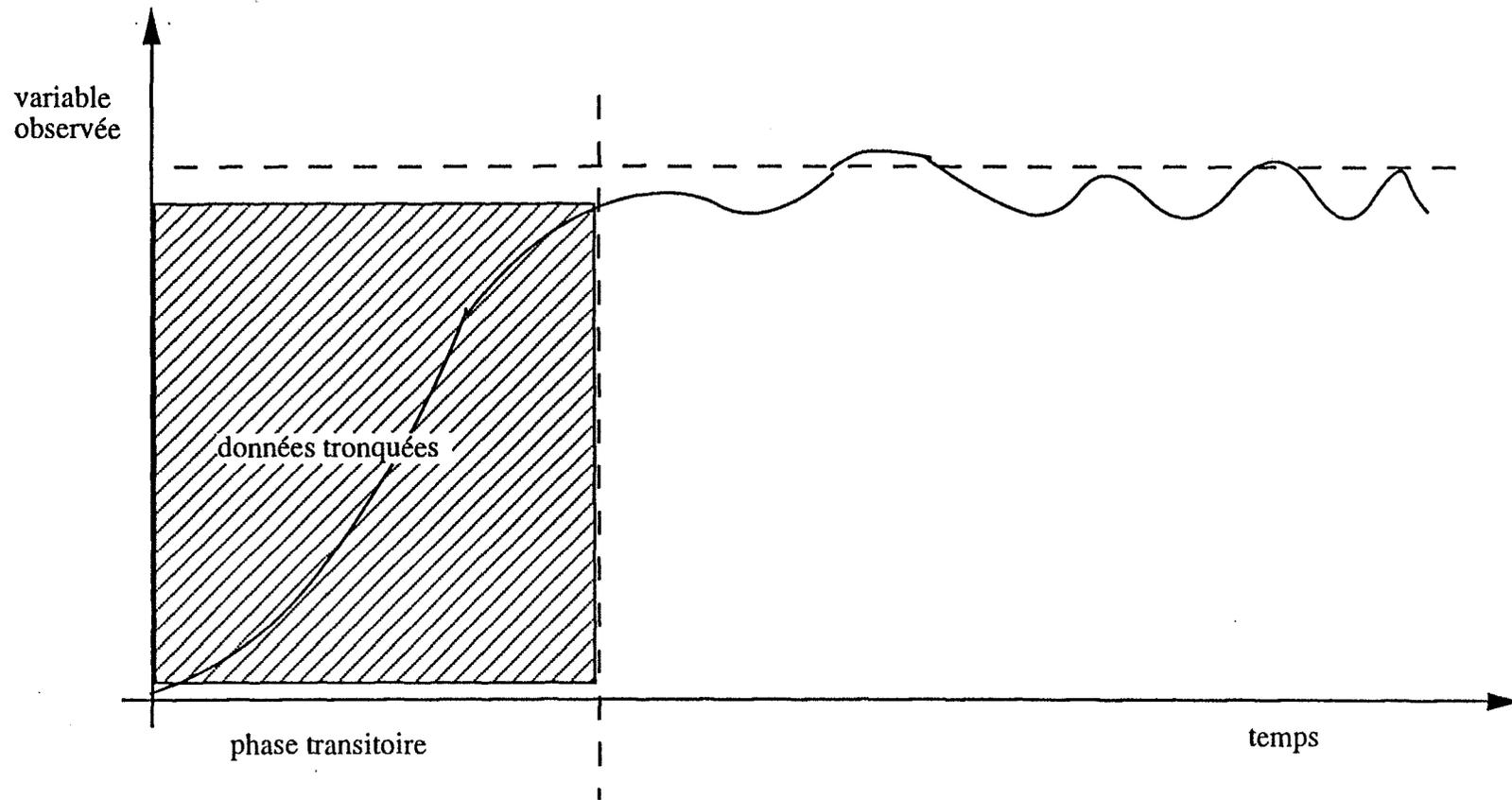


Figure 31.15

Conditions expérimentales

Les tests ont été effectués sur l'atelier suivant :

- plan de fabrication composé de 10 gammes : g1, g2, g3, g4, g5, g7, g14, g18, g19, g21 (cf annexe D) ;
- volume de production représentant une charge de 70% pour la machine la plus chargée ;
- volume global réparti uniformément entre toutes les gammes ;
- taille des lots = 1 palette (16 pièces) ;
- lancements effectués uniformément au cours de la période de fabrication ;
- larges capacités de stockage en amont des machines ;
- gestion FIFO des stocks ;
- 7 chariots ;
- vitesse des chariots = 60 m/min.

Les paramètres de contrôle, d'abord L puis N, sont déterminés par l'analyse de plusieurs variables de performance : en-cours du système et durées de passage des gammes 1 à 5.

Longueur de simulation

On observe l'évolution des six variables citées ci-dessus au cours de simulations, très longues, de 50 périodes élémentaires de 1440 min, soient 72000 min (cf les 2 ensembles de courbes de la figure 31.16).

Sept simulations identiques sont effectuées avec des générateurs aléatoires différents. Le calcul des statistiques est actualisé à la fin de chaque période élémentaire. Les résultats des sept simulations, au début très dispersés, se stabilisent à partir de 6 à 10 périodes, selon les variables. Cette durée est nécessaire à l'atténuation de l'effet de la phase transitoire sur les résultats. On atteint alors un état, sinon stationnaire, car les courbes ont une tendance à la croissance, du moins stable dans cette tendance.

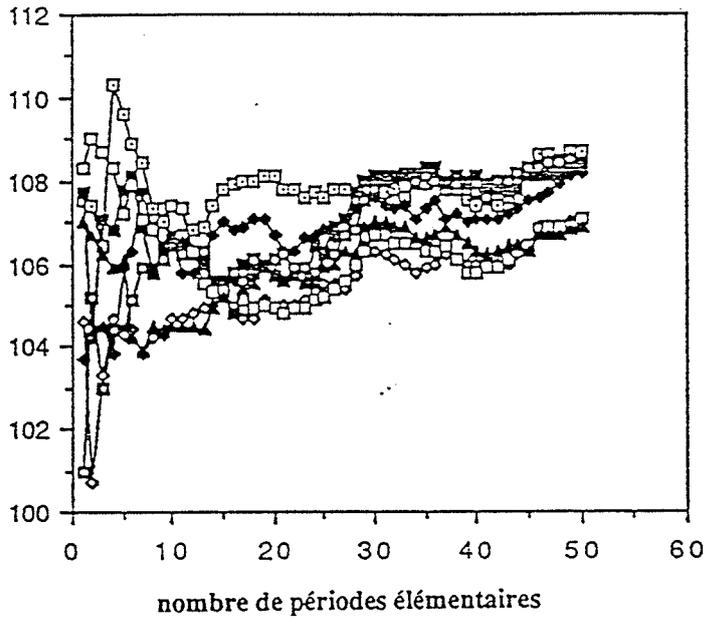
Nous prenons, dans un premier temps, la durée la plus faible autorisée, **L=8640** (6 périodes) car les durées de simulation sur ordinateur ne sont pas négligeables (entre 2 et 3 minutes pour une simulation de 8640 min

Détermination de L

un run = 50 périodes de 1440 min

7 courbes = 7 simulations, de 50 jours,

identiques au générateur aléatoire près



Durée de passage dans l'atelier
gamme 5

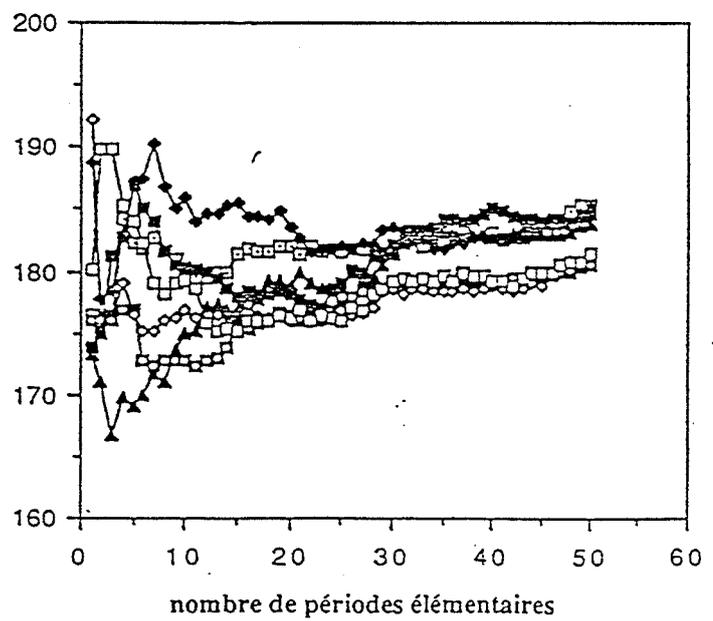


Figure 31.16

simulées sur compatible IBM/PC 386). Il est intéressant de prendre une petite longueur de simulation, à condition, bien sûr, que cela ne conduise pas à la détermination d'une taille d'échantillon trop importante.

Taille de l'échantillon

Considérons tout d'abord un échantillon initial de taille 4 ($N_0=4$), soit quatre simulations identiques aux générateurs aléatoires près.

Les valeurs observées sont alors les suivantes :

	sim1	sim2	sim3	sim4
- en-cours :	6.38	6.48	6.2	6.34
- durée gamme 1 :	80.4	83	75.7	79.8
- durée gamme 2 :	122.1	121.2	115	122.2
- durée gamme 3 :	108.9	106.3	105.1	104.4
- durée gamme 4 :	152.2	151.5	147.6	143.9
- durée gamme 5 :	181.8	187.5	172.7	175.1

La formule de Kleijnen, appliquée à ces observations avec $c = 0.1 \cdot \text{moyenne}$ et $a=0.1$ donne les résultats suivants (arrondis à la valeur entière immédiatement supérieure) :

- en-cours :	N = 1
- gamme 1 :	N = 3
- gamme 2 :	N = 3
- gamme 3 :	N = 1
- gamme 4 :	N = 3
- gamme 5 :	N = 4

La taille d'échantillon requise ($N=4$) est peu élevée, malgré la faible durée de simulation.

Par mesure de prudence, nous constituerons des échantillons de taille légèrement supérieure au résultat du calcul : $N = 5$, pour une durée $L = 8640$.

3.1.4. Synthèse du chapitre

Avec MACSI nous avons modélisé un atelier constitué d'un poste de palettisation, de deux cellules d'usinage et de deux autres postes de travail ainsi que d'un système de transport automatisé par chariots filoguidés. La production a été regroupée en familles de produits selon 25 gammes-type. Les entités-palettes utilisent les ressources "machines" et "robots". Les entités-chariots utilisent les ressources "cantons" et "tronçons".

La période élémentaire de simulation est la journée (1440 min), pour laquelle est établi un fichier de lancement par lots. Des observations concernant l'état et les performances du système sont enregistrées en fin de simulation.

Pour des raisons de validité des résultats, la durée de chaque simulation est fixée à 8640 min, soient 6 périodes de 1440 min. Les résultats de la première période ne sont pas pris en considération dans les statistiques, qui sont par conséquent calculées sur 7200 min. Chaque scénario de simulation est en outre répété cinq fois, à partir de générateurs de nombres aléatoires différents.

On dispose, sur le modèle élaboré, de degrés de liberté concernant sa configuration. Pour être utilisable, MACSI, en effet, doit être paramétré en termes :

- 1) de définition de l'ensemble des gammes à produire ;
- 2) de charge d'atelier ;
- 3) de répartition de la production suivant les gammes ;
- 4) de taille des lots ;
- 5) de cadence de lancement des lots ;

- 6) d'ordonnancement du plan de fabrication ;
- 7) de nombre de cfg ;
- 8) de vitesse des cfg ;
- 9) de capacités de stockage ;
- 10) de règles de gestion des stocks-machines.

L'ensemble de ces 10 paramètres, positionnés à certaines valeurs, constitue un scénario de simulation.

A l'issue de chaque simulation, des résultats sont enregistrés. Ils concernent :

- l'en-cours global de l'atelier ;
- les durées de passage des gammes ;
- les niveaux des stocks amont et aval des machines ;
- l'engagement des machines et des chariots.

Ces résultats constituent les performances de l'atelier. La taille de cet ensemble est variable : le nombre des variables observées dépend des gammes et des équipements mis en jeu par le scénario qui guide la simulation.

On appelle "expérience" l'ensemble des simulations effectuées à partir d'un même scénario, au générateur aléatoire près. Une expérience est résumée par l'ensemble des couples { ([scénario], [performances]) }.

Nous verrons dans le chapitre suivant comment combiner les paramètres des scénarios de façon à exploiter efficacement les résultats fournis par les simulations.

3.2. CONSTRUCTION D'UNE CAMPAGNE DE SIMULATIONS

Toute expérience scientifique est construite de façon à favoriser l'observation de phénomènes donnés, sous certaines hypothèses. C'est l'objectif final qui guide le montage de l'expérience. Il en va de même en simulation.

Dans la section 3.2.2 de ce chapitre nous verrons comment organiser des plans d'expériences suivant le type d'observation recherché. Nous présenterons le module de génération automatique de plans de simulations (GAPS) associé à MACSI dans la section 3.2.3. Toutes les questions relatives à l'exploitation des résultats sont, quant à elles, regroupées dans la troisième partie. La figure 32.1 replace ces phases dans le processus général de simulation.

3.2.1. Pourquoi procéder par campagnes de simulation

3.2.1.1. Des questions multi-critères

Quels sont les objectifs visés par l'exploitation d'un modèle comme MACSI ? Le concepteur de systèmes de production cherche à répondre à des questions du type :

- "Pour un contexte de production donné, quelles sont les combinaisons "capacité transport/capacité stockage" les plus performantes ?",
- "Y-a-t-il, au contraire des configurations à banir ?",

ou bien encore

- "Pour quels plans de fabrication, l'atelier est-il performant ?",
- "Quel est l'impact de la taille des lots ou du niveau de charge sur les résultats ?".

Etape exploitation

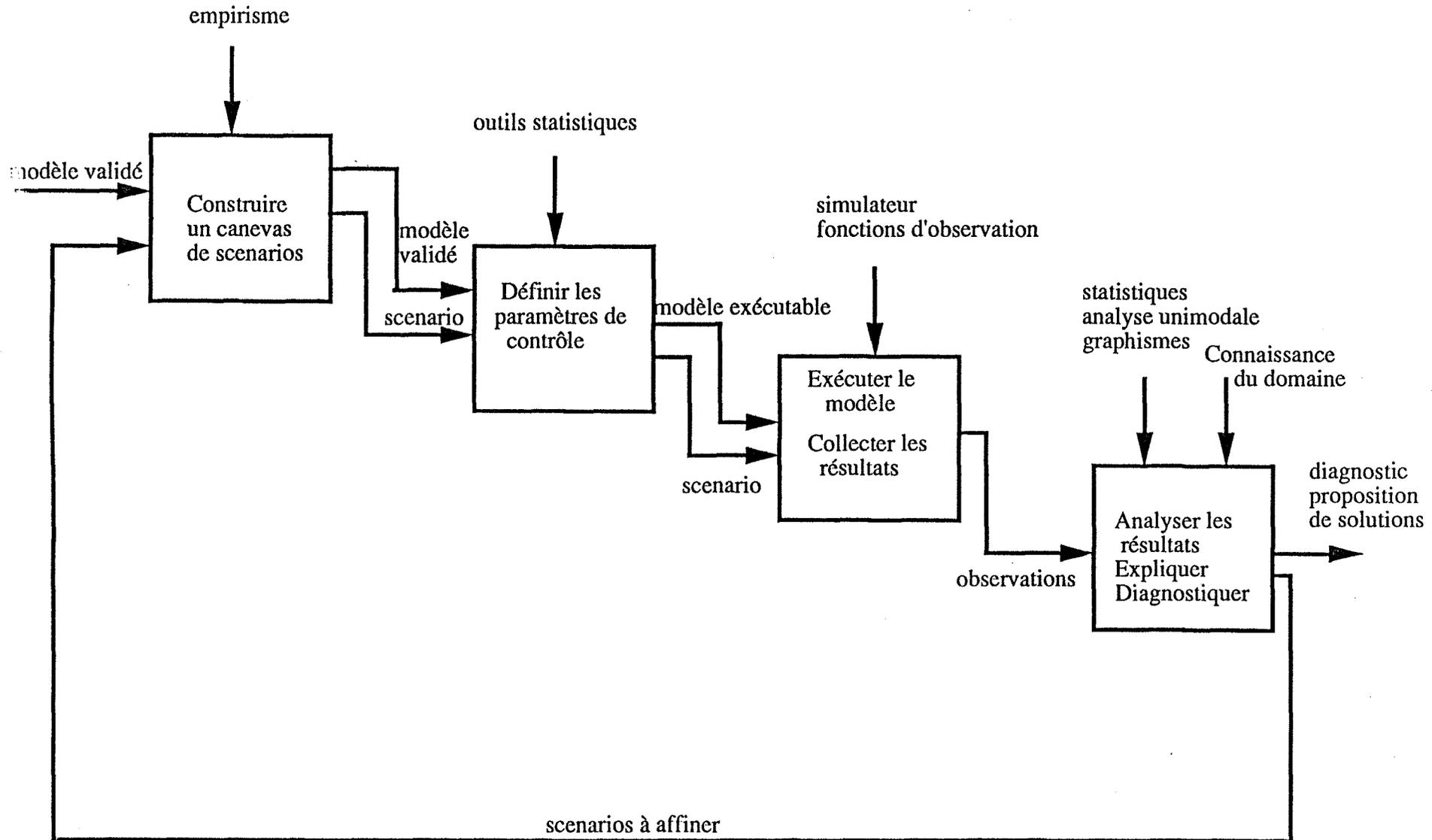


Figure 32.1

Ces questions visent à mesurer l'influence des choix en matière de dimensionnement ou de gestion sur les **performances** de l'atelier. Nous avons vu plus haut (paragraphe 2.1.2.3) que la notion de performance recouvrait en fait un ensemble de critères d'évaluation.

Nous avons fait le choix de nous efforcer de fournir des ensembles de réponses satisfaisantes au regard de critères multiples de performance plutôt qu'une solution optimale mais unique. L'élaboration de telles réponses suppose l'étude de cas nombreux et variés ainsi qu'une exploitation multi-facteurs et multi-variables de l'ensemble-performances. C'est pour disposer d'un tel échantillon de cas que nous procédons par campagnes de simulation.

3.2.1.2. Définition d'une "campagne"

Afin de prendre les "bonnes" décisions, de faire des choix définitifs pertinents, il importe de bien connaître le comportement de l'atelier. La simulation permet précisément d'expérimenter toutes sortes de configurations d'ateliers. Nous allons donc **simuler pour comprendre** les mécanismes qui président au fonctionnement du système ; à cette fin les simulations seront organisées par campagnes.

Nous avons maintenant construit un modèle SIMAN de MACSI prêt à être exécuté, chaque simulation étant la réalisation d'une expérience d'un **atelier expérimental**. Un atelier expérimental est caractérisé par un ensemble de **facteurs** (les entrées) fixés à certaines valeurs - ils constituent le scénario - et fournit un ensemble de **réponses observées** (les sorties), qui composent les performances.

$$\text{Expérience} = [(\text{Scénario}) , (\text{Performances})]$$

Le vecteur (Performances) représente le comportement du système face à l'activation du vecteur (scénario). Nous avons vu plus haut (paragraphe 2.2.2.3) que ces deux vecteurs suffisaient à décrire une expérience, le modèle et la plupart des composants du cadre expérimental ne variant pas.

Nous appelons **campagne de simulations** l'ensemble des expériences réalisées à partir d'un ensemble donné de scénarios, donc de combinaisons des facteurs, organisé de façon à répondre à un objectif précis.

$$\text{Campagne} = \{ \text{Expériences} \}$$

Le modèle sera utilisé au travers de campagnes de simulations.

3.2.2. Elaboration d'un plan de simulation

Une campagne de simulation est caractérisée par les combinaisons de facteurs qu'elle fait intervenir et dont l'ensemble est appelé **plan de simulation**. Le terme de "plan" induit une notion d'"objectif" sous-jacent. En effet, le plan définit les scénarios à expérimenter, de telle sorte qu'ils permettent d'observer les phénomènes désirés. On trouve aussi cette notion sous l'appellation de "cadre expérimental" ; dans [Elzas 86], "the experimental frame defines a set of circumstances under which a model of the real system is to be observed and experimented with". Le choix des facteurs est déterminé par la question à résoudre.

Le plan guide la conduite de la campagne.

exemple : pour observer l'influence de la gestion des stocks machines sur les résultats, on construira un ensemble de scénarios combinant diverses règles de gestion de stock et capacités de stockage.

3.2.2.1. Les techniques existant pour la mise au point d'un plan

Construire un plan d'expériences (ou de simulations), c'est engendrer des changements sur les entrées du modèle - chaque facteur prenant un certain nombre de niveaux, quantitatifs ou qualitatifs - de façon à apprendre le plus possible à partir des réactions enregistrées en sortie.

Les techniques de construction de plans [Kleijnen 87], [Delaney 89], [Balci 85] sont surtout utilisées pour des problèmes liés à la "Qualité" (plans d'expériences). Nous allons voir comment ces méthodes sont

exploitables en simulation puis nous détaillerons une méthode utilisée pour éviter l'explosion combinatoire : le Test Systématique Partiel [Canals 86].

La campagne de simulations doit être élaborée de façon à ce que l'analyse des expériences puisse :

- Aider à déterminer un ensemble de **sorties pertinentes** (les indicateurs de performance) ;
- Mettre en évidence les **facteurs les plus influents** ;
- **Caractériser** le vecteur-performance $[Y_i]$ par des relations entre les Y_i ;
- **Expliquer** une performance $[Y_i...Y_m]$ à l'aide des facteurs $[X_1...X_p]$.

Nous envisageons d'apporter des éléments de résolution de ces divers points à l'aide de techniques d'**analyse de données** et d'**analyse de la variance**. Pour obtenir une pertinence maximale des conclusions, il faut que les essais pratiqués permettent de tester tous les effets désirés et que l'ensemble des expériences constitue un échantillon "équilibré". La question qui se pose à ce stade est celle d'une construction "propre" et "efficace" d'une campagne de simulation. Elle se décompose, en fait, en deux sous-problèmes :

- celui de la "pertinence" du plan (ce qu'on pourrait appeler "validité sémantique") par rapport aux objectifs que l'on s'est assignés. Les facteurs doivent être combinés de telle sorte qu'ils permettent d'observer tous les effets à tous les niveaux souhaités.
- celui de la "validité" du plan, qui va déterminer le degré de confiance que l'on peut accorder à l'exploitation de ses résultats. Il s'agit du "dosage", de l'"équilibre" des scénarios, de façon à éviter que des effectifs trop disparates des modalités testées ne conduisent à fausser les comparaisons et donc les conclusions.

3.2.2.1.1. Plans d'expériences

Il existe trois principaux types de plans [annexe C], [Vigier 88], [Cohen 89] :

- 1 facteur à la fois ;

- plan factoriel complet ;
- plan factoriel incomplet/plans fractionnaires.

La première méthode, qui fait varier les facteurs un à un, est grossière car elle ne prend pas en compte les effets d'interaction entre facteurs.

L'idéal serait de composer tous les scénarios possibles à partir de toutes les combinaisons des facteurs à leurs différents niveaux : c'est ce qu'on appelle le plan factoriel complet. Il offre la possibilité de tester toutes les interactions entre facteurs mais pose le problème de l'explosion combinatoire du nombre d'essais à mettre en oeuvre. Avec seulement 4 facteurs à 5 occurrences, il faudrait déjà 625 scénarios à répéter chacun plusieurs fois afin de s'affranchir de l'effet des facteurs non contrôlés. A raison d'environ 3 min de simulation par scénario unitaire, on voit que la moindre expérimentation demanderait des journées de temps de calcul.. sans compter la place-mémoire nécessaire au stockage des résultats.

La dernière approche, enfin, permet l'investigation de plusieurs facteurs avec un nombre réduit de simulations. On peut citer les plans de type Box-Behnken, les carrés latins, les plans en blocs, les plans randomisés... et les tables orthogonales de Taguchi [Vigier 88], [Cohen 89].

En ce qui concerne la simulation, les facteurs contrôlés sont généralement nombreux et l'éventail des valeurs à tester assez large. Le nombre de combinaisons "facteurs" par "niveaux" est trop important pour envisager un plan factoriel complet. C'est pourquoi nous utiliserons une forme de plan incomplet : le plan randomisé (ou aléarisé) ; les scénarios sont tirés au hasard.

Les plans d'expériences sont nécessaires parce qu'ils permettent de définir (en forme, en qualité, en taille) des échantillons à recueillir qui autoriseront une exploitation large, multi-facteurs et multi-variables. Cependant, ces techniques, faciles à mettre en oeuvre (avec les tables de Taguchi, par exemple) lorsque tous les facteurs ont 2 ou 3 modalités, deviennent d'un maniement plus complexe dans les autres cas.

De notre investigation des techniques de plans d'expérience, nous retiendrons le principe du plan randomisé et l'impératif de respecter l'équilibre entre les modalités des facteurs.

3.2.2.1.2. Le test systématique partiel

Afin de pallier au problème combinatoire, D. Canals [Canals 86] propose dans sa thèse la méthode du **Test Systématique Partiel**, qui se compose de **deux procédures** essentielles.

En préalable, les paramètres de modélisation (ou facteurs) sont agrégés en familles afin d'en réduire le nombre. Comme le nombre de paramètres est encore trop important pour un plan factoriel complet, on les rassemble en groupes. Une valeur standard est définie pour chacun des paramètres.

Une première procédure consiste en une **variation quasi-systématique** des paramètres : lorsqu'on choisit de tester un groupe, tous les composants de tous les autres groupes sont fixés à leur valeur standard ; à l'intérieur du groupe, on adopte le plan factoriel complet.

La seconde procédure est celle du **repérage des paramètres discriminants** à l'aide d'algorithmes d'analyse discriminante. On pourra ainsi reprendre de nouveaux tests en faisant varier seulement les paramètres discriminants.

3.2.2.2. La méthode retenue : le plan randomisé sur Test Partiel

La méthode de construction d'échantillons que nous avons adoptée est inspirée du Test Systématique Partiel. Nous en suivons les directives quant à l'organisation des facteurs en groupes thématiques. En revanche, compte tenu d'un nombre assez élevé de modalités par facteur dans notre cas (les facteurs sont détaillés plus loin), le plan factoriel complet n'est pas envisageable. Nous adoptons à l'intérieur de chaque groupe un mode de variation par plan randomisé, c'est-à-dire par tirage aléatoire de scénarios.

3.2.2.2.1. Les facteurs du plan - Variation par groupe

L'ensemble des caractéristiques du modèle susceptibles de faire l'objet d'un choix est répertorié ; celles-ci sont considérées comme les facteurs du modèle.

Ainsi, la construction d'un atelier expérimental nécessite la configuration de dix caractéristiques de MACSI (cf paragraphe 3.1.4) :

- 1) **ensemble des gammes à fabriquer**

Il s'agit d'un sous-ensemble des gammes présentes dans le fichier GAMME (annexe E). Le choix de ces gammes définit un **type d'utilisation de l'atelier** de par les machines, stocks et trajets de chariots mis en jeu ;

- 2) **répartition de la production entre les gammes**

Les volumes de production à réaliser pour chacune des gammes s'expriment en pourcentage du volume global, ce sont les **ratios de production** ;

- 3) **charge de l'atelier**

Il s'agit de la charge de la machine la plus chargée pour le plan de fabrication choisi ;

- 4) **ordonnancement du plan de fabrication**

Il s'agit de la séquence d'introduction dans l'atelier des gammes sélectionnées par le facteur (1) ;

- 5) **taille des lots**

Lesancements sont effectués par lots de pièces, qui sont ensuite réorganisés en palettes. La taille des lots est exprimée en nombre de pièces, multiple ou non de la taille de la palette ;

- 6) **cadence de lancement des lots**

La cadence "de base" est telle que lesancements soient répartis uniformément au cours de la période de simulation. Cette cadence peut être accélérée selon un coefficient multiplicateur ;

- 7) **nombre de cfg ;**

- 8) **vitesse des cfg ;**

- 9) capacités de stockage des machines

Il s'agit d'une combinaison des capacités de l'ensemble des stocks amont et aval des machines, qui produit une **configuration de stockage**, dont on peut supposer qu'elle doit être en harmonie avec le système de transport, facteurs (7) et (8) ;

- 10) règle de gestion des stocks-machines

Il s'agit de la règle de sélection des palettes présentes en stock amont des machines.

Ces dix facteurs sont les dix degrés de liberté dont on dispose sur le modèle, compte tenu de l'ensemble des contraintes (implantation et nombre des machines, tracé du réseau de transport,...). Chacun d'eux est susceptible de prendre entre 2 et 9 modalités. Le plan factoriel complet est, bien entendu, exclu. De toutes façons, les résultats issus de la variation simultanée de tous les facteurs seraient très difficiles à exploiter et interpréter, en raison de la multiplicité des effets d'interaction entre facteurs.

Les dix facteurs représentent un potentiel de génération d'ateliers expérimentaux. Les scénarios, quant à eux, sont construits en fonction de l'objectif recherché. Ils ne font intervenir qu'un **sous-ensemble de facteurs**, que l'on dira **actifs**, de façon à déboucher sur une exploitation efficace. Les facteurs actifs sont choisis en fonction de la nature du problème. On évitera de mettre simultanément en oeuvre plus de quatre facteurs actifs car alors les effets d'interaction sont trop nombreux et les résultats difficiles à interpréter.

Ces facteurs touchent à des aspects relativement distincts de la conception d'atelier et peuvent facilement être regroupés par thème pour ensuite faire l'objet d'une procédure de **test partiel et randomisé**.

Nous avons regroupé les facteurs par catégories de préoccupation, les plus indépendantes possible entre elles.

Nous distinguons finalement trois ensembles sémantiquement cohérents :

- Un premier groupe touche à la définition-même de l'atelier : que va-t-il produire (quels produits) et en quelles quantités (charge globale de l'atelier et répartition de la production entre les différents produits). Ces paramètres sont rassemblés en un seul groupe car ils sont

sémantiquement très liés entre eux. Ils définissent un type d'atelier. Ces options ont une périodicité de remise en cause assez faible.

T (Type de production) regroupe les facteurs

- T1 : type d'atelier,
- T2 : ratios de production,
- T3 : charge de l'atelier ;

- Le deuxième groupe est concerné par les questions de gestion d'atelier et d'ordonnement. De même que pour les facteurs précédents, ces questions sont du domaine de la gestion de production, mais l'horizon sur lequel elles portent est beaucoup plus court.

O (Ordonnement-Lancement) regroupe les facteurs

- O1 : ordonnancement,
- O2 : taille des lots,
- O3 : cadence de lancement ;

- Le troisième groupe touche au domaine du fonctionnement des équipements de l'atelier. Il concerne des investissements lourds qui, a priori, ne seront pas remis en cause.

F (Fonctionnement-Dimensionnement) regroupe les facteurs

- F1 : nombre de chariots,
- F2 : vitesse des chariots,
- F3 : configuration de stockage,
- F4 : règle de gestion des stocks.

Chaque groupe agit à un niveau de gestion du système, et donc à un horizon, différent. Afin d'observer le comportement du système sous un certain angle, on fait évoluer les composants du groupe concerné en maintenant les autres à des valeurs qualifiées de "standard". C'est le principe du **test partiel**.

Cette approche, outre son aspect de structuration des données, présente l'avantage de ne pas demander l'activation de plus de quatre facteurs à la fois (puisque chaque groupe comprend au maximum 4 facteurs). On peut, bien sûr, appliquer le même principe à des facteurs de groupes différents si les questions à résoudre font intervenir des facteurs d'appartenances hétérogènes.

3.2.2.2.2. Un plan "randomisé"

Avec trois ou quatre facteurs par groupe et environ cinq modalités par facteur, le plan factoriel complet comprendrait de 125 à plus de 500 scénarios, exécutés N fois chacun pour des raisons de validité (N a été fixé à 5, cf chapitre 3.1). Il conduirait donc à la simulation d'au moins 1000 expériences, de 2 ou 3 minutes chacune, ce qui nous pose des problèmes de temps-machine, de place-mémoire ... et de manipulation par éditeur du fichier des résultats (trop volumineux) ! Or il n'est pas nécessaire de simuler toutes les combinaisons pour mesurer les effets de tous les facteurs donc nous travaillerons sur des plans partiels, construits selon la technique des plans randomisés.

L'ensemble de toutes les combinaisons de toutes les modalités des facteurs actifs définit un espace potentiel d'expériences (qui correspond au plan factoriel complet). Le **plan randomisé** est formé d'éléments tirés au hasard dans cet ensemble, de telle sorte que toutes les modalités soient représentées avec des poids comparables.

3.2.2.2.3. Les indicateurs

Il s'agit de définir les fonctions à observer, les mesures représentatives de ces fonctions (grandeurs physiques, pourcentages, codages,...), ainsi que la cible visée (valeur nominale, minimale, maximale).

Mesurer les performances, c'est observer le comportement du système au travers d'un certain nombre d'indicateurs qui réalisent une certaine agrégation des résultats sur la période de simulation.

D'après [Cavaillé 88], on retient généralement les critères d'en-cours, d'occupation des machines, de niveau de stocks. [Cernault 88] précise qu'il faut retenir la moyenne, l'écart-type, le min et le max de :

- taux d'occupation des machines et autres équipements ;
- taux de remplissage des stocks ;
- temps moyen passé par les machines et autres équipements dans les différents états possibles (marche, panne, famine, saturation par l'aval...) ;
- idem pour les pièces.

En accord avec le modèle du "triangle de performance", les indicateurs que nous avons retenus s'organisent autour des trois pôles : en-cours, occupation des ressources, durées de passage ou d'attente. A ces indicateurs s'ajoute une mesure de performance globale : le volume de production sorti. Les critères sont de différents niveaux de détail :

- des critères généraux :
 - + en-cours global,
 - + taux d'occupation moyen du système de transport,
 - + taux de production global.
- des critères détaillés :
 - + taux de production par gamme,
 - moyenne, max et écart-type :
 - + des durées d'évacuation des stocks-aval,
 - + des durées de passage par palettes,
 - + des durées de passage par lots,
 - + des niveaux de stocks amont et aval,
 - taux d'utilisation moyen et maximal :
 - + des machines,
 - + des stocks amont et aval,
 - + des chariots,
 - + des tronçons.

248 variables de sorties sont ainsi répertoriées dans une première liste [annexe E].

Il faut penser à choisir des indicateurs valables pour toutes les configurations : du relatif plutôt que de l'absolu ; on choisira, par exemple, la proportion de stock utilisée plutôt que le niveau atteint par ce stock.

Nous avons dans un premier temps mesuré beaucoup d'indicateurs pour ne retenir par la suite que ceux qui apportent le plus d'information sur les réactions de l'atelier.

3.2.3. Application : Génération Automatique de Plans de Simulations (GAPS)

Le paramétrage de l'atelier expérimental est effectué en amont de la simulation par un programme d'aide à la sélection des entrées. En effet, chaque simulation est conduite selon les paramètres inscrits dans le fichier CONTEXTE et selon le plan de fabrication indiqué dans le fichier LOT (cf figure 32.2). On s'intéresse ici à la génération "guidée" ou "automatique" de ces deux fichiers.

Le logiciel est ainsi formé de deux modules :

- le module "simulation" proprement dit, modèle de MACSI en SIMAN, dont nous avons parlé plus haut ;
- le module de "Génération Automatique de Plans de Scénarios" (GAPS).

L'organisation des deux modules est présentée figure 32.3. Nous montrons dans la suite comment GAPS réalise le Plan Randomisé avec Test Partiel.

3.2.3.1. Description de GAPS

* GAPS génère automatiquement, à partir des paramètres de la simulation précédente contenus dans le fichier CONTEXTE et du vecteur PLAN (décrit plus loin), un nouveau fichier CONTEXTE qui contient le nouveau scénario et servira à configurer MACSI, et un nouveau fichier LOT des ordres de lancement en fabrication.

Exemple d'un fichier LOT

n° de lot	n° de gamme	taille du lot	date de lancement
1	21	80	-1
2	5	80	-1
3	20	80	-1
4	7	80	-1
5	21	80	-1
6	5	80	-1
7	20	80	-1
8	7	80	-1
9	21	80	-1
10	5	80	-1
11	20	80	-1
12	7	80	-1
13	21	80	-1
14	5	80	-1
15	20	80	-1
16	7	80	-1
17	21	30	-1
18	5	30	-1
19	20	30	-1
20	7	30	-1

Lorsque la date de lancement n'est fixée a priori, elle est mise à -1 dans le fichier LOT et les lots sont alors lancés selon une cadence indiquée dans le cadre expérimental de la simulation (fichier CONTEXTE).

Figure 32.2

Environnement complet de simulation

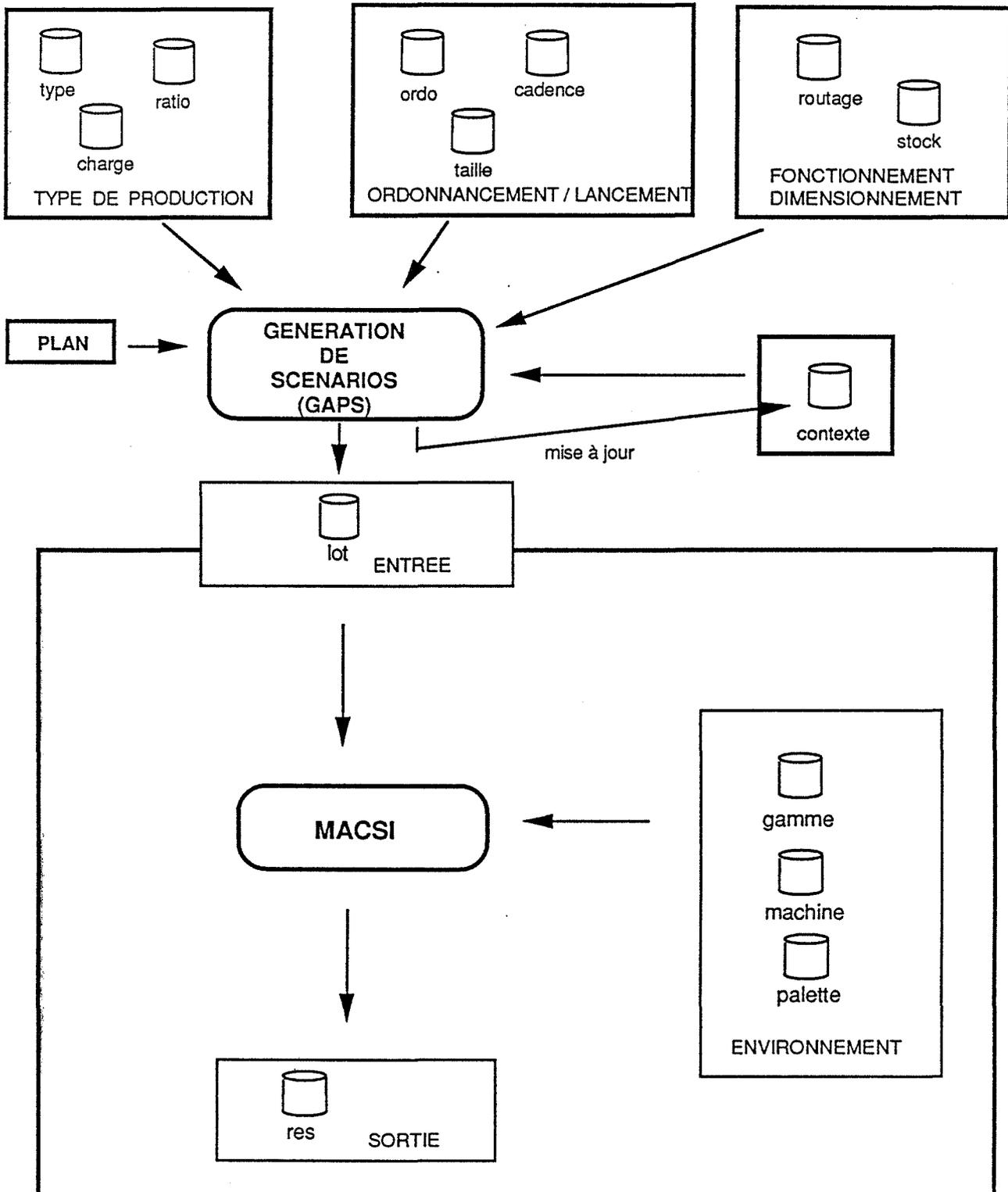


Figure 32.3

CONTEXTE contient les valeurs des facteurs pour la simulation en cours. GAPS reprend ces valeurs d'une simulation à l'autre ou bien en sélectionne de nouvelles dans des fichiers de référence qui constituent une sorte de "base de données" de contexte. Ce sont les données "type de production", "ordonnancement/lancement" et "fonctionnement/dimensionnement" de la figure 32.3 (cf annexe F).

* GAPS génère automatiquement des plans de simulation en itérant la séquence "génération de scénario - exécution de simulations" selon les facteurs contrôlés indiqués par le vecteur PLAN.

3.2.3.2. Test partiel : le vecteur PLAN

L'utilisateur doit indiquer, à travers un vecteur "PLAN" de 15 positions consécutives, les facteurs qu'il souhaite rendre actifs. Chacun des facteurs de la configuration est représenté par une ou plusieurs positions de PLAN. Une position peut prendre trois valeurs :

- **facteur correspondant non actif.** Il est fixé à sa valeur standard, présente dans le fichier CONTEXTE ;
- **facteur correspondant actif avec tirage aléatoire** de sa valeur parmi l'ensemble des modalités possibles ;
- **facteur correspondant actif mais dont la valeur n'est pas tirée au hasard ;** elle lui est donnée explicitement par l'utilisateur, ce qui permet de tester des configurations précises.

Une campagne de simulations est entièrement caractérisée par le fichier CONTEXTE et le vecteur PLAN. Appelons P_1, P_2, \dots, P_{15} les 15 positions de PLAN. Certaines sont nécessaires à des calculs intermédiaires ; nous ne donnons la signification que de celles qui correspondent aux facteurs de MACSI. Soit le vecteur

suivant, définissant les facteurs actifs et passifs du plan :

- P₂** : Type d'atelier (parmi la liste du fichier TYPE).
- P₃** : Ratios de production, compatibles avec le nombre de gammes mises en jeu par le facteur Type (parmi la liste du fichier RATIO).
- P₄** : Charge de l'atelier (parmi la liste du fichier CHARG).
- P₇** : Taille des lots, en nombre de pièces ou en nombre de palettes (parmi la liste du fichier TAILLE ou bien "au hasard").
- P₈** : Portée du paramètre Taille des lots, globale ou spécifique par gamme.
- P₉** : Mode de sélection de la taille des lots (automatique ou explicite) en cohérence avec P7 et P8.
- P₁₀** : Cadence de lancement en fabrication (parmi la liste du fichier CADENCE).
- P₁₁** : Nombre de cfg (entre 2 et 8).
- P₁₂** : Vitesse des cfg (parmi la liste de ROUT).
- P₁₃** : Ordonnement (parmi la liste de ORDO ou bien "au hasard").
- P₁₄** : Dimensionnement du stockage des en-cours de production (parmi la liste du fichier STOC).
- P₁₅** : Règle de gestion des stocks amont des machines (FIFO ou SPT).

Un contrôle de cohérence des options choisies par l'utilisateur est effectué par GAPS. On trouvera le contenu des fichiers de référence (TYPE, RATIO, CHARG, TAILLE, ORDO, CADENCE, ROUT et STOC) en annexe F.

Exemple :

Pour produire un plan ayant les quatre facteurs actifs suivants : nombre de cfg, vitesse des cfg, capacités de stockage, règle de gestion des stocks amont, on rendra actives, avec tirage aléatoire, les positions P₁₁, P₁₂, P₁₄ et P₁₅ de PLAN. Ainsi, les simulations sont paramétrées et lancées automatiquement par GAPS. Les valeurs des facteurs F1, F2, F3 et F4 sont tirées par GAPS dans les fichiers de modalités de ces facteurs, puis recopiées dans le modèle en début de simulation. L'utilisateur se contente d'indiquer le nombre total de simulations désirées.

3.2.3.3. Plan Randomisé : taille de l'échantillon

Les quatre facteurs actifs varient respectivement, lors d'une première série d'essais, selon 4, 4, 6 et 2 modalités. Le plan factoriel complet fait $4 \times 4 \times 6 \times 2 = 192$ scénarios, répétés 5 fois chacun, soient 960 simulations. Ce nombre n'est pas prohibitif mais représente cependant un temps de calcul et un espace mémoire importants. Un plan partiel nous suffit ; il convient alors de respecter un équilibre entre les différentes modalités de chaque facteur. Cet équilibre résulte, normalement, de la simple utilisation de générateurs aléatoires lors du tirage des scénarios actifs parmi les scénarios potentiels, à condition que l'échantillon soit de taille suffisante. On estime la taille suffisante lorsqu'elle permet l'observation d'au moins 5 ou 6 exemplaires de chaque modalité. Ici c'est le facteur F3 (capacité de stockage) qui a le plus grand nombre de modalités (6). Pour avoir 5 ou 6 exemplaires de chaque modalité, il faut donc entre 30 et 36 scénarios, soient 150 à 180 simulations au lieu des 960 du plan exhaustif.

Une fois que le plan prévu - supposons 30 scénarios - est exécuté, on vérifie que chaque modalité est bien représentée ; si éventuellement il existe des déséquilibres, on complète le plan avec quelques scénarios spécifiques.

3.2.4. Synthèse du chapitre

L'ensemble des facteurs potentiels et des indicateurs est repéré. Pour que l'exploitation multi-critère des observations soit valide et pertinente, il faut construire des campagnes de simulation adaptées et équilibrées. Suivant la méthode du test partiel randomisé, les facteurs sont regroupés par affinité sémantique, ce qui permet de tester chaque groupe séparément (test partiel), les facteurs des autres groupes formant le cadre de l'ensemble de la campagne. A l'intérieur du groupe "actif" les scénarios sont créés selon la technique des plans randomisés.

Les résultats issus de ces campagnes vont servir, dans un premier temps, à vérifier la pertinence des indicateurs de performance retenus, à en éliminer certains, à en préciser d'autres ainsi qu'à tester l'effet des facteurs utilisés, à en modifier les modalités ou les plages de variation.

3.3. CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Au cours de la deuxième partie, nous avons voulu montrer combien le processus de simulation, pour être en mesure de fournir des résultats exploitables, devait être conduit avec rigueur. Ainsi un modèle de MACSI a été élaboré et programmé ; une technique de construction de plans de simulations a été définie.

Dans la partie suivante, une analyse effectuée sur des simulations "affinées" mettra en lumière la structure des critères, les relations entre les facteurs et les performances, etc...

4. TROISIEME PARTIE :

L'ANALYSE DES DONNEES COMME METHODE D'ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LE COMPORTEMENT DES SYSTEMES DE PRODUCTION

"Simuler pour comprendre..."

C'est pour répondre à cet objectif que nous avons construit des campagnes de simulations... Une campagne de simulations est un ensemble de scénarios, organisés selon un plan ; c'est aussi l'ensemble des résultats issus de ces simulations. A raison de 248 variables observées, on obtient en fin de campagne un tableau de résultats numériques d'une taille assez impressionnante, en tous cas beaucoup trop volumineux pour être exploité directement... Il serait pourtant dommage de perdre ce **potentiel d'information!**... Heureusement, les méthodes d'analyse de données (A.D.), précisément adaptées au traitement de volumes importants de données numériques, qualitatives ou quantitatives, vont apporter leur aide à son dépouillement.

Les techniques d'A.D., dont le but essentiel est de mettre en évidence des relations existant entre des objets, entre les paramètres qui les caractérisent et entre les objets et les paramètres, permettent de transformer l'information "dormante" du tableau en **connaissance sur le système.**

4.1. L'ANALYSE DES DONNEES POUR LES SIMULATIONS : PROPOSITION DE METHODE

Nous améliorons notre compréhension du système de production par la détection et la caractérisation de ses modes de fonctionnement en démasquant ses règles de comportement, en repérant les liens qui existent entre ses composants, jusqu'à bâtir un **modèle comportemental** de l'atelier. [Lhoste 88] définit la notion de modèle comportemental : "le principe est d'associer à un sous-ensemble opératif une description explicite de son comportement, caractérisé par la reconstitution d'une liaison sémantique entre ses entrées et ses sorties". L'ensemble de ces descriptions constitue un **méta-modèle** de MACSI, c'est-à-dire un modèle d'un niveau conceptuel supérieur au niveau du modèle de base, élaboré pour la simulation.

Cette opération procède en deux temps :

- mise en lumière des comportements de l'atelier ;
- élaboration des liens, des relations.

4.1.1. Les apports attendus de l'A.D.

Avec l'analyse des données, nous visons deux objectifs :

- la recherche de structures (les modes de fonctionnement) : c'est l'aspect "décomposition du système" ;
- la recherche de relations fonctionnelles : c'est l'aspect "méta-modélisation du système".

L'ensemble des N simulations (qui seront appelées "objets" ou encore "individus" dans la terminologie de l'analyse de données) sera par la suite considéré comme un nuage de N points de \mathbf{R}^P , P étant le nombre d'indicateurs relevés. Le tableau initial des données (cf figures 41.1 et 41.2) croise des individus-simulations avec des variables-indicateurs-de-performance. Un individu-simulation sera repéré par un code de 3 ou 4 caractères, composé à partir des facteurs actifs, ce qui permet de mémoriser le scénario à l'origine des résultats. Les variables-indicateurs sont les résultats numériques relevés à l'issue de la simulation.

Tableau initial des données (RES)

simulations \ indicateurs	Y1	.	.	.	.	.	Yj	.	.	.	.	YP
	s1							.				
.							.					
.							.					
.							.					
.							.					
.							.					
si	.	.	.	.	.	.	Yj (si)	.	.	.	.	.
.												
.												
.												
.												
sN												

N simulations si

P observations Yj par simulation

Yj(si) = jème observation pour la ième simulation

Figure 41.1

Structure du fichier des résultats (RES)

Exemple sur 3 individus : "42F1", "43D1", "84H1"

code (4 caractères) + commentaires (60 caractères)

résultats numériques (20 réels par ligne)

```

42F1 NK5542F1.000 deb - 0. fin = 8639. 70 1400 1440 5 1 4 2
.84 .83 .84 .83 .83 180.38 44.01 177.74 33.28 201.06 52.16 239.12 70.18 103.57 20.42 .00 1.24 .50 63.67 48.61
64.81 78.99 64.75 61.19 .08 .11 45.46 27.66 .00 2.47 7.00 1.70 .05 .14 .03 .03 .20 .04 .03 .14
.03 .02 .12 .02 .06 .50 .09 .32 1.00 .35 .02 .20 .05 .29 1.00 .32 14.49 13.15 9.05 9.89
3.64 4.68 10.50 8.35 20.14 16.98 10.50 8.91 9.35 6.70

43D1 NK5543D1.000 deb - 0. fin = 8639. 70 1400 1440 6 2 4 3
.81 .83 .81 .80 .81 598.30 86.47 599.41 82.41 592.44 90.94 719.84 91.12 481.50 81.41 52.50 .00 .00 61.59 47.50
61.31 76.57 63.70 58.87 .07 .10 88.82 15.39 .00 3.71 6.00 .75 .07 .12 .01 .99 1.00 .05 .01 .08
.02 .06 .10 .02 .01 .20 .04 .24 .30 .06 .01 .20 .03 .24 .30 .06 5.34 8.40 2.06 3.53
1.46 2.99 83.15 17.24 70.38 23.89 39.51 20.58 41.00 16.79

84H1 NK5584H1.000 deb - 0. fin = 8639. 70 1400 1440 7 1 8 4
.83 .83 .83 .80 .83 328.44 64.90 318.34 54.57 313.54 72.97 457.44 84.56 224.46 47.49 .00 13.24 10.99 63.40 48.69
63.67 79.71 64.92 60.00 .08 .11 72.99 22.66 1.43 3.18 9.00 1.69 .06 .18 .03 .18 .50 .13 .03 .12
.03 .04 .12 .03 .24 1.00 .33 .62 1.00 .37 .16 1.00 .28 .59 1.00 .38 12.76 13.37 7.99 6.26
5.26 5.44 58.15 32.15 39.53 25.01 20.47 14.83 19.33 13.11

```

Figure 41.2

Nous nous intéressons aux méthodes d'A.D. de type quantitatif puisque nos données (taux d'utilisation de ressources, durées de passage,...) sont toutes des grandeurs numériques. Pour la partie "description" du nuage, on utilise classiquement soit l'analyse factorielle des correspondances (AFC) soit l'analyse factorielle en composantes principales (ACP) :

- l'AFC s'applique plutôt à des données quantitatives représentant des effectifs (tableaux de contingence) ; les distances utilisées concernent la ressemblance entre les profils des individus. Cette méthode ne convient donc ni à nos données ni à nos objectifs.
- l'ACP, que nous avons utilisée, s'applique, quant à elle, à des données quantitatives du type "tableau de mesures", ce qui est le cas de nos données. Les distances entre individus sont alors établies à partir des valeurs prises sur les variables elles-mêmes. L'ACP nous permettra de mettre en lumière des relations de type "corrélation".

Pour les questions concernant la structure du système, nous avons fait appel aux différentes techniques de Classification Automatique [Barboucha 87], [Girard 82], [Saporta 90], [Diday 82]. Les principes de ces méthodes sont un peu détaillés dans les paragraphes suivants.

4.1.1.1. Principes de l'ACP (Analyse en Composantes Principales)

C'est une méthode à but descriptif. Elle débouche sur une représentation des relations entre les P variables et des similitudes entre les N individus.

Le principe général consiste à rechercher l'espace de dimension réduite qui donne l'image la plus exacte possible du nuage initial, centré, des N individus dans l'espace engendré par les variables. Puis s'effectue la projection des individus dans cet espace de dimension restreinte. Cette représentation s'accompagne d'une perte d'information. On cherche un espace de représentation R^q ($q < P$) qui minimise la perte d'information.

Procédure : Le nuage des observations étant centré, on recherche les q axes principaux d'inertie de ce nuage. Le premier axe est déterminé par le fait que l'ensemble des points du nuage projetés sur cette direction est le plus dispersé, ce qui coïncide avec l'inertie minimale des points-observations par rapport à l'axe. De façon

similaire, chaque axe extrait sera orthogonal à tous les autres et traduira une dispersion maximale et une inertie minimale des points du nuage.

Parce que les variables que nous traitons ici sont de nature hétérogène (taux d'utilisation de ressources, durées de passage, niveaux de stocks,...), nous travaillerons sur des données réduites. Après transformation de l'unité de mesure rendue commune à toutes les variables, la méthode d'identification des axes principaux d'inertie se ramène à la recherche des valeurs et vecteurs propres de la matrice des corrélations. Les variables initiales, qui sont corrélées, sont remplacées par de nouvelles variables, les facteurs principaux, combinaisons linéaires des premières et non corrélées entre elles. On observe la projection du nuage sur ces axes.

Interprétation d'une ACP

L'interprétation des résultats de l'analyse est fondée sur trois éléments :

- le pourcentage d'inertie expliqué par l'axe considéré.
- la projection des individus dans l'hyperplan des axes principaux d'inertie, qui fait apparaître la forme du nuage, les proximités entre points. On peut ici utiliser la mesure de la contribution du point à la formation de l'axe. Il convient de prendre garde aux contributions excessives car elles peuvent être le signe de données suspectes, voire aberrantes. On préférera alors exclure le point de l'analyse et se contenter de sa représentation en tant qu'individu supplémentaire.
- la contribution des variables à l'axe. On étudie la corrélation, positive ou négative, des variables à chaque axe, mais on remarquera aussi l'absence de corrélation. Ne sont considérées comme significatives que les valeurs de corrélation entre variables et facteurs s'approchant le plus de +1 ou -1.

Il n'existe pas vraiment de méthode rigoureuse pour décider du nombre de facteurs à retenir pour l'interprétation. De façon empirique on retient les axes associés à une valeur propre supérieure à 1 (la variance du facteur est supérieure à celle des variables initiales) ou bien on cherche une rupture de pente dans le diagramme des valeurs propres. On peut également s'arrêter lorsque l'inertie expliquée par l'ensemble des axes est jugée suffisante.

Notons toutefois que l'interprétation donnée par l'ACP a un caractère fortement tautologique puisqu'on explique les résultats à l'aide des données qui ont servi à les obtenir. On appréciera la qualité de l'interprétation initiale en projetant en points supplémentaires des individus ou des variables qui n'ont pas participé à l'analyse [Saporta 90].

4.1.1.2. Principes de la classification automatique

Il existe plusieurs techniques. Ce sont des méthodes de structuration. La classification a pour but de rechercher le meilleur groupement, en classes homogènes, d'objets sur lesquels on a mesuré un certain nombre de variables. Les impératifs sont les suivants :

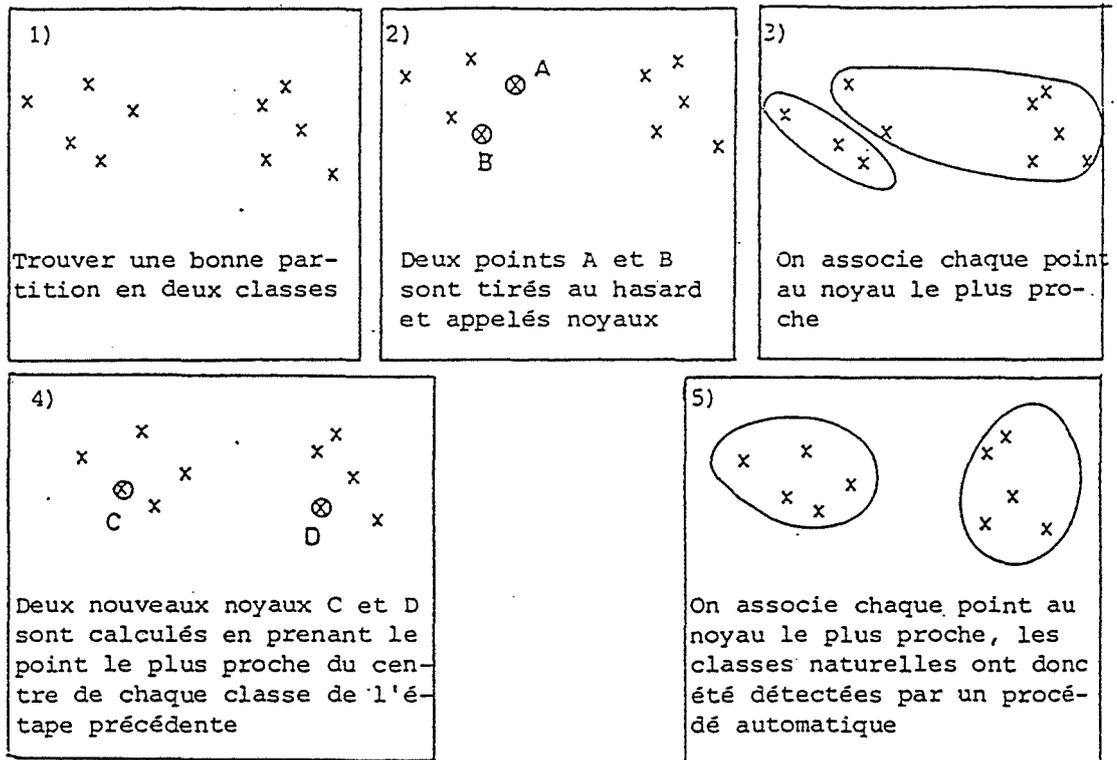
- les objets d'une même classe doivent se ressembler le plus possible (objectif d'homogénéité).
- les objets de classes différentes doivent se ressembler le moins possible (objectif de différenciation).

Les classes formées constituent une partition de l'ensemble total. La construction se fait à partir d'un tableau $N \times N$ de distances ou de dissimilarités entre les individus. On distingue les méthodes de partitionnement et les méthodes de classification hiérarchique.

Dans le cadre des méthodes de partitionnement, plusieurs familles de techniques existent. Les algorithmes du type "nuées dynamiques", par exemple, permettent de traiter rapidement un grand nombre d'individus et de les regrouper en un nombre de classes prédéfini de façon à optimiser localement un critère de type inertie, réduisant progressivement l'inertie intraclasse et accroissant l'inertie interclasse. L'algorithme des nuées dynamiques (cf figure 41.3) converge rapidement vers une solution par amélioration progressive d'une solution de base donnée.

Les méthodes de classification hiérarchique débouchent sur une succession de partitions emboîtées. Une méthode ascendante procède selon un algorithme de type agglomératif qui part de la partition la plus fine (un individu = une classe) et qui, à chaque itération, agrège les deux objets les plus proches, les regroupe en un

Algorithme des nuées dynamiques



D'après (Diday 82)

Figure 41.3

seul et calcule la dissimilarité du nouvel objet avec les autres. Le processus itère jusqu'à l'obtention de la partition la plus grossière (l'ensemble tout entier). Avec les méthodes descendantes on procède, au contraire, par séparation/division. Ces techniques fournissent un arbre de classification (cf figure 41.4). Le choix d'un indice d'agrégation différencie ces techniques.

Utilisation d'une classification

On choisit le nombre de classes en fixant le nombre de centres (ou noyaux) dans la méthode des nuées dynamiques ou bien en coupant l'arbre à un certain niveau dans les méthodes de classification. Le nombre de classes dépend de la structure naturelle de l'ensemble des données (les classes doivent avoir un sens, être interprétables). Il dépend également du degré de finesse de la structuration recherchée.

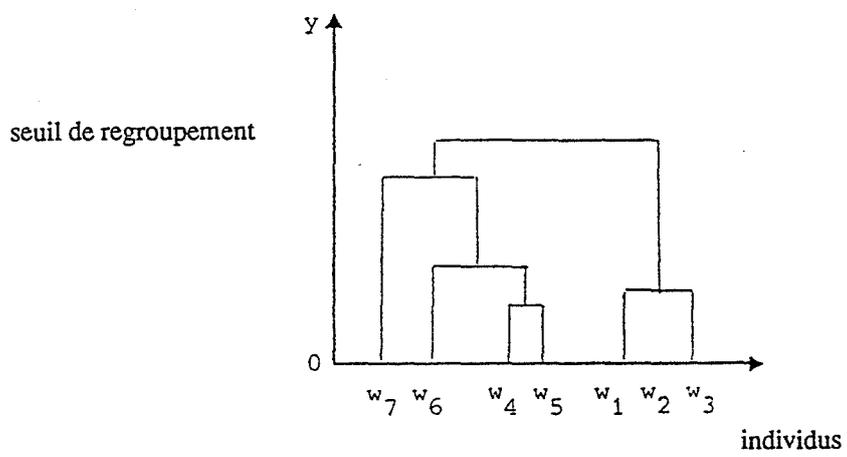
Les méthodes de classification sont appliquées aux individus mais peuvent aussi l'être aux variables, à condition qu'elles soient de même nature (quantitatives ou qualitatives). Il faut, dans ce dernier cas, avoir défini une mesure de dissimilarité entre variables.

4.1.1.3. Les limites de l'A.D.

Nous verrons les apports de l'A.D. dans l'élaboration du cadre expérimental (indicateurs et facteurs). Une campagne de simulation ciblée sur l'étude des facteurs du groupe "F" (fonctionnement/dimensionnement) sera traitée dans son intégralité : visualisation et description du nuage sur les axes de l'ACP, analyse des corrélations entre variables, structuration des comportements par classification.

A ce point, nous atteignons les limites de l'analyse des données quant à ses facultés d'explication, de caractérisation des groupements mis en évidence. Nous évoquerons alors les possibilités offertes par des démarches davantage symbolistes que numériques. La voie la plus efficace étant à rechercher aux frontières des deux domaines : apprentissage automatique sur données numériques ou bien classification conceptuelle. En effet, le modèle comportemental peut être envisagé comme une généralisation (au sens de l'apprentissage automatique) des expériences réalisées par simulation.

Arbre de classification



D'après (Diday 82)

Figure 41.4

4.1.2. Proposition de méthode

La méthode que nous présentons a été élaborée à partir de simulations de l'atelier expérimental MACSI. L'étude détaillée est présentée en annexe J. Nous proposons ici les principes généraux de mise en oeuvre de la méthode ainsi que les résultats que nous en avons tirés.

4.1.2.1. Introduction à la démarche

La spécificité de l'approche que nous avons adoptée tient dans le fait que nous supposons a priori ne rien connaître du comportement du système, ou tout au moins un minimum de choses. Notre ambition consiste à "découvrir" ou plutôt à "retrouver" les règles de fonctionnement dudit système en se basant uniquement :

- sur les observations issues des simulations,
- sur des techniques numériques d'analyse.

Nous ferons donc abstraction de toute expérience ou savoir des experts en gestion de production.

Nous entendons ainsi montrer :

- qu'il est possible de retrouver, par des techniques "automatiques" d'analyse et à partir d'une expérience "artificielle" (car issue de la simulation), les axiomes classiques de la gestion de production ; ce premier point constituant également une validation de la démarche.

- qu'il est possible de bâtir ainsi une représentation du système d'un niveau conceptuel supérieur à celle du modèle de simulation ; représentation sous forme de règles de fonctionnement par exemple, et non plus sous forme de description des mécanismes de base. C'est la construction du méta-modèle (ou encore "modèle comportemental").

Si nous nous reportons à la figure 41.5, nous pouvons considérer que notre démarche concerne la partie A du dessin, la partie B restant à l'état de réflexion ; on peut notamment s'interroger sur la manière d'enrichir la base de connaissances, l'expérience acquise sur le système, sans repasser par toute la phase d'analyse qui a servi à l'élaboration de la connaissance de base. La séparation entre les deux parties du dessin correspond grosso-modo à la frontière des domaines symbolique et numérique.

4.1.2.2. Apports de l'analyse de données à l'analyse de systèmes de production : état de l'art

L'analyse de données a déjà été utilisée dans le domaine de la production et de la simulation :

- algorithmes de partitionnement pour des problèmes de type "TGAO" ou "flots de fabrication" [Garcia 87], [Marcotorchino 87]. La production est étudiée de façon "statique" ; la question du transport des pièces dans l'atelier n'est pas abordée.
- classification de critères de performances [Bonneau 85] afin de comparer diverses règles de gestion d'atelier. Les critères, à l'origine quantitatifs (quantité totale fabriquée, nombre maximum de chariots utilisés, écarts entre quotas obtenus et quotas demandés), sont transformés en critères qualitatifs par découpage en intervalles de modalités. Les auteurs ont concentré leur intérêt sur l'élaboration d'algorithmes de classification et sur la visualisation graphique des performances. L'étude est mono-facteur : les résultats sont présentés règle par règle, la comparaison s'effectuant ensuite manuellement.
- méthodes de classification [Voyatzis 88], utilisées pour l'élaboration de la "mémoire artificielle" d'un système, dans une problématique d'ordonnement. Voyatzis définit quatre axes principaux dans son travail : identification des indicateurs qui caractérisent au mieux l'objectif à atteindre, identification de ceux qui caractérisent au mieux l'état du système, recensement des règles de gestion à appliquer, construction de la mémoire artificielle hiérarchisée. Lui-même s'est intéressé au dernier axe seulement, c'est-à-dire à la construction automatique des règles d'ordonnement. Nous travaillons, quant à

Construction d'un méta-modèle de MACSI

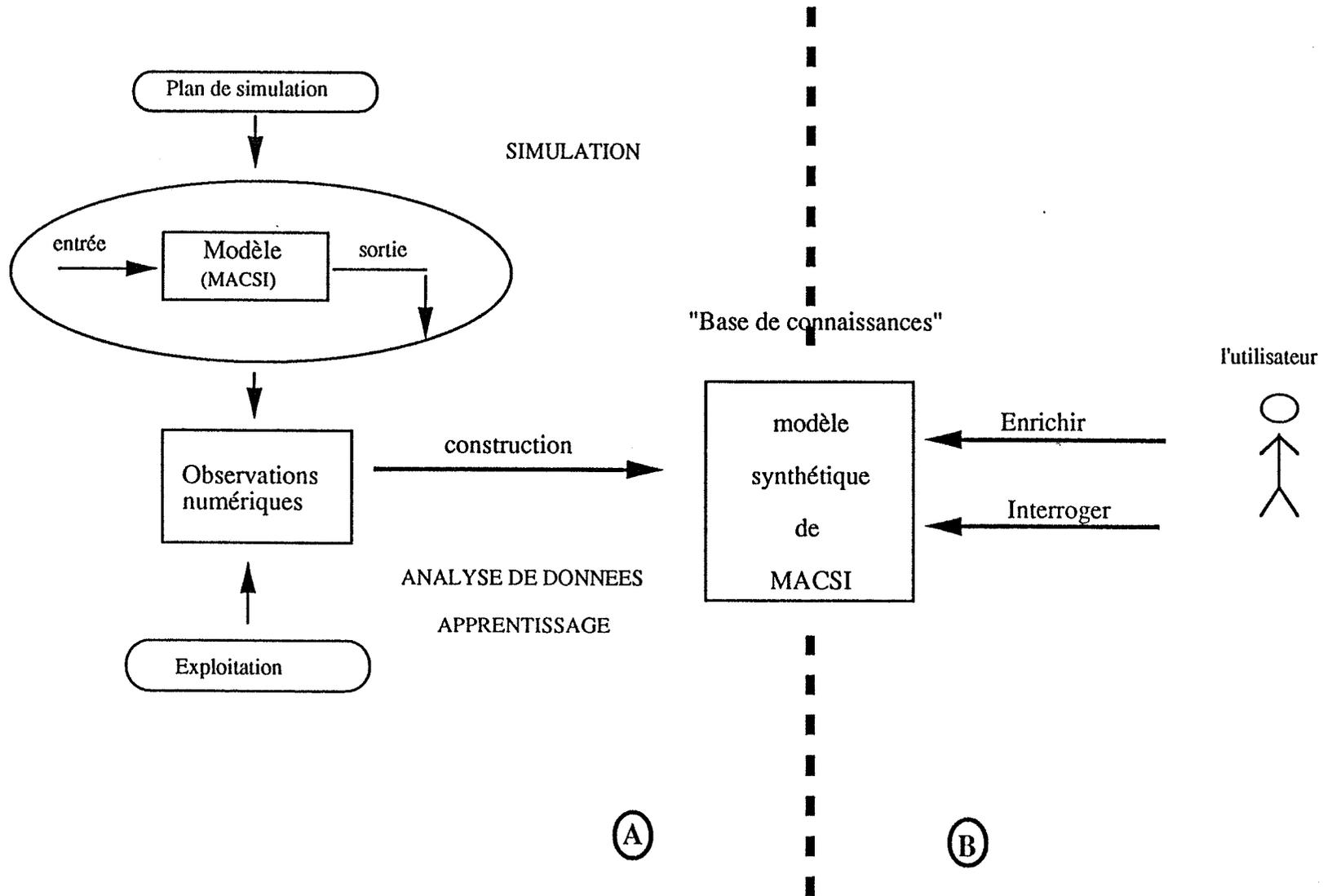


Figure 41.5

nous, à une méthode d'ensemble ; ainsi les étapes préliminaires nous préoccupent autant que les étapes d'exploitation "pure".

- utilisation d'outils d'analyse de données pour la production dans [Abdali 89] dont le logiciel, ALADIN, vise l'exploitation de données industrielles issues de procédés continus.

- analyse des correspondances pour l'interprétation de simulations de systèmes de production [Pierreval 88] et génération automatique de règles d'ordonnancement [Pierreval 90]. Les auteurs s'attachent à produire, à l'aide de techniques d'apprentissage automatique et à partir de résultats issus de la simulation de systèmes de production, des règles de pilotage de l'atelier fondées sur des combinaisons de diverses règles de gestion des stocks-machines.

On peut constater que l'analyse de données, lorsqu'elle a été envisagée dans le domaine de la production, a fourni des résultats intéressants. Jamais, cependant, à notre connaissance, n'ont été effectués de travaux sur l'emploi de l'analyse des données pour la conception des systèmes de production intégrant une fonction "transport" automatisée. Un autre aspect original de notre démarche réside dans l'approche multi-facteurs et multi-critères avec laquelle nous avons abordé l'étude des comportements du système considéré.

4.1.2.2.1. Apports de l'ACP

L'ACP, par la réduction de l'espace de représentation et la projection des points sur ces axes, permet :

- de donner une vision synthétique de l'information obtenue sur le modèle,
- d'identifier des phénomènes (contribution des variables aux axes, interactions,...),
- de "hiérarchiser", de relativiser les phénomènes suivant le moment de leur apparition sur les axes factoriels.

4.1.2.2.2. Apports de la Classification

Le regroupement des individus par proximité permet :

- de dégager des profils-types parmi les observations et d'en mesurer l'importance relative suivant le poids de la classe : aspect typologie.
- d'établir, à l'aide de l'arbre de classification et à travers le processus de la formation des classes, des relations hiérarchiques entre les classes : aspect hiérarchisation des liens.
- d'expliquer, à l'aide des variables initiales ou des facteurs de l'ACP qui ont contribué à la formation des classes, sur quelles ressemblances de comportement les individus se sont regroupés : aspect caractérisation de la classe.
- de définir des fonctions de décision, si la classe est assez significative, pour le classement de nouveaux individus : aspect décision.

Le regroupement des variables en classes permet :

- de mettre en évidence des sous-ensembles d'indicateurs présentant le même profil, c'est-à-dire d'indicateurs variant simultanément et dans la même direction.

4.1.2.3. Une démarche d'exploitation des résultats de simulation

Notre approche s'appuie essentiellement sur des techniques d'analyse de données, fournies par le logiciel ADDAD [Lebeaux 85]. Elle se décompose en 5 étapes (cf figure 41.6).

Deux étapes sont situées en amont de l'exécution de la campagne de simulation. En effet, avant de passer à l'exploitation proprement dite des résultats de simulation, on procède à la détermination du contexte de simulation ainsi qu'à un premier traitement des données afin d'affiner le choix des facteurs et des indicateurs, dans leur nature ou bien dans leurs modalités. Il s'agit de bien "cibler" le plan d'expériences, afin de tirer le maximum d'information sur l'atelier.

Démarche en 5 étapes pour exploiter les résultats de simulation

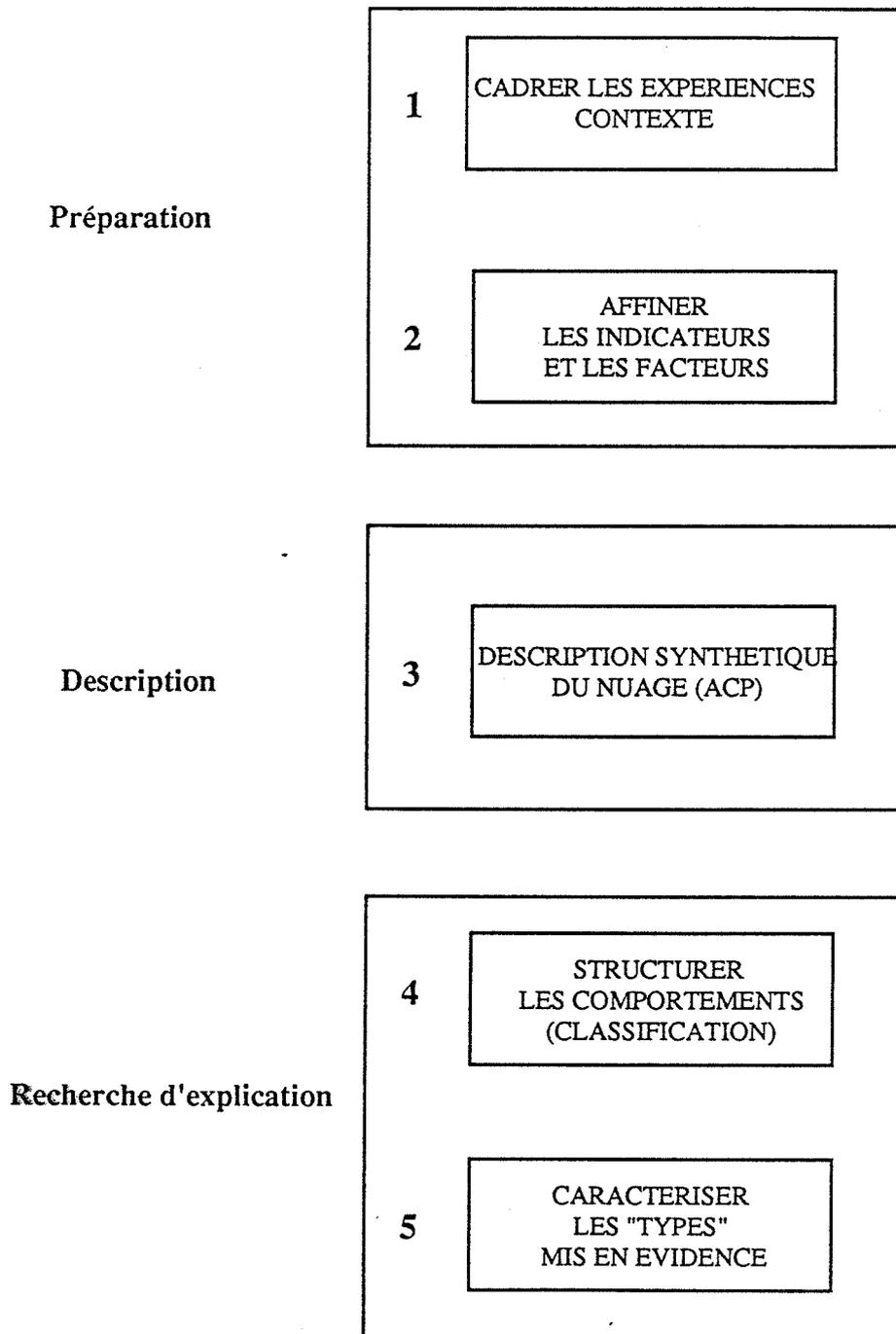


Figure 41.6

- Le cadrage du contexte ; c'est la détermination des valeurs standard des facteurs non actifs.
- L'affinage des facteurs contrôlés et des indicateurs ; il s'agit :
 - d'identifier les indicateurs pertinents, c'est-à-dire ceux qui apportent le plus d'information sur l'état du système ;
 - de sélectionner des facteurs, et surtout des modalités de facteurs, assez discriminant(e)s, au sens qu'ils engendrent des comportements suffisamment différenciés de l'atelier.

Ces deux points seront éclairés par une ACP afin de rendre compte de la représentativité des indicateurs d'une part, de la dispersion ou du regroupement des objets selon leur nature d'autre part.

A l'issue des deux premières étapes, la préparation de la campagne de simulation est achevée. On passe à l'exécution pour trouver, en aval de la campagne, trois nouvelles étapes.

- Description synthétique des simulations : c'est la mise en évidence des règles de comportement entre indicateurs (corrélations et contributions des variables aux facteurs) ou bien entre objets et indicateurs (d'après la position des points projetés sur les axes factoriels de l'ACP).
- Typologie des comportements : c'est le repérage des profils de performances les plus remarquables ; on s'appuie sur les techniques de classification.
- Caractérisation des classes d'objets, ou encore "stratégies", si on définit une stratégie comme la mise en oeuvre de moyens et de méthodes pour réaliser un but, donc comme un scénario. Alors la caractérisation consiste à donner un nom aux groupements mis en évidence à l'étape précédente. Nommer les stratégies, c'est trouver une expression synthétique et intelligible pour les résumer ; cela permet de préciser quelle stratégie conduit à quel type de comportement (profil de résultats).

Nous illustrons cette démarche sur une campagne d'application, détaillée en annexe J et dont l'objectif est d'observer l'influence des facteurs de fonctionnement (bloc "F") sur le comportement de l'atelier, dans un contexte donné de facteurs "T" et "O" (type de production et ordonnancement/lancement). L'objectif est le dimensionnement conjoint des systèmes de transport et de stockage, avec des options de gestion fixées.

A chacune des trois premières étapes est constitué un échantillon de simulations dont l'analyse permet de tirer des conclusions et d'aborder l'étape suivante. Nous rappelons brièvement la procédure de constitution de tels échantillons avant de détailler chaque étape.

4.1.2.4. Résumé de la procédure de constitution d'un échantillon de simulations

Chaque fois que l'on parle d'échantillon, ou de campagne, de simulations, on sous-entend que les opérations suivantes ont été effectuées :

- **Contexte expérimental** : affecter aux facteurs non actifs leur valeur "standard" (mémorisée dans un fichier de contexte).
- **Facteurs contrôlés** : inscrire le plan de simulation dans le vecteur PLAN, c'est-à-dire positionner les facteurs actifs et les facteurs non actifs.
- **Exécution** : lancer la série de simulations. Le programme GAPS (Génération Automatique de Plans de Simulation) procède avant chaque expérience au tirage aléatoire d'un nouveau scénario parmi l'ensemble des scénarios possibles.
- **Résultats** : à l'issue des simulations, des observations "brutes" sont enregistrées.
- **Préparation des données** : sélectionner à partir du fichier des résultats les mesures des indicateurs que l'on souhaite conserver pour l'analyse. A l'issue de la sélection, le programme génère automatiquement un fichier de paramètres pour l'ACP.
- **Centres de gravité** : calculer, éventuellement, les centres de gravité des individus sur les différentes modalités des facteurs. Ces nouveaux individus ne participeront pas à l'analyse factorielle mais donneront une visualisation plus concise des objets dans les plans factoriels. Les centres de

gravité sont calculés pour chaque modalité de chaque facteur et également pour chaque couple de modalités entre deux facteurs. Le codage des centres de gravité est explicité en annexe G.

Exemple : soient des objets caractérisés par 4 facteurs F1, F2, F3, F4.

F1 prend les modalités F₁₁, F₁₂, F₁₃, F₁₄ ;

F2 " " F₂₁, F₂₂, F₂₃, F₂₄ ;

F3 " " F₃₁, F₃₂, F₃₃, F₃₄ ;

F4 " " F₄₁, F₄₂.

On calcule alors le point moyen (centre de gravité) de la sous-population (F1=F₁₁), puis (F1=F₁₂) ... et ainsi pour toutes les valeurs de F1, F2, F3, F4. Une autre série de centres de gravité est calculée pour les sous-populations (F1=F₁₁ ^ F2=F₂₁) puis (F1=F₁₁ ^ F2=F₂₂) et ainsi pour toutes les combinaisons de modalités deux à deux.

- **Tableau initial** : soumettre à l'analyse de données un tableau composé de l'échantillon de base éventuellement additionné des centres de gravité.

4.1.3. Synthèse du chapitre

Une méthode en 5 étapes a été définie (cf figure 41.6) afin d'obtenir, sur un échantillon "bien constitué", au sens du dernier paragraphe, un apport de connaissances en termes de structuration de l'ensemble et de mise en évidence de liens fonctionnels entre les facteurs contrôlés et les indicateurs de performance.

4.2. ETAPES 1 ET 2 : PHASES PREPARATOIRES

Ces deux étapes, si elles constituent un préalable à la construction proprement dite du plan d'expériences, n'en sont pas moins indispensables, puisque ce sont elles qui permettent la définition du contexte ainsi que la détermination des facteurs et indicateurs.

4.2.1. Etape 1 : cadrer les expériences / déterminer les valeurs standard de contexte

La procédure de cadrage des simulations est détaillée en figure 42.1.

Nous procéderons en deux campagnes, une pour chaque bloc de facteurs non actifs, donc "T" et "O", puisque c'est le bloc "F" qui sera actif lors de la campagne. La première campagne permettra de fixer les facteurs "niveau de charge de l'atelier" et "répartition de la production", la seconde les facteurs relatifs à l'ordonnancement et au lancement.

4.2.1.1. Les standards du bloc "T"

Le facteur T1 (type d'atelier) est fixé car il n'est pas souhaitable de rendre actif ce facteur. En effet, les composants (postes de travail, réseau de transport) mis en oeuvre ne sont pas du tout les mêmes d'un T1 à l'autre : les expériences seraient donc difficilement comparables, les ensembles d'indicateurs étant différents d'un scénario à l'autre. C'est pourquoi T1 n'entrera jamais, à ce stade de l'étude, comme facteur actif de plan d'expériences. Pour les phases de cadrage et d'affinage, nous avons travaillé sur un contexte de production simplifié, avec un type d'atelier $T1 = \{G1, G2, G3, G4, G5\}$, cet ensemble de gammes ne sollicitant que la cellule 1, la palettisation et le montage (cf annexe D) ; le réseau de transport n'est par conséquent que partiellement utilisé.

Cadrage des simulations Détermination du contexte

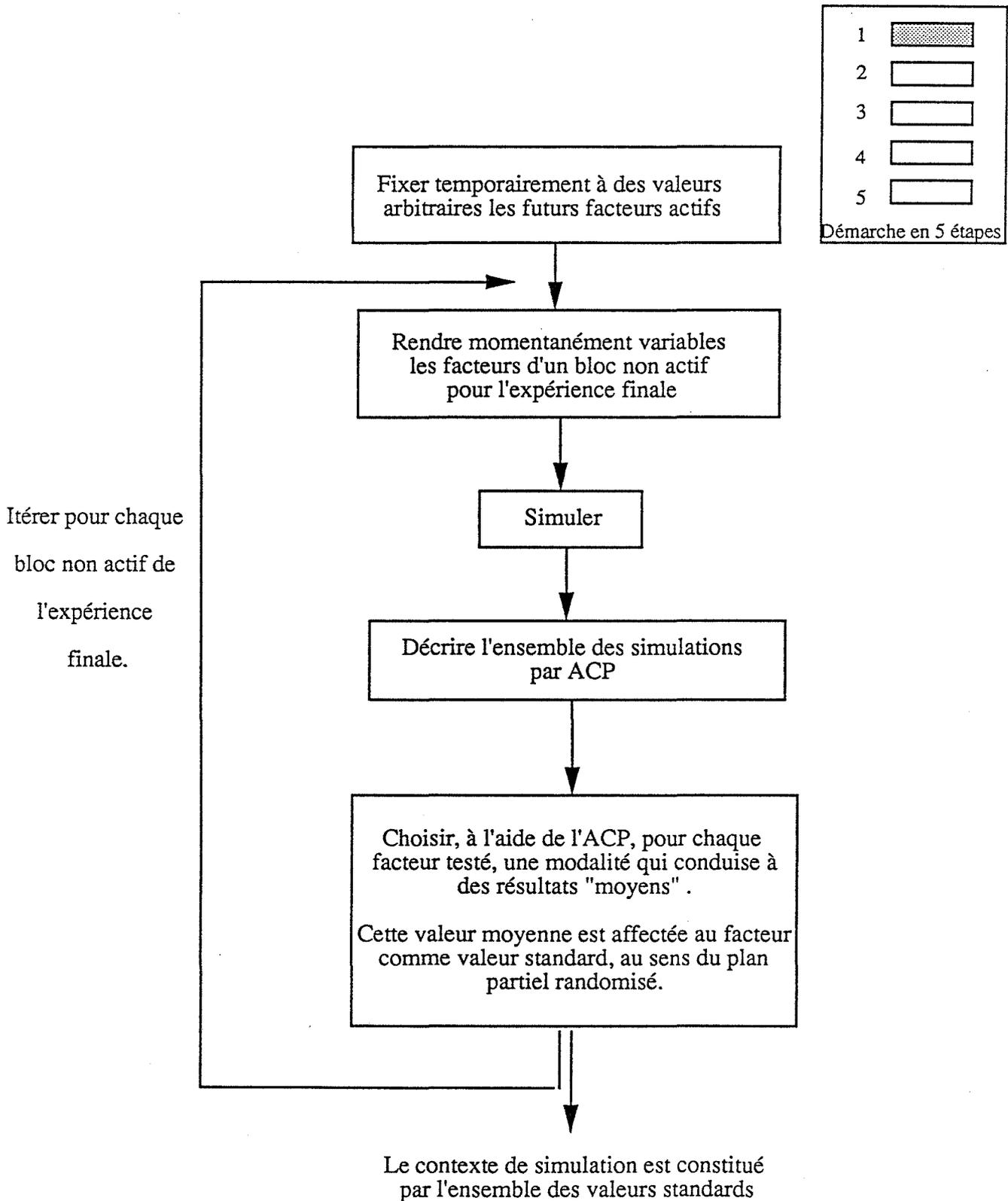


Figure 42.1

Restent donc à déterminer les standards de deux facteurs du bloc "T" (T2 et T3). Sur un potentiel de quatre facteurs actifs, deux seulement sont utilisés. Nous profitons des deux places libres pour mettre en oeuvre, simultanément à "T", deux facteurs "F" (F1, nombre de cfg, et F3, capacités de stockage) afin d'observer s'il existe ou non une relation de type hiérarchique entre les blocs (n'importe quel facteur "T" serait plus influent sur les résultats que n'importe quel facteur "F", ou bien l'inverse).

Les modalités des facteurs actifs, et surtout de T2 et de F3, ont été choisies, dans un premier temps, sans logique particulière. C'est au cours des itérations successives de la phase d'affinage (plus loin) que la nécessité d'une logique de construction s'est imposée, afin de pouvoir améliorer progressivement les jeux d'essais. Ici il s'agit simplement de tester la réaction des indicateurs de performance à diverses modalités de facteurs.

La campagne est caractérisée par :

- T1 = (G1,G2,G3,G4,G5),

Ce sous-ensemble de gammes ne sollicite que la cellule 1, la palettisation et le montage ;

- T2 variable entre les ratios B,C,D,E de RATIO (cf figure 42.2) ;

- T3 variable de 45% à 95% de charge (cf figure 42.2) ;

- O1 = ordonnancement pris au hasard puis reconduit ;

- O2 = lots de 16 pièces, taille d'une palette,

chaque lot correspond exactement à une palette. On ne différencie donc pas les lots des palettes ;

- O3 = cadence uniforme sur la période,

Les lots sont lancés en fabrication à des intervalles de temps réguliers, du début à la fin de la période de production.

- F1 variable entre 2 et 5 chariots ;

- F2 = 30 m/min ;

- F3 variable entre les stockages A, B, D, E, F, G de STOC (figure 42.2) ;

- F4 = SPT (Shortest Processing Time).

Etape 1 : cadrage des simulations - détermination du contexte

Environnement - facteurs F3, T2, T3

F3 : Stocks (en nombre de palettes)

<u>code</u>	<u>st1</u>	<u>st2</u>	<u>st3</u>	<u>st4</u>	<u>st5</u>	<u>st6</u>	<u>st7</u>
A	50	50	6	10	10	2	2
B	20	20	10	5	3	2	2
D	50	50	15	10	6	4	4
E	15	15	15	8	4	4	4
F	30	30	10	8	5	3	3
G	15	15	4	5	3	2	2

st1	:	stock de la cellule 1 ;
st2	:	stock de la cellule 2 ;
st3	:	stock aval du poste "palettisation" ;
st4	:	stock amont du poste "usinage" ;
st5	:	stock amont du poste "montage" ;
st6	:	stock aval du poste "usinage" ;
st7	:	stock aval du poste "montage".

T2 : Ratios (en % du volume global)

<u>code</u>	<u>répartitions entre les gammes</u>				
B	10	30	30	10	20
C	5	5	20	30	40
D	10	10	30	30	20
E	60	10	10	10	10

T3 : Charge (en % d'occupation de la machine la plus chargée)

<u>code</u>	<u>taux</u>
0	45
1	50
2	55
3	60
4	65
5	70
6	75
7	80
8	85
9	90
A	95

La rubrique "code" permet de repérer, sur un caractère, chacune des modalités d'un facteur

Figure 42.2

La taille de l'échantillon est fixée en fonction du facteur qui a le nombre de modalités le plus élevé. Ici, il s'agit de T3 (niveau de charge) avec 11 modalités. Ainsi le plan comprendra au moins 11×5 (coefficient d'équilibrage du plan) soient 55 scénarios, donnant lieu au minimum à 275 simulations.

Effets des facteurs sur les performances (ACP)

Une ACP est effectuée sur les données réduites (c'est-à-dire "ramenées à une même échelle") de cette première campagne de simulation.

Le premier plan factoriel (cf figure 42.3), qui synthétise 70% de l'information totale, met en évidence :

- l'influence prédominante du facteur T3 (charge de l'atelier) sur les autres facteurs,
- la position excentrée des scénarios caractérisés par un taux de charge supérieur à 80% ; ils sont associés à de fortes dégradations des critères d'en-cours et durées de passage.

Recherche des valeurs "moyennes"

Compte tenu des observations précédentes, nous prendrons pour T3 une valeur située au milieu du nuage, 70% par exemple. Par contre, T2 (ratios de production) n'a pas une influence très marquée sur l'organisation du nuage. On peut donc prendre, en ce qui concerne le facteur T2 une répartition quelconque de la fabrication. Nous nous arrêterons, finalement, sur une répartition équilibrée (20% de chaque gamme).

Les standards

Afin de nous garantir un environnement de production sans problème, nous avons fixé les standards suivants pour le bloc "Type de production" :

- | | | |
|-----------------------------|---|----------------------|
| - T1 (type d'atelier) | = | (G1, G2, G3, G4, G5) |
| - T2 (ratios de production) | = | (20, 20, 20, 20, 20) |
| - T3 (niveau de charge) | = | 70% |

Etape 1 : cadrage des simulations - détermination du contexte

Facteurs "T"
Plan factoriel des axes 1 et 2
Projection des individus

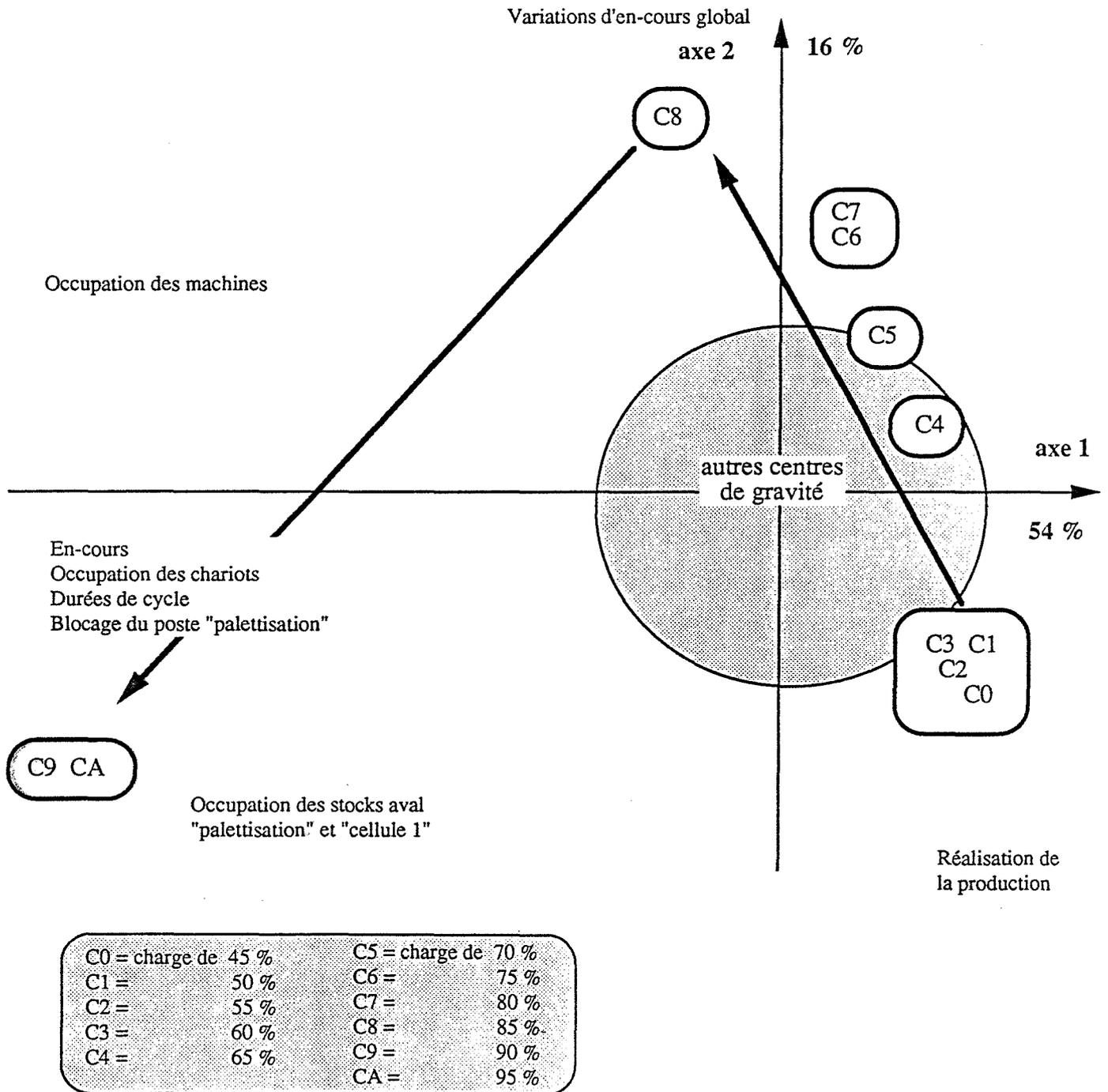


Figure 42.3

Etape 1 : cadrage des simulations - détermination du contexte

Facteurs "T"
Plan factoriel des axes 3 et 4
Projection des individus

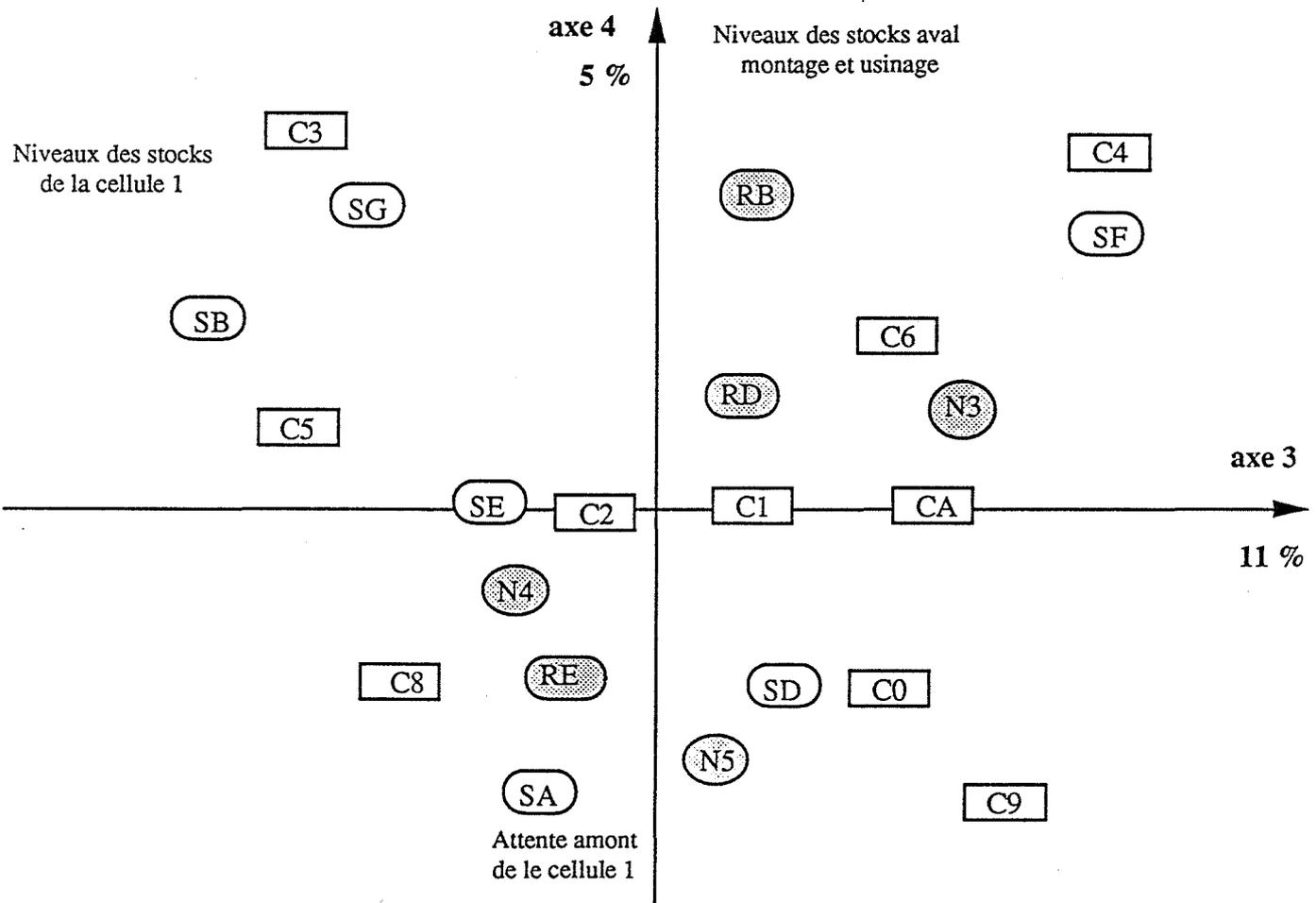


Figure 42.4

Relations inter-blocs

Il n'existe pas vraiment de hiérarchie entre les blocs car T2 apparaît dans les plans factoriels des figures 42.3 et 42.4 moins discriminant que F3 (Stockages) ou même F1 (Nombre de cfg). Les investigations concernant les relations hiérarchiques inter-blocs ne seront pas davantage poursuivies puisque ce premier essai montre qu'il n'existe pas de lien précis entre les blocs T et F.

4.2.1.2. Les standards du bloc "O"

Une procédure analogue à la précédente est conduite sur les facteurs du bloc "O" ; nous testons les effets conjoints et respectifs des facteurs O1 (ordonnancement), O2 (taille des lots), O3 (cadence de lancement). Les modalités des facteurs sont détaillées en figure 42.5.

La campagne est caractérisée par :

- T1 = (G1,G2,G3,G4,G5) ;
- T2 = (20, 20, 20, 20, 20) ;
- T3 = 70 % de charge ;
- O1 variable entre B, A, I, J, K ;
- O2 variable entre Z, Y, X, V, T, S ;
- O3 variable entre "1", "2", "3" ;
- F1 = 4 chariots ;
- F2 = 30 m/min ;
- F3 = stockage A (cf figure 42.2) ;
- F4 = SPT (Shortest Processing Time).

La taille de l'échantillon doit être au moins de 6 (nombre de modalités de O2) fois 5 (coefficient d'équilibrage du plan) soit 30 scénarios, donc 150 simulations.

Etape 1 : cadrage des simulations

Environnement - Facteurs "O"

Ordonnancements (O1)

<u>code</u>	<u>séquence de lancement</u>				
A	4	5	2	3	1
B	5	4	3	2	1
I	1	2	3	4	5
J	1	3	2	5	4
K	3	4	1	5	2

Les gammes 4 et 5 comprennent 5 opérations, les gammes 2 et 3 en comprennent 4 et la gamme 1 seulement 3.

1) Les ordonnancements "A" et "B" privilégient les grandes gammes, "I" et "J" les petites gammes, "K" est un mélange.

2) En seconde priorité, pour "A" et "I" on choisit la gamme qui commence sur M2 plutôt que sur M3 comme pour "B" et "J".

Taille de lots (O2)

<u>code</u>	<u>nombre de pièces par lot</u>
Z	50
Y	100
X	150
V	16
T	80
S	160

Les tailles de lot V, T, S correspondent à des multiples entiers de palettes.

Cadences de lancement (O3)

<u>code</u>	<u>coef</u>
1	1
2	2
3	3

A partir du volume de production et de la taille des lots, on calcule le nombre de lots à lancer sur la période de fabrication ainsi que l'intervalle de temps correspondant à des entrées dans l'atelier uniformément réparties au cours du temps. Cet intervalle est la cadence de base : C0.

Cadence = "1" signifie que l'on utilise la cadence de base,

Cadence = "2" est 2 fois plus rapide que C0,

Cadence = "3" est 3 fois plus rapide que C0.

Figure 42.5

Effets des facteurs sur les performances (ACP)

Une ACP normée (ACP sur données réduites) est effectuée sur cette série d'observations. Les résultats sont résumés à 71 % par le premier plan factoriel (cf figure 42.6). L'analyse détaillée est fournie en annexe J. On note l'influence prédominante du facteur O3 (cadence de lancement) sur la répartition des points ; c'est la cadence la plus faible (cadence "1") qui donne les meilleurs taux de production, en-cours et durées de passage. Vient ensuite l'influence du facteur O2 (taille des lots), avec un effet moins net. C'est surtout la taille "V" (un lot = une palette), qui se démarque des autres ; elle ne donne pas de très bons taux de production.

Recherche des valeurs "moyennes"

C'est la cadence "basse" de O3 qui, d'après les projections dans le premier plan dégrade le moins les indicateurs. Quant à O2, mis à part le fait qu'il faut éviter "V" et peut-être "X", les autres choix restent possibles. On prendra "T" (80 pièces) qui est la modalité de O2 la mieux située dans les différents plans (cf annexe J). En ce qui concerne le facteur O1, il est difficile de cerner son influence sur les performances. On prendra donc un ordonnancement au hasard, que l'on répétera à chaque simulation.

Les standards

De même que pour le bloc "T", nous recherchons des standards tels qu'ils nous garantissent un environnement a priori sans problème.

O1 = (G5 G4 G2 G3 G1)

O2 = T (80 pièces par lot)

O3 = 1 (cadence de lancement la plus basse)

Etape 1 : cadrage des simulations - détermination du contexte

Facteurs "0"
Plan factoriel des axes 1 et 2
Projection des objets

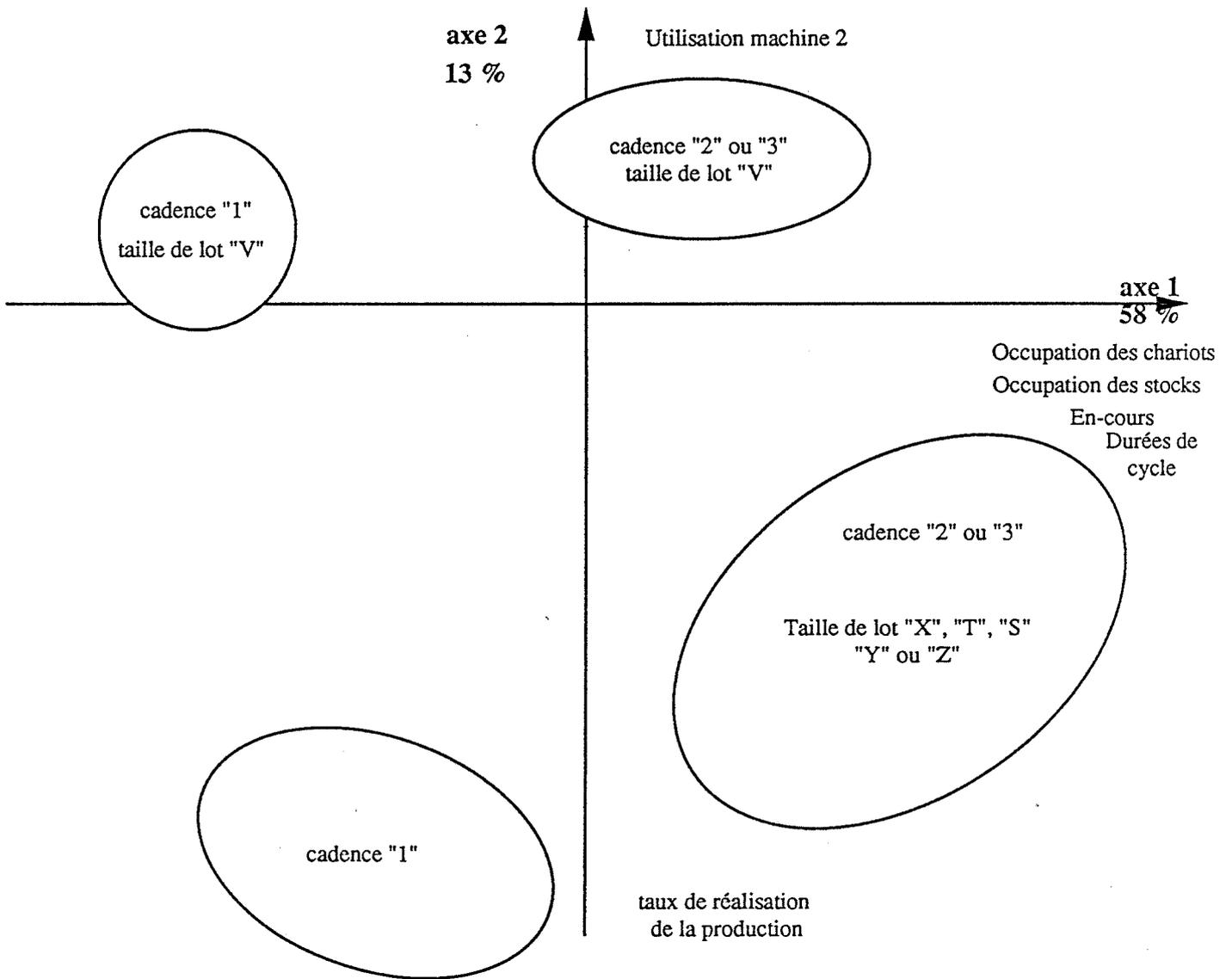


Figure 42.6

4.2.1.3. Synthèse de la phase de cadrage des simulations

Le cadre expérimental est complètement défini, les standards "T" et "O" sont déterminés. On s'appuiera sur ce contexte pour passer aux campagnes d'affinage des facteurs et indicateurs, développées dans le paragraphe suivant.

4.2.2. Etape 2 : Affinage des facteurs et des indicateurs

Les facteurs des blocs non actifs (T et O) sont fixés à leurs valeurs standard. Reste à étudier les effets des facteurs actifs (bloc F).

La phase d'affinage consiste :

- à identifier les indicateurs de performance les plus sensibles aux variations des facteurs actifs, c'est-à-dire les indicateurs qui apportent le plus d'information sur l'état du système.
- à sélectionner les facteurs, ou certaines modalités de facteurs, qui engendrent des comportements suffisamment différenciés de l'atelier.

Nous nous aiderons, pour ces deux phases, de la technique de l'ACP afin de rendre compte de la représentativité des indicateurs d'une part, de la dispersion ou du regroupement des objets selon leur nature d'autre part.

4.2.2.1. Affinage des indicateurs

Le corps de la procédure d'affinage des indicateurs est constitué des deux blocs d'opérations de la figure 42.7. Ces blocs sont répétés, ensemble ou seulement le deuxième, selon deux procédés itératifs complémentaires, l'un visant à réduire le nombre des indicateurs pour n'en garder que les plus essentiels, l'autre cherchant au contraire à élargir cet ensemble afin d'augmenter le potentiel d'information contenu dans les axes de l'ACP. Ces deux mécanismes sont décrits dans la figure 42.7. On arrête les itérations lorsque le nuage des individus

Affinage des indicateurs

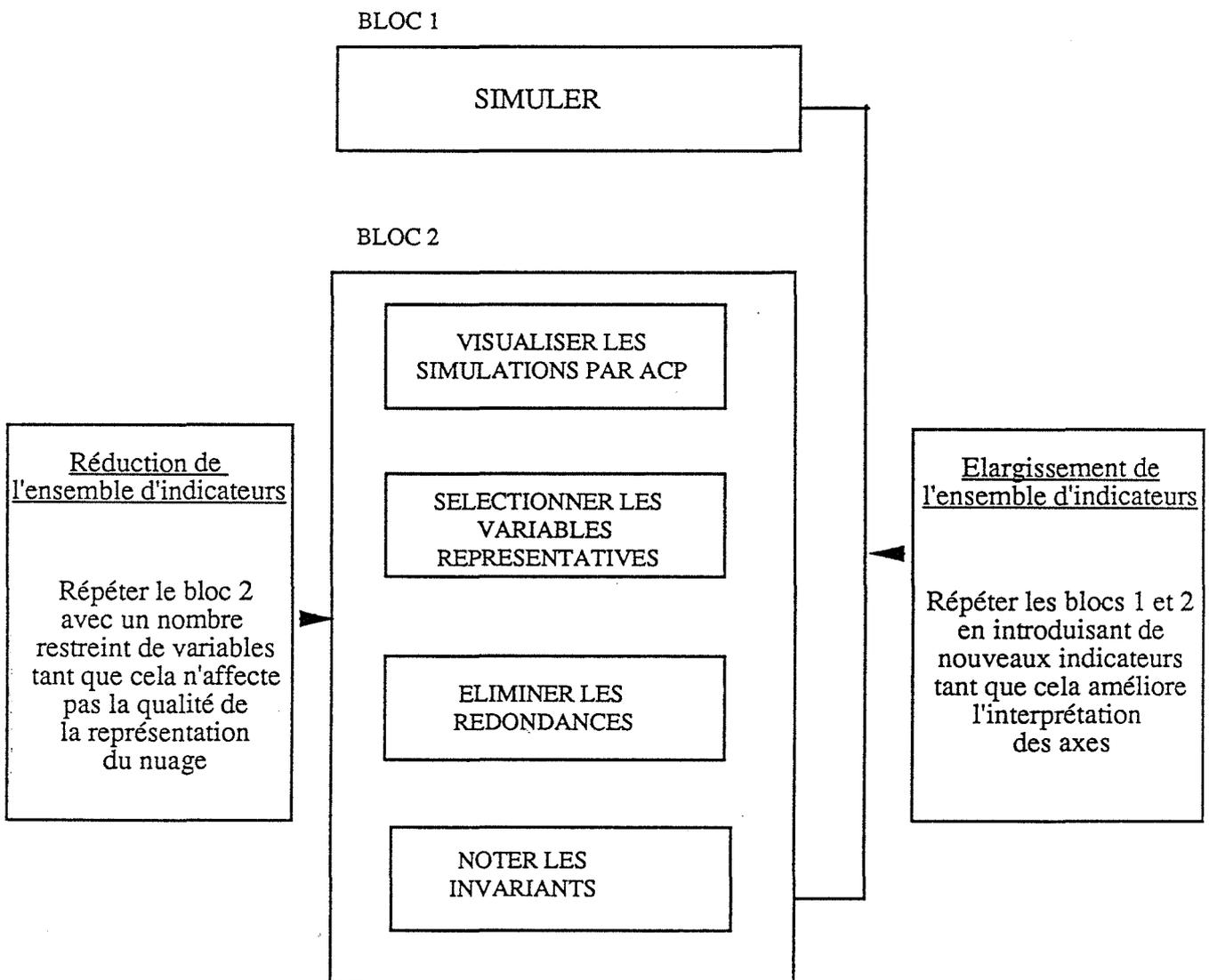
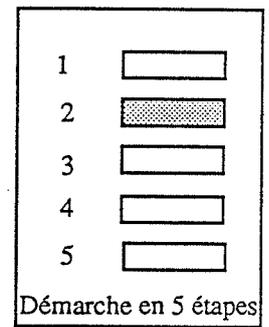


Figure 42.7

est bien représenté sur les axes (pourcentage de variance expliquée sur 4 axes supérieur à 80, par exemple) et que les indicateurs choisis conduisent à la distinction claire de groupements d'individus ou "types". Ainsi on peut espérer mettre à jour une structure interne des données.

Détaillons les différents moments de ces procédures.

Bloc 1

Simuler : C'est exécuter une campagne de simulations. On enregistre les valeurs de N indicateurs, fournies sous forme de tableau au bloc d'opérations suivant.

Exemple :

Dans un premier temps, afin de garder un plus grand contrôle sur l'interprétation de l'ACP, une partie seulement des facteurs du bloc "F" est rendue active.

Le contexte de simulation de la campagne "Affinage des indicateurs" est le suivant :

- T1 = (G1,G2,G3,G4,G5) ;
- T2 = (20, 20, 20, 20, 20) ;
- T3 = niveau de charge de 70% ;
- O1 = (G5, G4, G2, G3, G1) ;
- O2 = 80 pièces par palette ;
- O3 = cadence de base (cadence "basse") ;
- F1 variable dans (2, 3, 4 ou 5 chariots) ;
- F2 = 30 m/min ;
- F3 variable dans (A, B, D, E, F, G) (cf figure 42.2) ;
- F4 = SPT.

Au démarrage, 248 indicateurs sont enregistrés (cf annexe E).

Bloc 2

Visualiser les simulations par ACP :

Les centres de gravité sont projetés dans les plans définis par les axes factoriels. On retient autant d'axes qu'il faut pour avoir 80% au moins de variance expliquée. Chacun des axes est interprété à l'aide des variables qui ont servi à sa construction. La première interprétation, à partir de l'ensemble initial des variables, servira de référence initiale pour mesurer les améliorations apportées par les procédures de sélection et d'élimination. De même, l'organisation du nuage selon la première analyse constituera également une référence initiale.

Exemple :

Une ACP effectuée sur l'échantillon décrit ci-dessus révèle que les quatre premiers axes sont significatifs pour l'interprétation. Ils expliquent 80% de la variance totale.

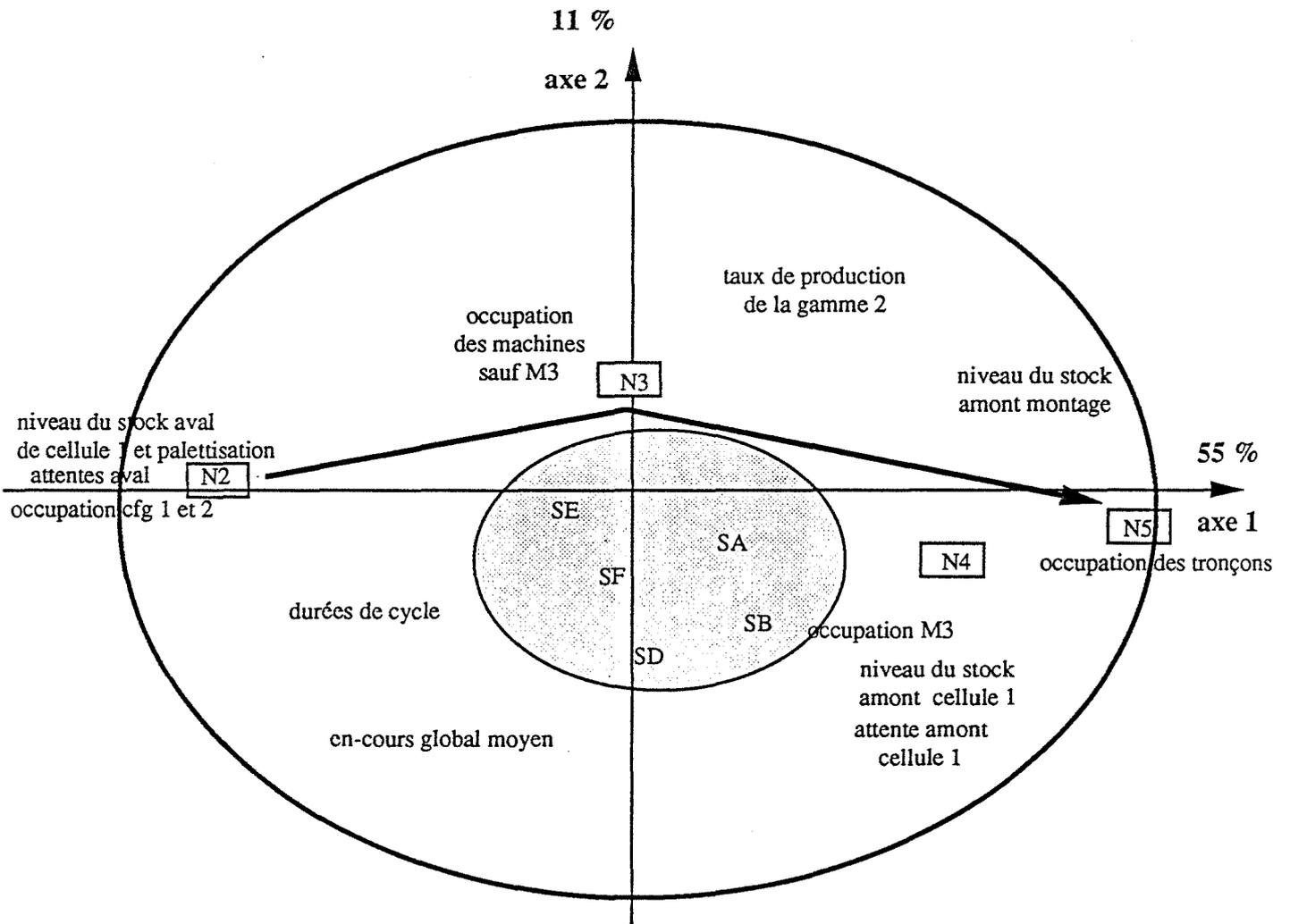
L'axe 1 (cf figure 42.8) est l'axe du système de transport ; il oppose "mauvaise évacuation des postes" (durées d'attente aval, niveau des stocks aval, occupation des cfg 1 et 2) à "alimentation rapide des postes" (durées d'attente amont, niveau des stocks amont).

L'axe 2 montre la sensibilité particulière de la gamme 2 aux phénomènes d'engorgement du système et son comportement spécifique par rapport aux autres gammes ; il oppose en effet le taux de réalisation de la gamme 2 à l'en-cours global et aux durées de passage des palettes dans l'atelier.

Les axes 3 et 4 ne sont pas très significatifs car ils ne représentent qu'une faible part de l'inertie globale. Cependant, pour résumer on peut dire que l'axe 3 est l'axe de l'utilisation des différentes parties de l'atelier ; il oppose l'utilisation du début de l'atelier : la palettisation (durée d'attente en amont, occupation du poste) à l'utilisation

Etape 2 : Affinage des indicateurs et des facteurs

Affinage des indicateurs Plan factoriel des axes 1 et 2



N i : i cfg mis en jeu (facteur F1)

S a : stockage codé a (facteur F3)

Figure 42.8

de la fin de l'atelier : le montage (niveau du stock aval). L'axe 4, quant à lui, est constitué essentiellement par l'opposition entre taux d'engagement du poste de montage, taux d'occupation des cfg et taux de production global, d'une part, et taux d'occupation du stock aval du montage, d'autre part.

Sélectionner les variables représentatives :

Sont représentatives de l'organisation du nuage les variables qui présentent les plus fortes contributions aux axes. Il est a priori intéressant de les garder, à moins qu'elles ne présentent de trop grandes redondances entre elles.

Exemple :

A l'issue de l'ACP décrite plus haut, on relève dans le plan des axes 1 et 2 (cf figure 42.8) des indicateurs beaucoup plus représentatifs que les autres :

- taux d'occupation des cfg n°1 et 2,
- niveau du stock amont de la cellule 1,
- durée d'attente en amont de ce poste,
- niveaux de tous les stocks aval,
- durées d'attente en aval des postes palettisation, cellule 1 et montage,
- taux de production de la gamme n°2,
- durée de passage par lot et par palette des gammes 2, 3, 4 et 5,
- en-cours global moyen et maximal.

Viennent ensuite, dans le plan des axes 3 et 4 (non représenté), des indicateurs nettement moins représentatifs :

- taux d'occupation de la palettisation et du montage,
- niveau du stock amont de la palettisation et du montage,
- durées d'attente en amont de ces postes,
- taux de production de la gamme n°3 et taux de production global.

On retrouve des indicateurs de chacune des trois grandes catégories de critères : en-cours, taux d'engagement des équipements, durées. Ces trois éclairages sont nécessaires à l'interprétation du nuage.

Eliminer les redondances :

Sont redondants entre eux les indicateurs corrélés de la même façon avec la totalité des autres variables. Leurs corrélations aux axes sont semblables pour tous les axes de l'analyse. Utiliser l'un ou l'autre indicateur est indifférent. Il n'est pas nécessaire, par conséquent, de les garder tous.

Dans un premier temps, une certaine redondance des mesures est indispensable pour sélectionner les plus représentatives [Abdali 89]. L'**élimination des redondances inutiles** est effectuée en repérant les corrélations systématiques sur les premiers axes. On garde l'indicateur qui fournit le plus d'information sur le nuage (le plus éloigné sur l'axe). Il existe, par contre, des **redondances "utiles"** ou "nécessaires" ; ce sont celles qui lient des indicateurs de catégories différentes (durées et taux d'engagement, par exemple) et sont donc nécessaires à l'interprétation multi-critère du nuage ; ce sont aussi celles qui reflètent le lien entre critères de même catégorie mais de niveau de détail différent (en-cours global et occupation individuelle des stocks, par exemple).

Exemple :

On relève, toujours à partir du même échantillon, les groupes de variables redondantes suivants :

- durées d'attente aval et niveaux des stocks aval ;
- durées de passage par lot et durées de passage par palette ;
- taux de production global et par gamme ;
- taux d'occupation des tronçons entre eux ;
- durées d'attente amont et niveaux des stocks amont.

La redondance entre les durées de passage par lot et par palette est inutile (indicateurs de même catégorie et de même niveau), de même que celle entre les taux d'occupation des tronçons (un seul indicateur pour l'ensemble suffirait). Par contre, les autres redondances seront conservées car elles concernent des indicateurs de catégories différentes (durées d'attente aval et niveaux des stocks aval, durées d'attente amont et niveaux des stocks amont) ou bien encore parce qu'elles sont l'expression d'un lien "hiérarchique" (taux de production global et taux de production par gamme).

Noter les invariants :

Les indicateurs qui ne varient pas d'une simulation à l'autre apportent des informations sur les **invariants** du système. A l'inverse des précédentes, ces variables ne participent pas (ou peu) à la formation des axes ; elles n'apportent pas d'information sur le nuage. On les repère par leurs très faibles contributions aux axes. Ce sont des indicateurs inutiles pour l'interprétation. Ils seront donc éliminés de l'analyse à moins de vouloir confirmer leur non-variabilité.

Conclusions sur l'affinage des indicateurs

A l'issue des phases précédentes, l'interprétation des axes principaux a permis de révéler que certains indicateurs avaient été mal choisis :

- des **indicateurs non génériques**, dépendants du scénario. Par exemple, les taux d'utilisation individuels des chariots, %C1, %C2, %C3, %C4, %C5, n'ont de sens que si les chariots sont effectivement mis en circulation ; le taux d'occupation du cfg n°4 n'a pas de sens pour un scénario à 2 cfg. Dans ce cas, on se ramène à un indicateur interprétable de façon générale en prenant le taux d'utilisation moyen du parc-chariots. Les niveaux de stocks, en nominal, sont également dépendants de la capacité attribuée aux stocks. On prendra dans la

suite un nouvel indicateur, le taux de remplissage du stock, c'est-à-dire son niveau sur sa capacité.

- des indicateurs conduisant à une **interprétation triviale**. Les taux d'occupation des tronçons font partie de cette catégorie. En effet, ils sont complètement dépendants du nombre de cfg ; plus il y a de cfg, plus les tronçons sont (tous) occupés.

- des **indicateurs dont le sens est ambigu**. En effet, comment interpréter un écart-type, mesure ordinaire de variabilité, calculé sur un taux d'occupation de machine, c'est-à-dire une variable qui prend alternativement les valeurs "1" et "0" pendant une durée plus ou moins longue.

- des **indicateurs non cohérents** avec une logique de "système". Ainsi, on supprimera les indicateurs des stocks et durées d'attente en amont de la palettisation car ils sont le reflet de phénomènes qui se déroulent à l'extérieur du système de production proprement dit. On ne s'attache pas à mesurer la relation de l'atelier avec les autres parties de l'usine.

En résumé, après plusieurs itérations de ce type, nous sommes passés de 248 variables initiales à 161. Nous avons supprimé :

- les durées de passage par lot qui faisaient double emploi avec les durées par palette.
- les taux d'occupation des tronçons, inutiles.
- les écart-types sur l'occupation des machines.
- les taux d'occupation individuels des chariots, non génériques.
- les variables "amont palettisation", indicatrices de phénomènes extérieurs au système.

Nous avons remplacé :

- les niveaux des stocks, en nominal, par des taux de remplissage des stocks.

Nous avons ajouté :

- des taux de blocage des machines (temps passé à attendre une place en stock aval pour libérer la machine / temps total) ; en effet, le taux d'occupation global n'est pas assez pertinent : il faut distinguer "occupation productive" et "occupation par blocage".
- une durée globale de passage toutes gammes confondues, en moyenne et écart-type.
- un taux d'utilisation global des machines, moyenne des taux d'utilisation de l'ensemble des machines.

Les 161 indicateurs finalement retenus sont détaillés en annexe H.

4.2.2.2. Affinage des facteurs

L'affinage des facteurs sous contrôle, tout comme celui des indicateurs, est également un processus itératif, que l'on peut exécuter en parallèle au premier. La procédure est décrite dans figure 42.9. On arrête lorsque les individus font l'objet de regroupements suffisamment distincts les uns des autres.

Détaillons les étapes de la figure 42.9.

Définir le domaine de variation des facteurs :

Il s'agit de définir la liste des modalités que peuvent prendre les facteurs. On délimite ainsi l'espace des scénarios potentiels. Les listes-références sont mémorisées dans les fichiers d'environnement utilisés lors de la génération automatique des scénarios.

Exemple :

La liste des "stocks" de la figure 42.2 représente le domaine de définition initial du facteur F3 (capacités de stockage).

Affinage des facteurs

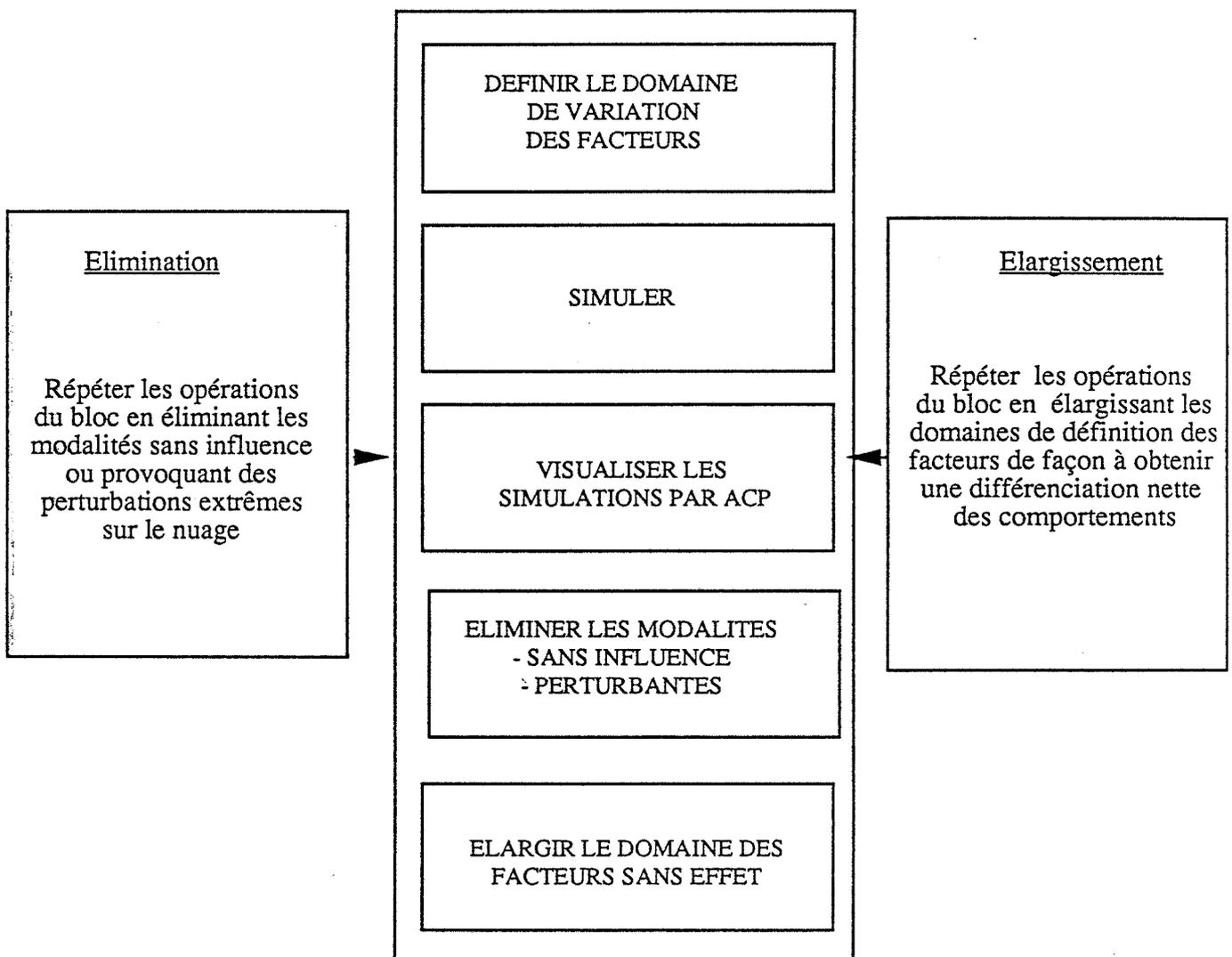
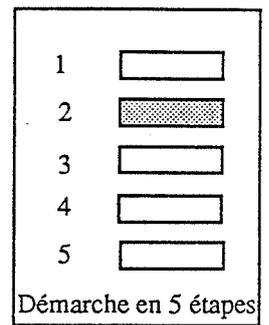


Figure 42.9

Simuler : C'est exécuter une campagne de simulations, les facteurs évoluant dans l'environnement qui leur a été fixé précédemment.

Exemple :

La campagne de simulation qui sert de support est celle sur laquelle nous avons affiné les indicateurs. Deux facteurs seulement sont actifs pour la première analyse afin d'observer si une structuration apparaît déjà sur un essai de dimension réduite ; dans ce cas, on complexifiera le plan dans une étape ultérieure. Nous avons choisi les facteurs qui a priori semblaient les plus ségrégatifs : "Nombre de cfg" et "capacités de Stockage".

Visualiser les simulations par ACP :

Les centres de gravité sont projetés dans les plans définis par les axes factoriels. On retient autant d'axes qu'il faut pour avoir 80% au moins de variance expliquée. On observe l'influence de chacun des facteurs dans les différents plans, c'est-à-dire la répartition des points suivant les variations des facteurs. Le facteur peut "donner une direction" au nuage, comme le facteur F1 (Nombre de cfg) de la figure 42.8, ou bien conduire à la formation de groupes d'individus, etc...

Eliminer :

Certaines occurrences n'ont aucun effet sur la structuration du nuage (les points correspondant à ces occurrences ne se démarquent pas de la "masse" du nuage), alors il faut les éliminer. Si aucune occurrence, pour un facteur donné, n'a d'effet notable, alors on supprime le facteur en le transformant en constante (après avoir tenté une procédure d'élargissement, cependant).

Certaines occurrences, au contraire, ont une **influence très forte** sur les comportements. Elles correspondent à des conditions de fonctionnement que l'on peut appeler "**extrêmes**" (relativement aux autres). Il est préférable de les exclure du domaine car leur effet est tellement important qu'il masque toutes les autres relations (en fait, ce sont souvent des combinaisons de modalités de différents facteurs qu'il faut éliminer plutôt qu'une seule modalité).

Elargir :

Lorsque toutes les modalités d'un facteur se trouvent projetées à proximité les unes des autres, c'est qu'elles ne présentent **pas de divergences fortes** du point de vue de leurs effets sur les indicateurs du système. On essaie alors d'élargir le domaine dudit facteur afin de lui faire produire des effets de plus grande amplitude. Si, malgré tout, on n'enregistre pas de différenciation c'est que le facteur lui-même n'est pas influent : on procède alors à une élimination (cf étape précédente).

Exemple :

Sur le premier plan factoriel de la première ACP effectuée sur l'échantillon "Affinage" (cf figure 42.8), le facteur "Nombre de cfg" oriente bien le nuage mais la différenciation entre les modalités du facteur "capacités de Stockage" est insuffisante ; le nuage est trop rassemblé au centre : on élargira le domaine de ce facteur.

Conclusions sur l'affinage des facteurs

Nous avons dit que les deux processus d'affinage (indicateurs et facteurs) se déroulaient en parallèle ; ce n'est pas tout-à-fait exact : on procède plus souvent en alternance car les modifications exercées sur le contexte ou l'environnement par l'exécution de l'un des modules ne sont pas sans effet sur l'autre.

Après plusieurs itérations du processus, on en arrive à l'élargissement du domaine des facteurs "capacités de Stockage" et "Nombre de cfg". Ce cas simple (variation de 2 facteurs) met en évidence la structuration plutôt triviale du nuage, d'abord par F1 puis par F3. On complexifie alors les interactions en rendant actifs à leur tour les deux autres facteurs du bloc "F". Leur domaine est également affiné. Pour F4 (règle de gestion des stocks amont), nous avons choisi la gestion du "premier entré premier sorti" (FIFO) pour sa facilité d'implantation dans l'atelier, et la gestion du "plus petit temps opératoire" (SPT) pour sa réputation de fournir les meilleurs résultats. Les 4 facteurs évoluent finalement à l'intérieur des domaines suivants (cf annexe G) :

- F1 : 2,3,... ou 8 cfg ;
- F2 : 10, 15, 30 ou 60 m/min ;
- F3 : stockages A, B, D, E, F, G, H, I ou J ;
- F4 : SPT ou FIFO.

4.2.2.3. Conclusion de la phase d'affinage (Etape 2)

La phase d'affinage a conduit, d'une part, à la reconnaissance de 161 indicateurs caractéristiques du système, indicateurs représentatifs de chacune des trois grandes catégories de critères : en-cours, engagement des ressources, durées ; d'autre part, un domaine de variation cohérent a été fixé pour les facteurs de fonctionnement / dimensionnement, définissant par là l'ensemble des scénarios potentiels de l'étude.

4.2.3. Synthèse du chapitre

Les étapes 1 et 2 sont un préliminaire à la préparation de résultats exploitables et donc à la génération de connaissance réutilisable. C'est la négligence de ces étapes qui conduit bien souvent à l'obtention de résultats mal ciblés par rapport à l'objectif initial et dont l'interprétation n'apporte pas de réponse aux questions posées.

4.3. DESCRIPTION SYNTHETIQUE DU NUAGE PAR ACP

Les étapes préliminaires à la campagne de simulation achevées, le plan d'expérience peut être exécuté. L'objectif est de parvenir à un dimensionnement satisfaisant en nombre de cfg et en capacité de stockage, le terme dimensionnement recouvrant en outre des choix de fonctionnement des équipements : vitesse des cfg et gestion des stocks-machines. Ainsi, les expérimentations sur lesquelles nous avons fondé notre méthode d'exploitation des résultats concernent le groupe "F" des facteurs.

Les itérations successives sur les étapes "choix du contexte" et "affinage des facteurs et indicateurs" ont permis de construire un cadre de simulation adéquat, c'est-à-dire assez neutre.

4.3.1. Présentation de la campagne de test

Conformément aux résultats des deux étapes précédentes, les facteurs des groupes "T" et "O" sont fixés à leurs valeurs "standard" et constituent le cadre de l'étude, qui restera invariant dans la suite de l'exposé. La liste et l'explication des options possibles se trouve en annexe F. Le facteur T1 n'est plus celui des phases préliminaires car nous avons choisi un type d'atelier qui mobilise une plus large part du système de production. Nous faisons le postulat que le changement sur T1 n'affecte pas les standards établis pour T et pour O. Ainsi nous retenons les indicateurs (au nombre de 161) sélectionnés et affinés dans la phase précédente (cf annexe H).

+ T1 = {G5, G7, G20, G21} , modalité "K" du fichier TYPE (cf annexe F)

Quatre gammes sont mises en jeu. Seul le poste "cellule 2" n'est pas sollicité par ces gammes. Le réseau de transport, quant à lui, est utilisé dans sa totalité.

+ T2 = {25, 25, 25, 25}, modalité "5" du fichier RATIO (cf annexe F)

Le volume global de production est réparti uniformément entre les 4 gammes.

+ T3 = charge de 70% , modalité "5" du fichier CHARGE (cf annexe F)

Le niveau de charge n'est pas trop élevé, afin de permettre l'observation du fonctionnement "moyen" de l'atelier, et non à ses limites.

+ O1 = (G7 - G21 - G5 - G20)

Cet ordonnancement a été choisi au hasard dans le fichier ORDO (cf annexe F).

+ O2 = 80 pièces , modalité "T" du fichier TAILLE (cf annexe F)

La taille des lots est exactement de 5 palettes, avec 16 pièces par palette.

+ O3 = cadence "basse", modalité "1" du fichier CADENCE (cf annexe F)

C'est la cadence "basse". Les lancements sont effectués régulièrement au long de la période avec l'intervalle de temps maximal (toutes les 68 minutes, dans ce cas précis).

La combinaison des facteurs T2, T3, O3 et O2, compte tenu des gammes mises en jeu par T1, conduit à la génération d'un plan de fabrication de 1600 pièces, réparties en 20 lots (cinq de chaque gamme) de 80 pièces (cinq palettes par lot). Les lots entrent dans l'atelier toutes les 68 minutes environ.

+ F1 variable entre 2 et 8 chariots ;

+ F2 variable entre 10, 15, 30 ou 60 m/min ;

+ F3 variable entre les stockages A, B, D, E, F, G, H, I, J ;

+ F4 variable entre SPT et FIFO.

Attention : les modalités A, B, ...J du facteur F3 ne recouvrent pas les mêmes combinaisons de stockage que celles de la figure 42.2 ; en effet, F3 a été "affiné" depuis lors, et ses nouvelles valeurs sont expliquées en annexe F.

Compte tenu des gammes mises en oeuvre et des vitesses des cfg, les temps de transport sont loin d'être négligeables devant les durées de fabrication au sens strict. Suivant la vitesse de déplacement des chariots, les durées de transport peuvent même dépasser celles de la fabrication.

Le plan comprend 4 facteurs actifs : F1, F2, F3, F4 puisque l'objectif est d'observer le comportement du système dans une problématique de dimensionnement des équipements. Le facteur F3 est susceptible de prendre 9 modalités. Il faut donc générer au minimum 45 scénarios, soient 225 simulations. Par mesure de prudence, nous en avons effectué 350, tirées au hasard.

On vérifie par croisement des modalités que les effectifs du plan sont équilibrés, c'est-à-dire que chaque modalité de chaque facteur est présente au moins 5 fois. Dans le cas contraire, on complète le plan par quelques scénarios supplémentaires judicieusement choisis, de façon à compléter les modalités trop peu nombreuses. Les tableaux de modalités sont détaillés au complet en annexe J. Finalement, l'échantillon de base est constitué de 360 simulations.

On trouvera également en annexe J une analyse unidimensionnelle des indicateurs. Cela permet de quantifier des expressions telles que "valeur faible" ou "valeur forte" de tel ou tel indicateur. On constate ainsi que :

- jamais plus de 86% du plan de production prévu n'est réalisé, ce qui est dû aux aléas sur les rythmes de lancement des lots en production ; ces aléas introduisent donc un retard non négligeable et non récupérable.
- les durées de passage observées, même les meilleures, sont largement supérieures aux durées théoriques (au moins 2 fois et jusqu'à 15 ou même 30 fois selon les gammes).
- les taux observés d'engagement des machines, aux aléas des durées opératoires près, sont en moyenne conformes aux taux d'engagement théoriques.
- il en est de même pour les taux d'occupation des chariots, ce qui tend à laisser penser que les durées de passage sont surtout constituées des attentes en stock.
- d'une manière générale, les écarts entre les valeurs faibles et les valeurs moyennes sont très grands, c'est-à-dire que les mauvais scénarios conduisent à une dégradation extrême des performances, très loin des performances moyennes.

En fait, compte tenu du contexte de simulation que l'on s'est fixé, la plupart des scénarios donnent des résultats "dans la moyenne", à part quelques uns que l'on pourrait qualifier de "scénarios-catastrophe". Ces scénarios sont repérés par l'ACP.

4.3.2. Etape 3 : description de l'ensemble des simulations par ACP

Le processus général est décrit dans la figure 43.1. Détaillons les différentes phases.

4.3.2.1. Mise en oeuvre

Une ACP normée est effectuée sur le tableau croisant les individus-simulations par les variables-indicateurs de performance, qui sont dites "actives" ou "principales". Comme il a été indiqué plus haut, seuls les centres de gravité sont affichés, pour des raisons de lisibilité des graphes. Ces points ne participent pas à la construction des axes.

Le nombre d'axes à retenir pour avoir au moins 80% de variance expliquée est donné par l'histogramme des valeurs propres de la matrice des corrélations.

Exemple :

Finalement notre échantillon de test est constitué de 360 simulations. Le type d'atelier retenu touche 70 indicateurs sur le potentiel total des 161 présentés plus haut. 70 variables sont donc calculées et participent à l'analyse : taux de réalisation des gammes, durées de cycle des gammes en moyenne et écart-type, taux d'engagement et de blocage des machines, taux d'engagement des cfg, en-cours global moyen, maximal, taux d'occupation des stocks, durées d'attente amont et aval des machines, en moyenne et écart-type.

Nous retenons les quatre premiers axes, qui expliquent 81% de la variance totale.

4.3.2.2. Exploitation

Rappelons (annexe J) que :

- en-cours global moyen	élevé	signifie	5,8 palettes (au maximum)
-	faible		1,6 palettes (au minimum)

Description des simulations avec l'ACP

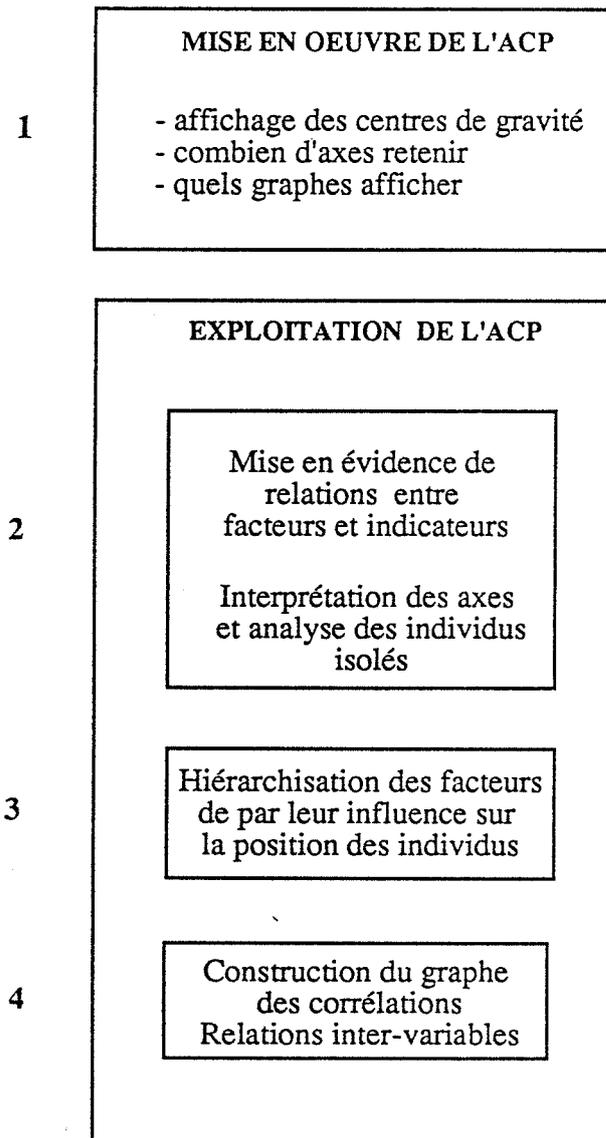
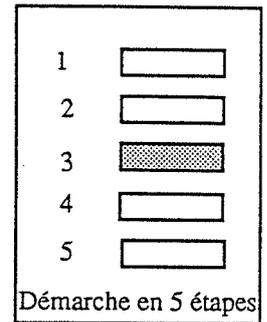


Figure 43.1

- taux de production global	élevé	85 %	
-	faible	26 % !!	
- durée de passage globale	élevée	3750 s	
-	faible	140 s	
- blocage palettisation	élevé	84,4 %	
-	faible	0 %	
- engagement des machines	élevé	64,1%	(taux théorique)
-	faible	19,8 %	
- durée d'attente aval pal.	élevée	709 s	
-	faible	2 s	
- autre durée d'attente aval	élevée	117 s	
-	faible	2 s	
- durée d'attente amont	élevée	26,9 s	
-	faible	0 s	
- occupation de stock aval	élevée	100 %	
-	faible	0 %	
- occupation de stock amont	élevée	29 %	
-	faible	0 %	

4.3.2.2.1. L'interprétation des axes

L'importance de chaque axe est mesurée par la part de variance totale qu'il représente. Un axe est caractérisé par les variables qui ont contribué à sa formation ; la position des points dans les plans factoriels permet de compléter cette interprétation.

* **Le premier axe (51 % de variance expliquée)** est construit à parts égales (cf figure 43.2) sur une opposition entre les indicateurs

- durées de passage,
- blocage palettisation,

Etape 3 : Description du nuage par ACP

Plan factoriel des axes 1 et 2

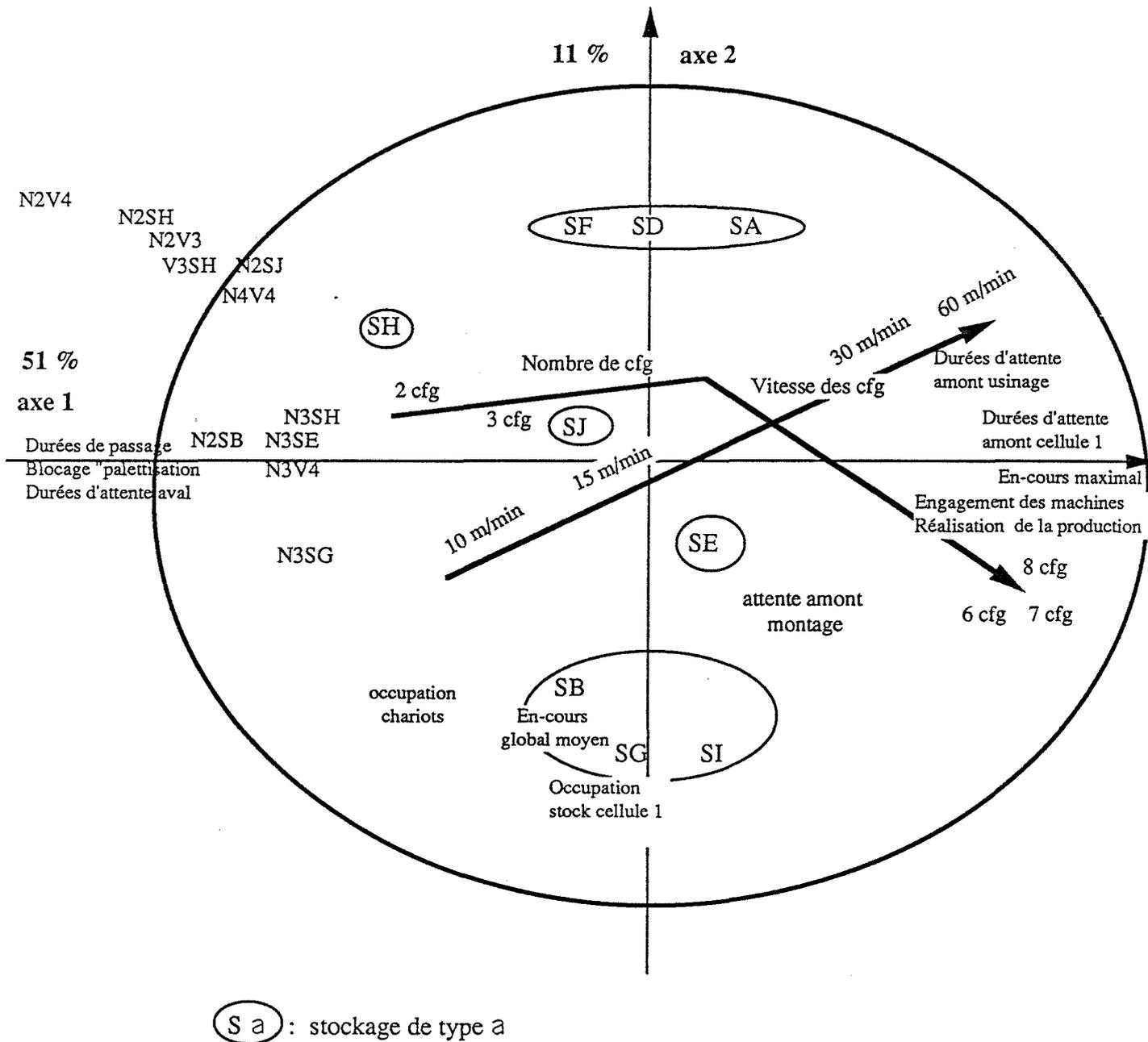


Figure 43.2

- durées d'attente en aval des machines,
- occupation des chariots,

et les indicateurs

- durées d'attente en amont des machines,
- en-cours maximal,
- taux de production,
- engagement des machines.

Cet axe explique le nuage en termes de **durées d'attente, d'engagement des ressources et de production sortie** :

- d'un côté de l'axe, on a un système engorgé lié à un faible dimensionnement du parc-chariot (2 ou 3 cfg) et à de faibles vitesses (10 ou 15 m/min) : les chariots sont très utilisés mais ne suffisent pas à l'évacuation des palettes, ce qui entraîne de fortes durées d'attente aval, le blocage des postes et l'allongement des durées de passage ;
- de l'autre côté, c'est le "fonctionnement fluide" du système (taux de production et engagement des machines élevés), avec, à la limite, un approvisionnement en pièces trop rapide (les attentes amont sont plus élevées).

La projection des centres de gravité fait apparaître l'effet structurant du facteur "Nombre de cfg", le long du **premier axe** et du facteur "Vitesse des cfg", en diagonale. Quant aux stockages et règles de gestion, ils ont peu d'influence dans ce premier plan. L'axe 2 est cependant un peu caractérisé par l'opposition des stockages "F","D" et "A" aux stockages "G" et "I".

L'axe 1 peut être appelé l'axe du transport.

L'influence du premier facteur est si forte qu'elle risque de masquer les effets des autres facteurs ; c'est pourquoi nous visualisons la projection des points dans le plan des axes 1 et 2 (cf figure 43.2) mais aussi dans celui des axes 2 et 3 (cf figure 43.4).

Etape 3 : Description du nuage par ACP

Domaine de variation du facteur "Stockage"

code	st1	st2	st3	st4	st5	st6	st7
A	50	50	20	10	10	10	10
B	10	50	20	10	10	10	10
D	50	50	5	10	10	10	10
E	10	50	5	10	10	10	10
F	50	50	20	10	10	2	2
G	10	50	5	2	2	10	10
H	50	50	20	2	2	2	2
I	10	50	5	2	2	2	2
J	20	50	10	5	5	5	5

st1 : stock de la cellule 1

st2 : stock de la cellule 2

st3 : stock aval palettisation

st4 : stock amont usinage

st5 : stock amont montage

st6 : stock aval usinage

st7 : stock aval montage

remarque : on ne s'intéresse pas à st2, stock de la cellule 2, car il n'est pas concerné par cette campagne de simulation.

Capacité globale de stockage

A ---> D ---> F ---> H ---> B ---> E ---> J ---> G ---> I
 110 95 94 78 70 55 50 39 23

Figure 43.3

Etape 3 : Description du nuage par ACP

Plan factoriel des axes 2 et 3

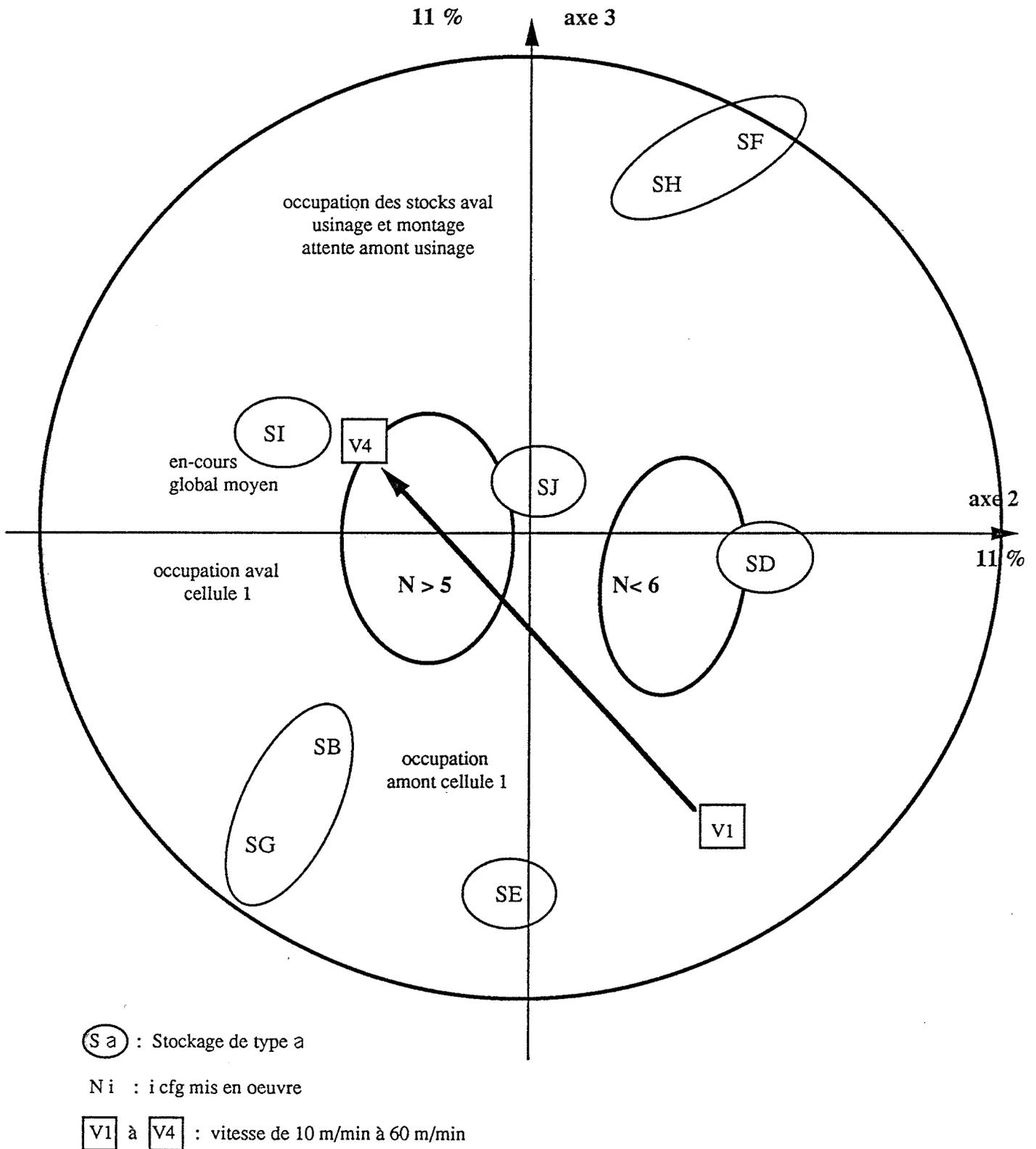


Figure 43.4

* Le deuxième axe (11 % de variance expliquée) est caractérisé principalement (cf figures 43.2 et 43.4) par son extrémité négative, avec les indicateurs :

- d'en-cours global moyen,
- d'occupation des stocks de la cellule 1.

L'axe 2 fournit une explication en termes d'en-cours. Aux valeurs élevées des indicateurs d'en-cours et d'occupation du stock de la cellule 1 correspondent des scénarios à vitesse faible et à stockage "G" ou "I" (cf figure 43.2). Ces scénarios sont caractérisés par de faibles capacités de stockage sur cellule 1 et amont-montage (cf figure 43.3).

Le deuxième axe amène à constater que **l'on ne réduit pas l'en-cours du système en diminuant ses capacités de stockage**. En effet, ce sont, curieusement, les scénarios à faible capacité globale (stockages G, I) qui sont caractérisés par un en-cours moyen élevé, alors que les simulations à forte capacité (stockages A, F, D) ont un en-cours moyen plutôt faible. La cause se trouve non pas prioritairement dans le dimensionnement des stocks mais dans celui du système de transport. Le niveau élevé de l'en-cours n'est pas une conséquence de larges capacités de stockage mais d'une mauvaise circulation des palettes.

Ceci met en évidence la **prédominance des facteurs de transport (nombre et vitesse des cfg)** sur les autres.

* Le troisième axe (11 % de variance expliquée) est défini essentiellement à son extrémité positive (cf figures 43.4 et 43.5) par les indicateurs :

- occupation des stocks aval de l'usinage et du montage,
- attente en aval du montage,

avec une légère contribution, à son extrémité négative, des indicateurs :

- d'occupation de l'amont de la cellule 1.

Attention, l'interprétation doit être prudente : un stock peut être très occupé soit parce qu'il contient beaucoup de palettes soit parce qu'il est petit.

On retrouve figure 43.4 le regroupement des scénarios à stockages I et G, à vitesses faibles et à nombre de cfg élevés, sur les indicateurs d'en-cours et d'occupation du stock aval de la cellule 1.

Il y a une opposition "début d'atelier" (amont cellule 1), avec les stockages G, E, B et "fin d'atelier" (aval usinage et montage), avec H et F. Cette répartition reflète la nature-même des objets. Les stockages G, E, B ont en commun de faibles capacités de stockage sur cellule 1 et de fortes capacités en aval de montage et usinage. H et F présentent le cas de figure inverse. On retrouve effectivement ces deux groupes en opposition sur l'axe 3.

* **Le quatrième axe (8 % de variance expliquée)** est la représentation (cf figure 43.5) de l'opposition entre :

- l'en-cours global moyen,

et les indicateurs :

- taux d'occupation des stocks amont de l'usinage et du montage (en moyenne, maximum et écart-type).

Les stockages qui conduisent à un **en-cours global moyen élevé** sont A et D ainsi que B et E, dans une moindre mesure. Ces stockages sont caractérisés par de **fortes capacités en amont et en aval du montage et de l'usinage**. A et D ont en outre de fortes capacités sur cellule 1 ; ce sont les configurations qui ont les **capacités globales les plus élevées**. Il est intéressant de remarquer que le stockage H est plus lié à I qu'à F, ce qui signifie que le dimensionnement amont sur montage et usinage est plus influent que le dimensionnement de la cellule 1.

* **Le plan factoriel des axes 3 et 4**, qui explique 18,8 % de la variance totale, fait apparaître l'effet structurant du facteur "**Capacités de Stockage**". Les règles de gestion influent très peu. Les points sont organisés selon leur option de stockage : en effet, parmi les centres de gravité représentés, ce sont les "**points-stockages**" qui se trouvent le plus en périphérie du nuage

Etape 3 : Description du nuage par ACP

Plan factoriel des axes 3 et 4

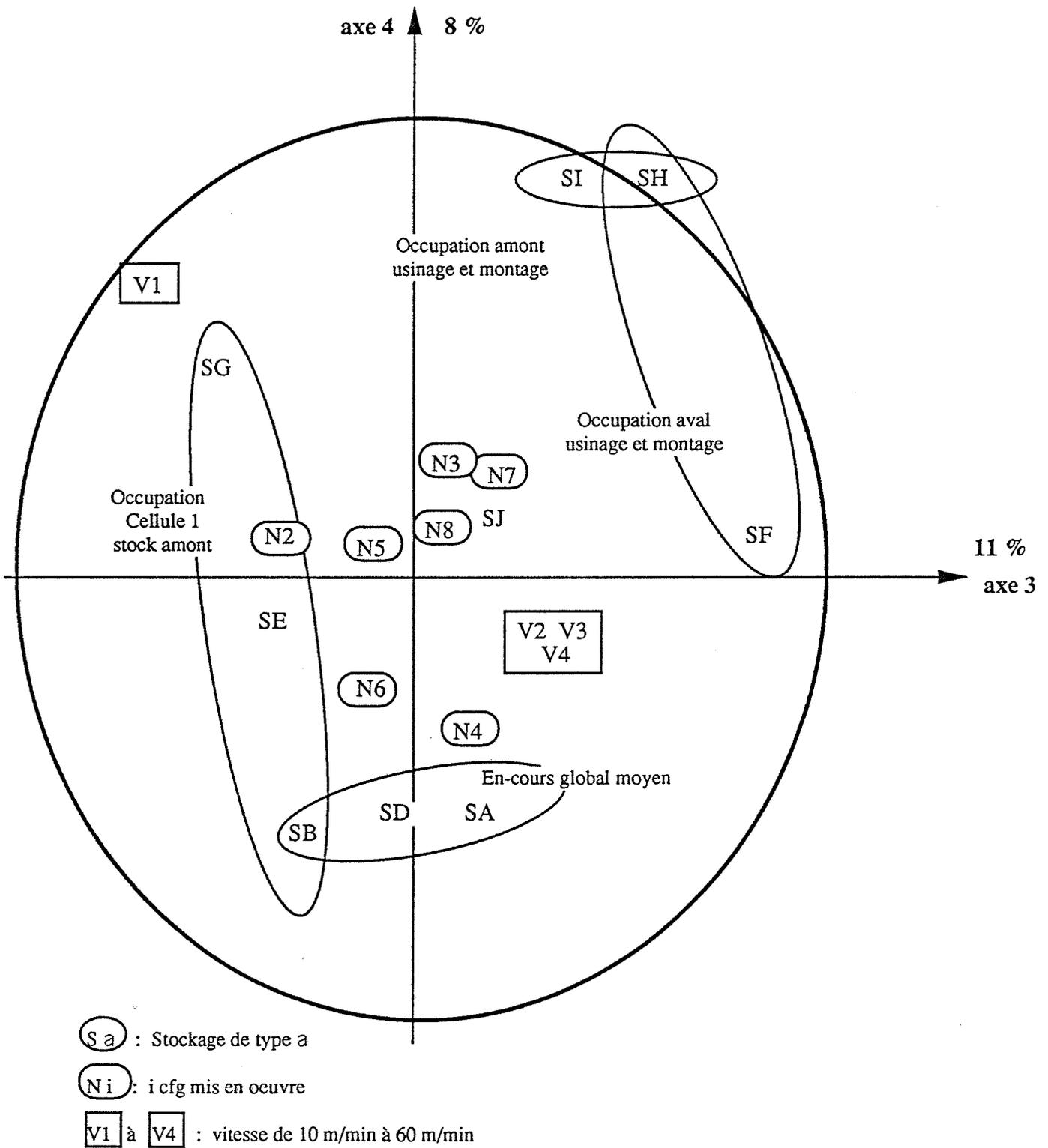


Figure 43.5

Ce plan factoriel est le plan des stockages.

L'examen détaillé de ce dernier plan amène quelques remarques. D'une manière générale, et de façon logique, les scénarios sont bien représentés sur les axes qui correspondent à une forte occupation des stocks faiblement dimensionnés pour ces scénarios-là. Ainsi, les stockages "F" et "H" qui ont de faibles capacités sur les stocks aval, et un large dimensionnement sur la cellule 1 sont bien représentés sur l'axe 3.

On retrouve aisément, à partir de la position des scénarios dans le plan des axes 3 et 4, la configuration de stockage de ces scénarios. Ainsi le stockage B, bien représenté sur les extrémités négatives des axes 3 et 4 a certainement de fortes capacités de stockage en amont de l'usinage et du montage, une faible capacité sur la cellule 1 et de fortes capacités en aval de l'usinage et du montage. On peut vérifier ces suppositions sur la figure 43.3.

En conclusion, le taux d'occupation des stocks est totalement conditionné par le dimensionnement effectué, sauf en ce qui concerne le stock aval du poste de palettisation, dont le taux d'occupation n'apparaît pas sur ces axes. Le fonctionnement de ce stock est sans doute moins simpliste que celui des autres stocks à cause de sa position en entrée d'atelier. En effet, la cadence de remplissage, extérieure au système, est toujours la même d'une simulation à l'autre, alors que la cadence d'évacuation est fonction du nombre et de la vitesse des cfg.

On retiendra que le taux d'occupation du stock aval-palettisation (stock d'entrée de l'atelier) ne dépend pas prioritairement de sa capacité.

Remarques :

- La zone Sud-Est est vide : il n'existe donc pas de cas où l'on ait simultanément un fort en-cours global et de fortes occupations des stocks en aval du montage et de l'usinage, ce qui signifie que si les capacités aval sont larges, alors l'en-cours global n'est pas élevé.

- A fort en-cours global et faible occupation amont du montage et de l'usinage correspondent des stockages "A", "D", "B", qui ont une capacité globale de stockage importante et des stocks amont usinage et montage importants. On observe ici un phénomène difficile à expliquer : "F", de même capacité que "B" en amont de l'usinage et du montage, et de capacité globale plus élevée, est pourtant moins bien représenté sur l'indicateur d'en-cours global. Cela voudrait dire que l'en-cours global moyen n'est pas lié à la capacité sur cellule 1 mais plutôt aux stocks amont et aval sur usinage et montage ; mais alors dans ce cas, "E" devrait faire partie du groupe "A", "D", "B"...puisque'il a la même configuration sur les stocks d'usinage et de montage.

L'analyse factorielle ne permet pas d'expliquer tous les phénomènes observés.

4.3.2.2.2. Les points isolés

On repère, dans le premier plan, des "points-catastrophe". En effet, N2V4 et, à un degré moindre, le groupement (N2SH, N2V3, N3V4, N4V4, N3SG, N3SE, N3SH, N2SB, N2SJ, V3SH) s'opposent au reste des simulations, surtout à celles dont la vitesse des cfg est supérieure ou égale à 30 m/min et le nombre de cfg supérieur à 5. Ces scénarios sont qualifiés de "catastrophiques" car ils enregistrent des performances très mauvaises sur la majorité des indicateurs.

4.3.2.3. Synthèse de la description du nuage

L'Analyse en Composantes Principales et la projection des points sur les axes permettent de valider le choix des variables chargées de représenter les simulations : le choix est satisfaisant si les indicateurs conduisent à une représentation cohérente et interprétable des points dans les plans factoriels. Il n'est ainsi pas surprenant que le premier plan soit assez trivial.

Les questions de transport sont illustrées par les indicateurs "durées de passage", "durées d'attente en stocks", "engagement des machines et des chariots", "blocage de la palettisation", "en-cours maximal", "taux de production".

Les questions de stockage sont mises en évidence par les indicateurs "taux d'occupation des stocks", "durées d'attente en stocks" et "en-cours global moyen".

On remarque que les indicateurs "taux de production", indicateurs d'évaluation des performances, sont essentiellement activés par les facteurs concernant le transport, ce qui montre l'influence dominante de cette catégorie de facteurs. D'autre part, les indicateurs "durées d'attente" constituent une sorte d'interface commune entre les indicateurs de transport et de stockage.

L'ACP nous permet de tirer quelques inférences sommaires :

- Toute action sur les facteurs liés au transport a des conséquences sur les durées de passage des palettes, les taux de production, l'engagement des ressources, le taux de blocage du poste de palettisation (poste d'entrée), les durées d'attente en stocks et l'en-cours maximal atteint par le système.
- Toute action sur les facteurs liés aux stockages engendre un effet sur le taux d'occupation des stocks, les durées d'attente dans ces stocks et l'en-cours moyen atteint par le système.
- Aucune action, menée seulement sur les stockages, n'aura d'effet sur le taux de réalisation de la production.
- Les facteurs liés au transport sont largement prédominants sur les autres.
- Ce n'est pas en diminuant les capacités de stockage que l'on réduit l'en-cours global moyen.
- Les taux d'occupation des stocks dépendent de leur capacité de stockage sauf pour le stock d'entrée dans l'atelier qui dépend davantage des capacités de transport.

4.3.3. Hiérarchie des facteurs d'influence

Un facteur contrôlé qui structure les individus dans un plan qui explique 50% de la variance du nuage est, pour nous, hiérarchiquement supérieur à celui qui organise la projection de ce nuage dans un plan qui explique seulement 10% de la variance totale.

Dans cette logique, et d'après les observations précédentes, nous observons la structure hiérarchique d'influence des facteurs suivante :

- 1) nombre de cfg ;
- 2) vitesse des cfg ;
- 3) capacités des stocks ;
- 4) règle de gestion des stocks (facteur très peu influent).

4.3.4. Liens entre indicateurs

Pour compléter cette étude descriptive, un retour sur les corrélations entre variables nous permet de détailler davantage les liens entre indicateurs.

Rappel : On distingue trois familles de critères de performances

- En-cours ;
- Durées ;
- Engagement des ressources.

Il faut ajouter une quatrième famille d'indicateurs, que l'on peut qualifier de "vérificateurs de performances" :

- Les taux de production.

A partir de la matrice des corrélations, on peut repérer trois types de relations entre les indicateurs :

- **Corrélation positive** : les indicateurs varient ensemble dans le même sens ;
- **Corrélation négative** : les indicateurs varient ensemble mais en sens inverse l'un de l'autre ;
- **Non-corrélation** : l'indicateur n'est fortement corrélé à aucun autre.

4.3.4.1. Les non-corrélations

Nous fixons arbitrairement à 0,3 un seuil de corrélation en-dessous duquel nous considérons comme non significative la corrélation entre deux indicateurs.

Attention : il ne faut pas confondre un indicateur non-corrélé, dont le comportement ne suit la logique d'aucun autre mais dont la valeur varie quand même, et un indicateur invariant qui, lui, est insensible à toute politique de gestion de l'atelier.

A l'issue de l'examen de la matrice des corrélations, nous relevons les indicateurs qui ne présentent pas de liaison linéaire avec les autres :

- écart-type sur le nombre de chariots occupés au cours de la simulation (SCO),
- écart-type sur le nombre de chariots en train de rouler (SCR),
- taux de blocage des postes d'usinage et de montage (%B5, %B6).

Ces indicateurs ne représentent qu'eux-mêmes et sont symptomatiques de phénomènes plutôt marginaux puisqu'ils ne touchent pas les autres composants, ce qui veut dire que si ces indicateurs sont importants pour le décideur, s'ils présentent un intérêt stratégique, alors il faut les garder individuellement car ils ne sont déductibles d'aucun autre.

4.3.4.2. Les corrélations positives

Les corrélations positives sont jugées significatives à partir d'une valeur de 0,7 pour le coefficient de corrélation.

4.3.4.2.1. Corrélations positives triviales et exceptions

Il existe des **corrélations** que l'on peut qualifier de **triviales** dans la mesure où elles concernent des indicateurs de la même famille. Ainsi sont corrélés entre eux :

- les taux de production ;
- les taux d'engagement des machines ;
- les durées de passage et leurs écarts-types ;
- les taux d'occupation moyen, max et écart-type de chaque stock.

A l'intérieur de chaque groupe, tous les indicateurs ont les mêmes corrélations avec tous les autres indicateurs. Ainsi, par exemple, le taux de production global, en moyenne et en écart-type, suffit à représenter l'ensemble des taux de production par gamme, en moyenne et en écart-type.

En règle générale, les écarts-types et les maxima d'une mesure sont corrélés positivement à la moyenne de cette mesure. Quelques cas font exception à cette règle :

* le taux d'occupation moyen de l'ensemble des cfg et l'écart-type de ce taux (%CO / SCO) ne sont pas corrélés :

Les variations du nombre de cfg chargés, au cours de la période, ne sont pas liées au taux d'utilisation moyen du parc-chariot pour la période. Ce dernier est très dépendant du nombre de cfg mis en circulation.

* le taux d'occupation moyen du stock aval du poste palettisation et l'écart-type de ce taux (p1Y / p1S) ne sont pas corrélés :

Il n'y a pas de lien entre le taux d'occupation moyen du stock aval "palettisation" et la variation de ce taux. Les fortes variations du taux d'occupation du stock aval "palettisation" correspondent à une forte alimentation du stock amont du montage (donc de la fin de l'atelier), ce qui laisse supposer une bonne fluidité du trafic ; les valeurs élevées du taux d'occupation moyen correspondent à des durées de passage et des taux d'occupation de cfg élevés, donc à un encombrement de l'atelier ; le stock aval "palettisation", qui est le stock d'entrée de l'atelier n'est plus alors aussi bien évacué. Ce fonctionnement est plutôt positif puisqu'il permet de réguler le flux d'entrée en fonction de l'encombrement du système.

* le taux de blocage du poste palettisation et les taux de blocage de l'usinage et du montage (%B1 / %B5,%B6) ne sont pas corrélés :

Les indicateurs de blocage usinage et montage (%B5, %B6) sont à peu près indépendants de l'ensemble des autres variables. Ils sont corrélés entre eux et avec l'occupation des stocks aval usinage et montage (p5Y, p6Y) uniquement. Leur connaissance n'autorise aucune inférence sur le comportement des autres composants du système et, réciproquement, leur valeur ne peut pas être déduite de la connaissance des autres indicateurs.

Inversement, le taux de blocage de la palettisation est relié très fortement à plus de la moitié des variables. Par son réseau de connexions, cet indicateur apporte une information sur la plupart des autres composants.

* l'en-cours global maximal et l'en-cours global moyen (ECX /ECY) ne sont pas corrélés :

Aux valeurs fortes de l'en-cours global moyen correspondent des valeurs fortes sur les indicateurs de caractère "aval" (taux d'occupation de stocks aval, durées d'attente aval, taux d'occupation des cfg). Le fonctionnement de l'atelier est "chargé", mais cependant "régulier". Le trafic est limité par un faible nombre de cfg ou des vitesses peu élevées (cf figure 43.2). Malgré leur forte utilisation, les cfg ne suffisent pas à évacuer rapidement le flux : des attentes se créent.

Aux valeurs fortes de l'en-cours global maximal correspondent plutôt des indicateurs concernant les composants "amont" de l'atelier (taux d'occupation de stocks amont, durées d'attente amont, taux d'engagement des machines, taux de production). Le fonctionnement est plus "fluide", mais très irrégulier, associé aux scénarios comprenant beaucoup de cfg et/ou des vitesses élevées (cf figure 43.2).

La non-corrélation entre les deux variables signifie que la connaissance d'un en-cours moyen faible ou élevé ne permet aucunement d'inférer sur la valeur de l'en-cours max, et réciproquement.

* l'écart-type de l'en-cours global moyen et l'en-cours global moyen (ECS / ECY) sont corrélés mais négativement :

Les variations du niveau d'en-cours varient en opposition à l'en-cours moyen. Plus l'en-cours global moyen est faible, plus les variations sont importantes. A faibles variations, donc stabilité de l'en-cours global à un niveau élevé, sont corrélées des durées de passage importantes, le blocage du poste palettisation, une utilisation intensive des chariots et une mauvaise évacuation de tous les stocks aval. Les taux de production et l'engagement des machines ont de fortes valeurs pour des variations d'en-cours élevées, donc un en-cours moyen faible ; par contre, ce sont alors les attentes en stocks amont et le taux d'occupation de ces stocks qui ont des valeurs fortes.

Conclusions sur les trois indicateurs d'en-cours global :

Les différents indicateurs d'en-cours sont représentatifs de phénomènes tout-à-fait différents, voire opposés. En voulant diminuer l'en-cours global et améliorer l'évacuation des palettes, on risque d'augmenter l'en-cours maximal et on augmentera à coup sûr les fluctuations. Il faut donc être prudent. On retiendra toute l'ambiguïté de cet indicateur.

4.3.4.2.2. Corrélations positives non triviales

Nous avons évoqué les corrélations triviales, qui n'apprennent pas grand-chose par elles-mêmes, puis les exceptions à la règle, qui sont beaucoup plus intéressantes. Il existe également ce que l'on peut appeler des corrélations non-triviales qui relient des indicateurs de familles différentes, induisant un lien de cause à effet et une possibilité d'explication du modèle. Elles sont synthétisées dans la figure 43.6.

Sur le graphe des corrélations apparaissent deux groupes principaux d'indicateurs : l'un est constitué des taux de production, taux d'occupation des machines, en-cours et durées d'attente amont, l'autre rassemble les durées de passage, les durées d'attente aval l'occupation du stock aval palettisation, le taux de blocage du poste palettisation et le taux d'occupation des cfg.

Le premier groupe est plutôt représentatif de l'alimentation du système, le deuxième de son évacuation.

4.3.4.3 Remarques sur le graphe

- Certains indicateurs participent plus particulièrement au réseau de relations. Retenons les indicateurs ayant au moins 3 liaisons de type "corrélation positive" :

- taux de production global (%Gi),
- taux d'utilisation des machines (%Mi),
- en-cours, en max et en écart-type (ECX/ECS),
- durées de passage des palettes, en moyenne et en écart-type (PYi/PSi),
- taux de blocage du poste de palettisation (%B1),
- durée d'attente en aval des postes (ViY/ViS),
- taux d'occupation du stock aval de la palettisation (p1Y),
- taux d'utilisation des cfg (%CO),
- durée d'attente en amont de la cellule 1 (T2Y).

Graphe des corrélations positives

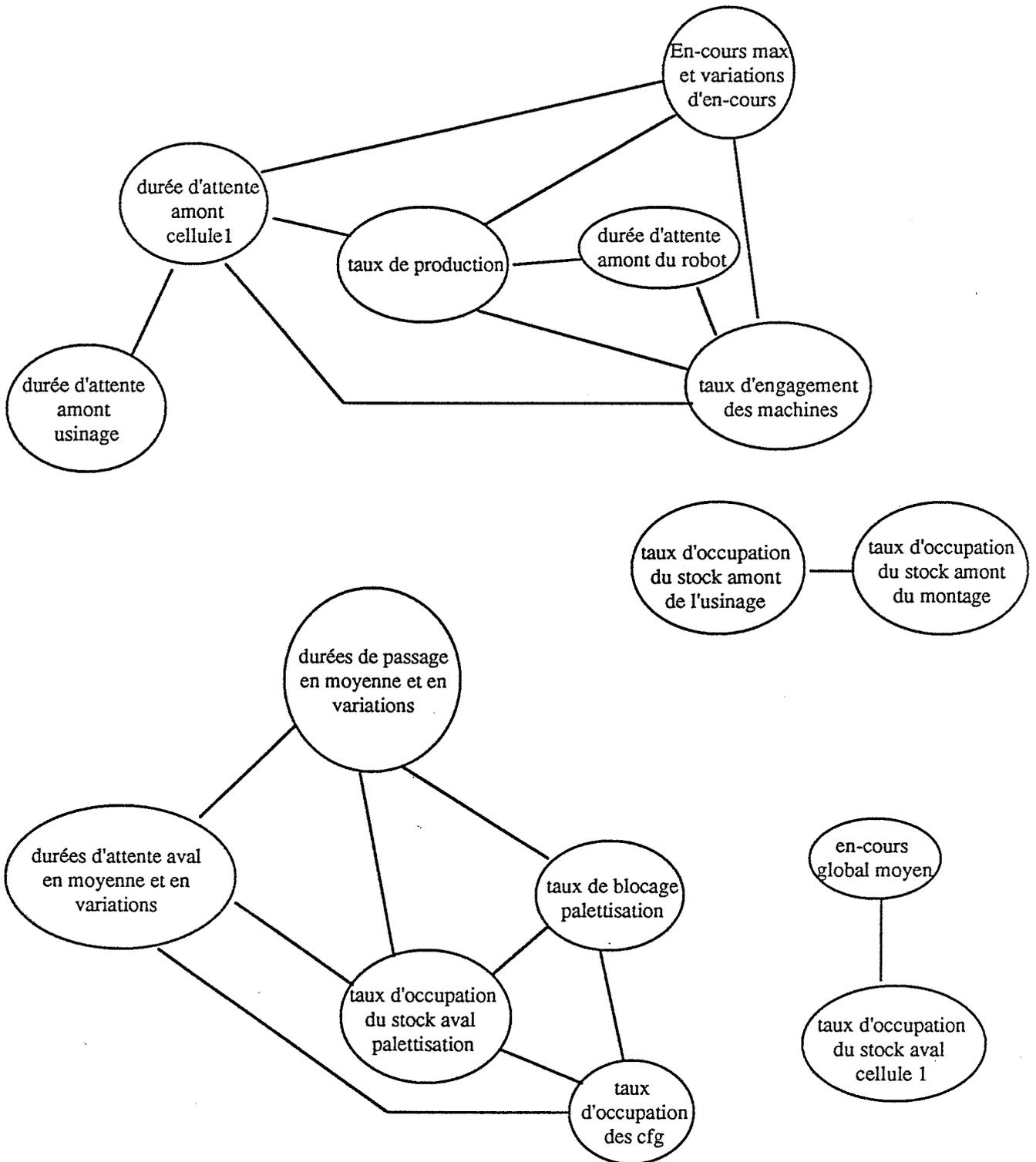


Figure 43.6

- Le niveau moyen d'en-cours et le taux d'occupation des chariots ne sont pas très concernés par le fonctionnement d'ensemble du système.
- Les taux d'occupation des stocks apparaissent peu, à part p1Y.

4.3.5. Synthèse du chapitre : conclusions sur l'ACP

Avec l'ACP sont mises en évidence les règles de fonctionnement de MACSI. Elles ne sont pas forcément transposables à d'autres ateliers.

On retrouve ainsi, à l'aide des graphes, des connaissances classiques sur les systèmes de production :

* Un bon niveau de production est accompagné d'un fort engagement des machines et d'un faible taux de blocage du poste d'entrée (palettisation). Les durées de passage correspondantes seront faibles ainsi que les durées d'attente en aval des postes (évacuation rapide).

Par contre, le niveau maximal d'en-cours et les variations d'en-cours seront élevés ainsi que les durées d'attente en amont des premiers postes des gammes (alimentation rapide).

* Quelles seront les conséquences d'une volonté d'avoir un taux d'engagement des machines élevé ?
Le taux de production sera également élevé. Ce phénomène sera accompagné d'une diminution des durées de passage, des durées d'attente en aval des postes, du taux de blocage du poste de palettisation. Par contre, les durées d'attente amont des postes seront élevées.

* Comment se comporte le reste du système lorsqu'on vise un en-cours maximal faible ?

Cet état correspond alors à une faible utilisation des machines, à une forte utilisation des cfg, à de faibles durées d'attente amont mais aussi à un faible niveau de production, des durées de passage élevées, un fort taux de blocage du poste palettisation et un niveau élevé de son stock aval.

* Si on privilégie les faibles durées de passage alors on aura un fort engagement des machines, un fort niveau de production, de faibles durées d'évacuation des postes, un faible blocage du poste d'entrée et un niveau peu élevé de son stock aval. Par contre, les durées d'attente amont de la cellule 1 et du robot seront fortes ainsi que l'en-cours, en max et en variations.

* Est-il intéressant de chercher la maximisation du taux d'occupation des cfg ?

Celle-ci s'accompagne d'une diminution du niveau maximal d'en-cours, d'une réduction de l'attente en amont de la cellule 1, mais aussi d'un accroissement du taux de blocage du poste d'entrée, du niveau d'occupation du stock aval de ce poste et des durées d'attente en sortie des postes.

Il faut mettre ces liens fonctionnels en relation avec les moyens dont on dispose pour agir dessus (facteurs de configurations d'atelier). C'est ce que nous avons déjà entrevu en interprétant les plans factoriels. La structuration de l'espace des scénarios par des méthodes de classification nous apportera davantage d'informations.

4.4. ETAPES 4 ET 5 : RECHERCHE ET INTERPRETATION DE TYPES DE COMPORTEMENTS ET DE STRATEGIES

Au cours de l'étape précédente, nous avons mis en évidence des relations du type "**corrélation**", positive ou négative, entre les indicateurs du système : des **règles de comportement internes**, en quelque sorte (cf figure 43.6). La procédure avait un but descriptif, les données ne subissant pas de transformation dans leur nature, si ce n'est lors de leur projection dans les plans factoriels. Les deux étapes qui suivent ont pour ambition de rechercher une explication à l'organisation du nuage.

Nous nous attacherons d'abord à détecter et à caractériser les **modes de fonctionnement** du système, c'est-à-dire ses principaux **types de comportement**, établis à partir des profils de performance des simulations. Les profils sont dégagés par des méthodes de partitionnement (classification hiérarchique et nuées

dynamiques) : c'est la phase 1 du processus de structuration, présenté dans la figure 44.1. Cette procédure agit par transformation des données initiales (les individus-simulations) en données agrégées (les classes de simulations) ; une information supplémentaire sur les objets est ainsi créée.

"Toute tâche de classification recelle deux composantes : une tâche d'agrégation chargée de produire des sous-ensembles et une tâche de caractérisation chargée de fournir une description synthétique de chacune des classes produites." [Lerman 88]. L'agrégation est effectuée par un algorithme de partitionnement ; elle relève de techniques d'analyse de données bien connues. Deux questions se posent alors à nous, en ce qui concerne la deuxième composante de la classification :

- comment décrire de façon synthétique les profils ainsi répertoriés ?... Ceux-ci seront interprétés à l'aide des facteurs de l'ACP (phase 2 de la figure 44.1).
- comment retrouver l'origine des types de performances dans les facteurs contrôlés mis en jeu ?... On caractérisera les regroupements de scénarios associés aux profils dégagés dans l'étape suivante : "Caractérisation des classes", (cf la phase 1 de la figure 44.4).

Alors que les deux premières phases (étape 4) sont entièrement basées sur des traitements numériques, les données (indicateurs de performances) s'y prêtant bien, la dernière phase touche à un aspect plus qualitatif des données, les facteurs contrôlés des simulations étant organisés en modalités généralement non ordonnées.

Nous nous intéresserons ensuite (phases 2 et 3 de l'étape "Caractérisation des classes", figure 44.4) :

- d'une part, à l'élaboration de règles d'affectation des scénarios aux types de performances (c'est l'aspect **règles de comportement**),
ex : "Si le nombre de cfg est compris entre trois et cinq et que leur vitesse est au moins égale à 30 m/min, alors on observera un comportement 'C3'", le type 'C3' ayant été auparavant caractérisé lors de l'étape de description de la partition,

Structuration des simulations

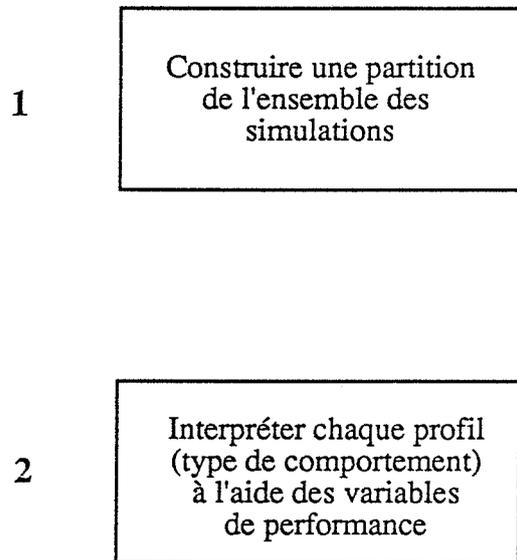
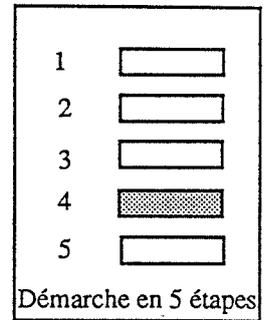


Figure 44.1

- d'autre part, à la compréhension des mécanismes de passage d'un profil à un autre, par action sur les facteurs contrôlés (c'est l'aspect **pilotage du système**),

ex : Supposons que le passage du comportement 'C3' au comportement 'C6' soit essentiellement caractérisé par une réduction des en-cours. Comment, étant situé dans une configuration 'C3', passer à un 'C6', en jouant sur les valeurs des facteurs contrôlés ? La réponse pourra consister à accélérer les cfg ou bien à modifier les capacités de stockage, ou bien en une combinaison des deux, ... Si plusieurs chemins conduisent au même résultat, le décideur effectuera le choix le moins coûteux, ou le plus stratégique, pour son entreprise.

4.4.1. Etape 4 : Structuration du nuage - Typologie des comportements

On recherche la structure de l'ensemble des simulations à partir des performances observées. Le regroupement en classes de performances "proches" conduit à la reconnaissance de profils-types représentant les différents types de comportement du système face aux facteurs d'entrée.

4.4.1.1. Construction d'une partition sur l'ensemble des performances

Une partition d'un ensemble de données numériques peut être obtenue par un algorithme spécifique, du type "nuées dynamiques" ou bien encore par une méthode de classification automatique.

Dans un premier temps, nous appliquerons aux résultats des simulations de la campagne-test un algorithme de classification ascendante hiérarchique (CAH) afin de construire la partition de référence.

L'arbre complet de la classification sera coupé à un niveau jugé significatif, de façon à obtenir les principaux regroupements de simulations susceptibles d'être interprétés.

La stabilité de cette partition sera testée, dans un second temps, par comparaison à d'autres partitions, construites par l'algorithme des nuées dynamiques.

4.4.1.1.1. Partition de référence

La **partition de référence** est issue d'un algorithme de CAH [Jambu 78]. Nous avons choisi la méthode des voisins réciproques qui minimise la variance intra-classe de la partition construite. On procède à une CAH du nuage des 360 points, à partir de leurs coordonnées factorielles, calculées sur les quatre premiers axes de l'ACP de l'étape 3 : "Description synthétique du nuage". L'arbre de classification complet comprend 719 noeuds. Nous nous intéressons aux noeuds les plus hauts de la hiérarchie et coupons l'arbre de façon à mettre en évidence une partition équilibrée, en sept classes de poids comparables (en nombre d'individus), définissant sept profils de performances (cf figure 44.2) : ce sont les classes numérotées 660, 703, 709, 710, 711, 712 et 713. La taille du noeud représentant la classe, sur la figure 44.2, est proportionnelle au poids de celle-ci, indiqué entre parenthèses.

4.4.1.1.2. Stabilité de la partition

La **stabilité des regroupements** mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique est vérifiée en comparant la partition de référence à d'autres partitions, obtenues par l'algorithme des nuées dynamiques [Diday 82]. La comparaison s'effectue sur des **critères de recouvrement** des diverses décompositions.

L'algorithme des nuées dynamiques a besoin de connaître le nombre de classes à rechercher ainsi que les noyaux initiaux de ces classes. Ceux-ci peuvent être tirés au hasard par le programme ou bien fournis par l'utilisateur. En ce qui nous concerne, nous recherchons une partition en sept classes, comme la partition de référence, et nous utilisons la connaissance acquise par la classification automatique précédente pour ne pas prendre les noyaux initiaux au hasard, mais à l'intérieur de chacune des sept classes de la CAH.

La solution fournie par les nuées dynamiques dépend assez fortement des noyaux initiaux. Aussi, nous avons lancé cinq fois le programme, avec des noyaux initiaux différents à chaque fois. Nous avons donc obtenu cinq nouvelles partitions de l'ensemble des observations.

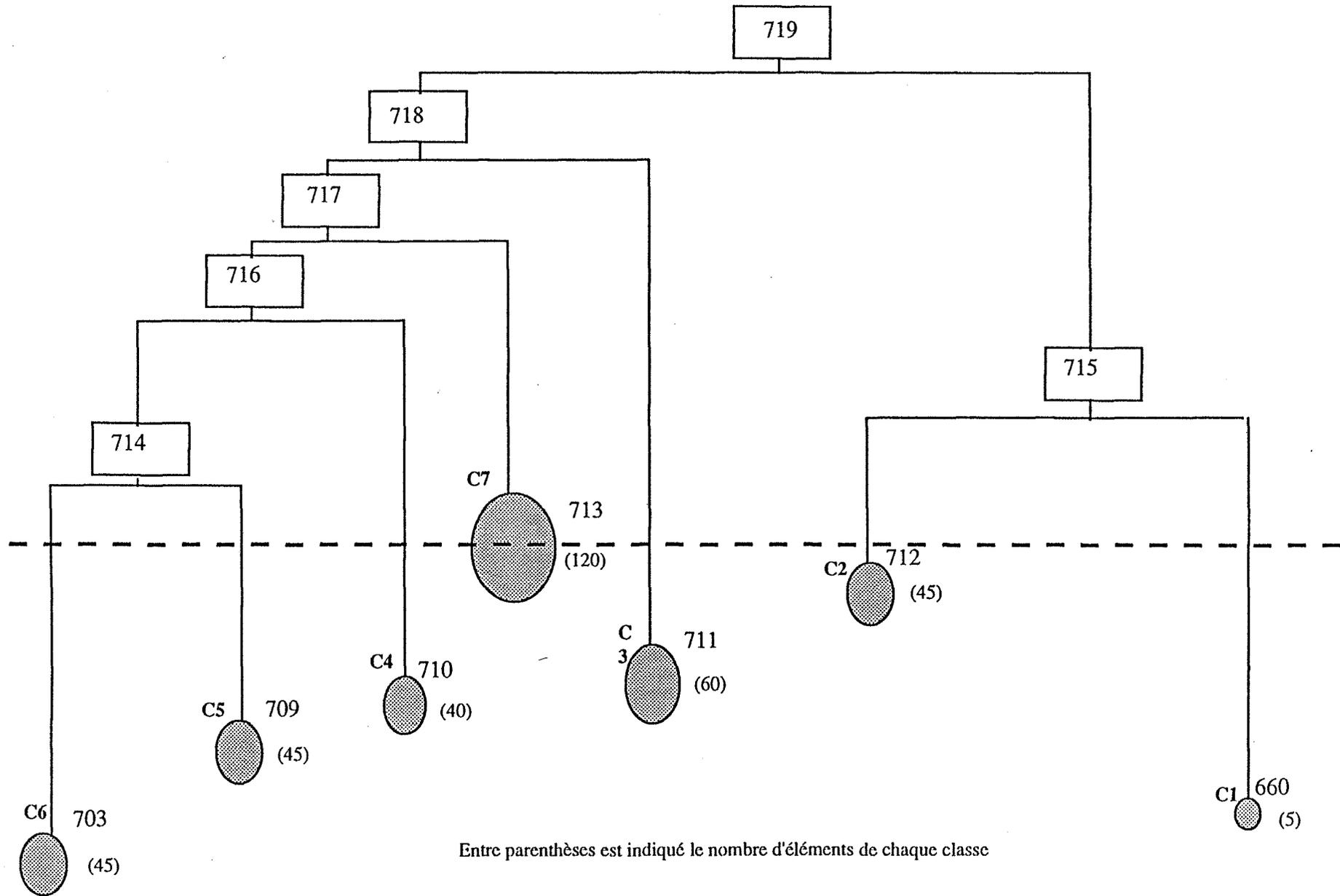


Figure 44.2

* Mesure de la stabilité globale

Pour chaque partition, nous définissons un **pourcentage d'éléments mal classés** : nous prenons comme référence la partition issue de la CAH et établissons une correspondance entre les sept classes de la CAH et les sept classes des nuées dynamiques. Une observation sera dite "mal classée" par les nuées dynamiques si elle est regroupée avec des observations qui ne sont pas de la même classe qu'elle dans la partition de référence.

De façon duale à la comptabilisation des mal classés, nous définissons le **coefficient de recouvrement** d'une partition par une autre comme le nombre d'éléments qui se trouvent groupés ensemble dans l'une et l'autre des partitions (c'est-à-dire les éléments appartenant aux "formes fortes" des partitions, au sens de la méthode des nuées dynamiques).

Les coefficients de recouvrement de la partition de référence par les 5 autres partitions, tels que la définition en a été donnée plus haut, sont respectivement de 91%, 89%, 91%, 92% et 90%. Les taux de recouvrement étant suffisamment élevés, **la partition initiale de la CAH est considérée comme une partition acceptable** de l'ensemble des performances : c'est sur elle que nous travaillerons.

* Stabilité de chacune des classes

Les formes fortes dégagées sur l'ensemble des cinq partitions des nuées dynamiques et de la partition de référence montrent une grande stabilité des regroupements. Les groupes correspondant aux classes 660, 712 et 711 présentent une cohésion particulièrement forte car on les retrouve à l'identique d'un partitionnement à l'autre. Nous qualifions ces trois classes d'"hyper-stables". Les mal classés proviennent d'erreurs d'affectation entre les classes 713, 710, 709 et 703. Ces quatre dernières classes ont en commun (cf figure 44.2) d'être toutes des sous-classes du noeud 717. Cela montre que, si le noeud 717 présente une grande cohérence, ses subdivisions en sous-classes sont moins nettes. Nous aurions pu couper l'arbre de classification au niveau 717 afin de diminuer le pourcentage de mal classés et d'augmenter la stabilité de la partition, mais alors nous aurions eu une classe de 200 individus (plus de la moitié du nuage), ce qui aurait nui à la finesse de l'analyse. Notre choix a consisté à former avant tout une partition de classes équilibrées en poids.

4.4.1.2. Interprétation des profils

Soient les sept classes de la partition de référence, représentant sept profils de comportements-types du système de production. Ces profils sont explicités grâce aux contributions des facteurs de l'ACP à la formation des classes de la CAH. Ils sont, bien entendu, relatifs à l'échantillon d'expérimentation et à son contexte. Ils n'ont, par conséquent, pas de portée "absolue". Ainsi, lorsque l'on parle d'une classe à "faibles durées de passage", cela signifie que c'est pour cette classe qu'ont été enregistrées les durées de passage les plus faibles pour l'échantillon, mais l'utilisateur est libre de juger si ces durées sont suffisamment faibles à son gré. Afin d'avoir une idée des valeurs nominales des variables observées, on pourra se reporter à l'analyse unidimensionnelle des variables (annexe J), dans laquelle nous indiquons les valeurs moyennes, minimales et maximales atteintes par les indicateurs.

4.4.1.2.1. Analyse de l'arbre de classification

Les poids des classes, en nombre d'individus, sont indiqués entre parenthèses sur la figure 44.2. On a cinq classes de taille moyenne (entre 40 et 60 individus), une classe très lourde, rassemblant le tiers des simulations (120 individus), et une classe réduite à 5 individus.

Du point de vue de la formation de l'arbre, c'est l'axe 1 qui conduit à la première séparation de l'ensemble global des simulations en deux classes. Cinquante simulations sont ainsi écartées de l'ensemble (classe 715 de la figure 44.2) à cause de leurs valeurs négatives sur l'axe 1. Ces cinquante simulations présentent un caractère très marqué en termes de durées de passage élevées, de taux de production et d'engagement des machines particulièrement faibles.

La formation des autres classes est beaucoup plus complexe : elle prend en compte des combinaisons de nombreux facteurs. Nous ne chercherons donc pas à expliquer la genèse du reste de l'arbre. Nous passons directement à la description des profils des sept classes retenues ; nous nous aidons pour cela du calcul des contributions des facteurs à la formation des classes.

4.4.1.2.2. Description des types de comportements

Pour chaque type de comportement, nous donnons une interprétation du phénomène fondée sur une combinaison des quatre premiers facteurs de l'ACP (Facteur1, ...Facteur4). L'analyse factorielle effectuée dans le chapitre précédent nous permet de traduire cette interprétation en termes d'indicateurs. Les facteurs explicatifs sont pondérés par un coefficient qui représente la part du facteur dans la formation de la classe. Ce coefficient varie entre 0 et 1.

D'une façon générale, nous n'émettons pas de jugement de valeur sur les performances enregistrées par les divers groupes, laissant ce soin à l'utilisateur. Nous formulerons cependant quelques appréciations sur les comportements observés.

Comportement 1 (C1) : Classe 660, 5 éléments

Cette classe est réduite à 5 éléments : elle représente donc un phénomène marginal. Le profil du comportement C1 a été formé par la combinaison de facteurs suivante :

*** Facteur1,**

c'est-à-dire :

- Faible taux de production sortie,
- Fortes durées de passage,
- Fort taux de blocage du poste d'entrée (palettisation),
- Fortes durées d'attente aval,
- Faible taux d'engagement des machines,

mais aussi

- Faible en-cours maximal,
- Faibles durées d'attente amont.

Ces indicateurs contribuent pour 98% à la formation du groupe.

Une observation plus détaillée des performances de C1 montre que ses éléments constitutifs enregistrent des valeurs extrêmes :

- sur les taux de production (26% seulement),
- sur les durées de passage (toutes supérieures à 3000 s),
- sur les taux d'engagement des machines (20% au lieu des 60% prévus),
- mais aussi sur le niveau d'en-cours (1,61 palette seulement en moyenne).

Ainsi que nous l'avons vu plus haut, cette classe est "hyper-stable", c'est-à-dire que ces contre-performances concernent un ensemble de simulations bien déterminé et non sujet à fluctuations.

Comportement 2 (C2) : Classe 712. 45 éléments

Le profil de C2 a été formé de la manière suivante :

*** Facteur1.**

C2 traduit donc un phénomène de même nature que C1 (la formation de la classe est due à 98% au premier facteur), mais moins accentué. En effet, d'après leur situation dans les plans factoriels, on constate que les éléments de C2 prennent des valeurs moins extrêmes que ceux de C1 sur les indicateurs explicatifs. Toute la production prévue n'est cependant pas réalisée.

C2 est également un comportement "hyper-stable".

Comportement 3 (C3) : Classe 711, 60 éléments

Le profil de C3 a été formé de la manière suivante :

$$* \text{Facteur1} - 0.44 * \text{Facteur2} - 0.3 * \text{Facteur4},$$

c'est-à-dire surtout,

- Fort en-cours global moyen (compris dans Facteur2 et renforcé par Facteur4),
- Forts taux d'occupation des stocks aval de la cellule 1 et de la palettisation (poste d'entrée),

puis,

- Fortes durées de passage,
- Fort blocage du poste d'entrée (palettisation),
- Fortes durées d'attente aval,
- Fort taux d'utilisation des chariots,
- Faibles taux de production,
- Faibles taux d'engagement des machines,
- Faible en-cours maximal,
- Faibles durées d'attente amont.

C3 est représentatif d'un phénomène touchant surtout au niveau d'en-cours global et aux taux d'occupation des stocks proches de l'entrée de l'atelier, et du début des gammes. Le plan de fabrication est presque entièrement réalisé.

C3 est un comportement que nous avons qualifié d'"hyper-stable", tout comme C1 et C2.

Comportement 4 (C4) : classe 710, 40 éléments

Le profil de C4 a été formé de la manière suivante :

$$* \text{Facteur2} + 0.21 * \text{Facteur1} + 0.19 * \text{Facteur4},$$

c'est-à-dire surtout,

- Forts taux d'occupation des stocks aval de la cellule 1 et de la palettisation,
- Fort taux d'occupation du stock amont du montage (induit par Facteur2 et renforcé par Facteur4),

puis aussi,

- Fort taux de production,
- Fort taux d'engagement des machines,
- Fort en-cours maximal,
- Fortes durées d'attente amont de la cellule 1,
- Faibles durées de passage,
- Faible taux de blocage du poste d'entrée (palettisation),
- Faibles durées d'attente aval.

Avec C4, on parvient à un taux d'engagement des machines, et donc à un taux de production, plutôt satisfaisants, de même que les durées de passage. Ces performances s'accompagnent de forts taux d'occupation de stocks. La valeur de l'en-cours global moyen n'est pas une caractéristique déterminante de ce comportement ; c'est-à-dire que le fait d'observer des performances rattachées au type C4 ne permet pas de prévoir l'en-cours.

Comportement 5 (C5) : Classe 709. 45 éléments

Le profil de C5 a été formé de la manière suivante :

$$* \text{Facteur1} - 0.29 * \text{Facteur3},$$

c'est-à-dire surtout,

- Fort taux de production,
- Fort taux d'engagement des machines,

- Fort en-cours maximal,
- Fortes durées d'attente amont de la cellule 1,
- Faibles durées de passage,
- Faible taux de blocage du poste d'entrée (palettisation),
- Faibles durées d'attente aval,
- Faible taux d'occupation des cfg,

puis aussi,

- Fort taux d'occupation du stock amont cellule 1,
- Faibles taux d'occupation des stocks aval usinage et montage,
- Faible durée d'attente amont montage.

Avec C5, la fabrication prévue est bien réalisée. Les stocks proches de l'entrée de l'atelier sont très occupés, à l'inverse de ceux qui sont proches de la sortie. Les résultats ne sont pas caractéristiques vis à vis de l'en-cours global moyen.

Comportement 6 (C6) : Classe 703, 45 éléments

Le profil de C6 a été formé de la manière suivante :

$$* \text{Facteur1} + 0.25 * \text{Facteur4},$$

c'est-à-dire surtout,

- Fort taux de production,
- Fort taux d'engagement des machines,
- Fort en-cours maximal,
- Fortes durées d'attente amont de la cellule 1,
- Faibles durées de passage,
- Faible taux de blocage du poste d'entrée (palettisation),
- Faibles durées d'attente aval,

- Faible taux d'occupation des cfg,

puis aussi,

- Forts taux d'occupation des stocks amont usinage et montage,
- Faible en-cours global moyen.

C6 est surtout remarquable pour ses faibles durées de passage et d'attente aval ainsi que son faible taux d'occupation des cfg ; il exprime un comportement satisfaisant des critères classiques (engagement des machines, durées de passage et d'attente, en-cours). La production est bien réalisée.

Comportement 7 (C7) : Classe 713, 120 éléments

Le profil de C7 a été formé de la manière suivante :

$$* \text{Facteur1} + 0.4 * \text{Facteur2},$$

c'est-à-dire :

- Fort taux de production,
- Fort taux d'engagement des machines,
- Fort en-cours maximal,
- Fortes durées d'attente amont de la cellule 1,
- Faibles durées de passage,
- Faible taux de blocage du poste d'entrée (palettisation),
- Faibles durées d'attente aval,
- Faible taux d'occupation des cfg,

ainsi que,

- Faible en-cours global moyen,
- Faible taux d'occupation du stock aval de la cellule 1,
- Faible taux d'occupation du stock amont du montage.

C7 s'est formé de façon équilibrée par rapport aux critères classiques. La production est bien réalisée. C7 regroupe la majorité des simulations (le tiers) ; C7 peut être considéré comme un comportement "standard".

Nous concluons ce paragraphe par une remarque. Les scénarios les plus faciles à caractériser sont ceux qui correspondent à de "mauvais" comportements, c'est-à-dire ceux dont les performances ne sont vraiment satisfaisantes sur aucun des critères. Ainsi, C1, C2 et C3, qui présentent les performances les moins satisfaisantes, sont caractérisés par une stabilité très forte.

4.4.1.2.3. Comparaison des profils de comportement sur les facteurs principaux

Le centre de gravité de chaque classe est calculé, puis placé sur chacun des quatre premiers axes de l'ACP. Cela permet de visualiser les profils décrits plus haut et de situer ainsi les comportements les uns par rapport aux autres (cf figure 44.3).

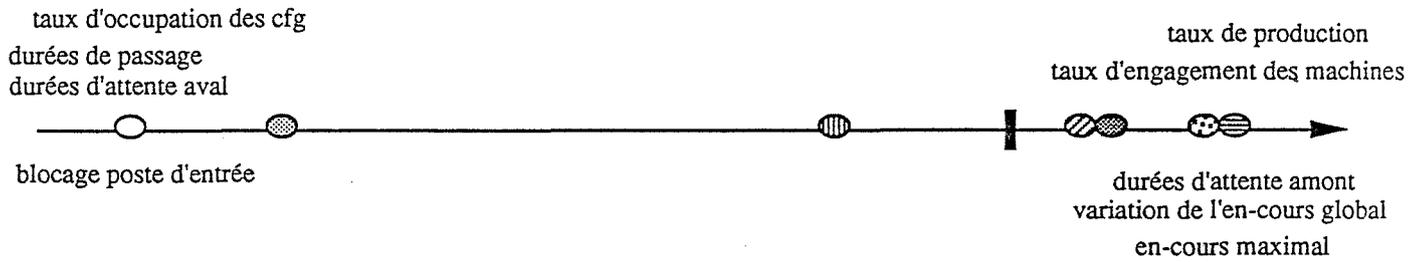
Cette représentation montre bien comment la notion de proximité entre classes est variable selon l'angle d'observation. Ainsi :

- L'axe 1 met C1 et C4 en totale opposition, de même que les axes 2 et 3. Par contre, ces deux comportements se rejoignent sur l'axe 4. Cela signifie que C1 et C4 s'opposent sur la presque totalité des indicateurs mais qu'ils présentent le même en-cours global faible et le même taux d'occupation élevé des stocks amont de l'usinage et du montage.
- C4 et C7 également ont des caractères parfois très proches (axes 1 et 3), parfois très divergents (axes 2 et 4), sur les indicateurs d'utilisation des stocks amont et de durées d'attente amont, notamment.
- C5 et C6, par contre, ont à peu près le même profil sur les 4 axes d'observation, ce qui s'explique par le fait que ce sont les deux sous-classes d'un même noeud de la hiérarchie (la classe 714).

Etape 4 : Structuration des simulations

Projection des centres de gravité des classes sur les axes principaux de l'ACP

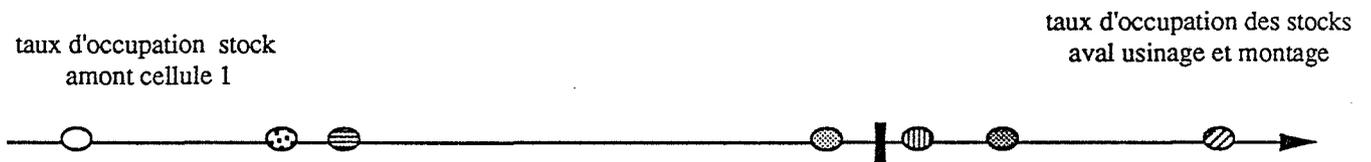
Axe 1



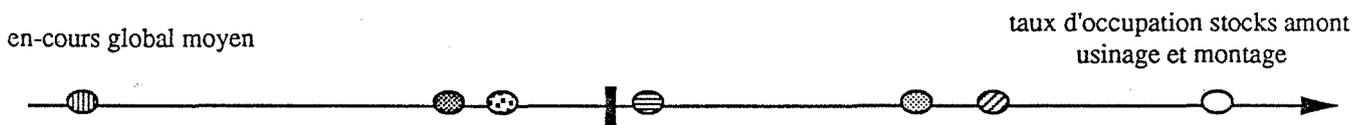
Axe 2



Axe 3



Axe 4



- | | | | | | |
|---|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|
| ○ | C1 (classe 660) | ▨ | C3 (classe 711) | ⊛ | C5 (classe 709) |
| ● | C2 (classe 712) | ▧ | C4 (classe 710) | ▤ | C6 (classe 703) |
| | | | | ● | C7 (classe 713) |

Figure 44.3

L'interprétation multi-critère est donc précieuse pour éviter de tirer des conclusions hâtives à partir de coïncidences fortuites.

Remarquons que deux axes seulement (1 et 4) suffisent à représenter les trois critères classiques (durées, en-cours, engagement des machines) ainsi que le critère de taux de production. Les deux autres axes (2 et 3) complètent l'information sur des critères moins classiques (engagement des ressources de stockage, essentiellement). En fait, tous les critères principaux sont pris en compte par le premier axe, sauf l'en-cours, ce qui montre, encore une fois, la relative indépendance de ce critère. Un en-cours global moyen faible peut s'accompagner de très mauvaises performances sur les autres indicateurs, comme c'est le cas pour le comportement C1 (capacité de transport insuffisante), ou bien au contraire de bons résultats, comme c'est le cas pour C4 (fluidité du transport).

On retrouve bien l'ambiguïté, déjà évoquée dans l'analyse de l'ACP, du critère d'en-cours global moyen. L'en-cours global maximal, par contre, est complètement corrélé aux autres principaux critères.

L'utilisateur aura tendance, tout naturellement, à rechercher un comportement bien positionné sur les critères qui l'intéressent. L'analyse par profil de la figure 44.3 permet de voir l'impact d'un tel choix sur les autres indicateurs.

Utilisation en pilotage :

Supposons que l'on cherche à minimiser l'en-cours global moyen. Alors les comportements admissibles sont (d'après l'axe 4) C1, C4, C2 et éventuellement C6. Cependant, parmi ces quatre comportements, seuls C4 et C6 sont satisfaisants au regard des critères de taux de production, engagement des machines, durées de passage,... (cf axe 1). C6 semble d'ailleurs meilleur que C4. Afin de trancher entre les deux types, on peut examiner les axes 2 et 3 : on observe alors que C4 est plutôt caractérisé par une forte utilisation de tous les stocks, surtout les stocks aval, tandis que C6 les sollicite peu, hormis le stock amont de la cellule 1. Choisir un comportement C4 ou bien C6 revient donc essentiellement à privilégier l'amont ou l'aval des postes

d'usinage et de montage (la question ne se ramène cependant pas uniquement à ceci : il y a aussi des différences sur les variations d'en-cours global et l'occupation du stock de la cellule 1).

La projection des centres des classes sur les axes permet également d'évaluer les conséquences d'un changement par rapport à un comportement initial.

Exemple : Supposons que, pour une certaine configuration initiale, on enregistre des performances de type C3.

Est-il intéressant d'essayer de changer de type de comportement, donc de modifier la configuration ?

- pour aller vers C1, la réponse est NON (car la position de C1 sur l'axe 1 montre une dégradation des durées de passage et d'attente),
- pour aller vers C2, la réponse est NON (à cause des positions sur l'axe 1),
- pour aller vers C4, la réponse est OUI (d'après l'axe 1, à voir sur les autres axes),
- pour aller vers C5, la réponse est OUI id.,
- pour aller vers C6, la réponse est OUI id.,
- pour aller vers C7, la réponse est OUI id.

Maintenant que l'on sait où on peut aller (et pourquoi on veut y aller, c'est-à-dire quels sont les critères que l'on cherche à améliorer), et que l'on sait surtout où il ne faut pas aller, posons-nous la question de savoir avec quels moyens effectuer cet éventuel changement de comportement.

Pour cela, il faut savoir :

- ce qui a conduit le système au comportement dans lequel il se trouve, c'est-à-dire quels sont les scénarios à l'origine de ces performances.
- ce que l'on peut faire pour le conduire à un autre état, c'est-à-dire quels sont les facteurs de contrôle sur lesquels il faut jouer pour basculer dans tel ou tel état voisin.

Ces questions amènent à l'interrogation suivante : "Des comportements 'proches' du point de vue de leur mise en oeuvre sont-ils obligatoirement proches du point de vue de leurs performances, ou bien peuvent-ils être éloignés l'un de l'autre, ainsi que nous l'avons envisagé au départ ?".

4.4.2. Etape 5 : Caractérisation des classes (ou "stratégies")

Aux regroupements effectués sur les performances correspondent les groupes des scénarios qui les ont engendrées. C'est à cet ensemble de classes, constituant une structuration de l'espace des scénarios, que nous nous intéressons maintenant. Les classes sont ici abordées du point de vue de la composition des scénarios. Une classe regroupe un ensemble de stratégies équivalentes du point de vue du type de performances obtenues. Il s'agit de nommer ces stratégies.

Quels sont les facteurs contrôlés déterminants pour la formation des classes ? Comment décrire une classe de façon simple, c'est-à-dire par une expression synthétique des modalités des facteurs qui composent les scénarios (cf phase 1 de la figure 44.4) ?

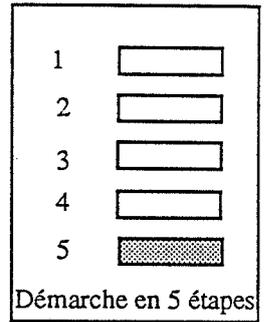
Les phases 2 et 3 du processus (cf figure 44.4) montrent une utilisation de la caractérisation des classes pour le pilotage du système :

- prévoir les performances de l'atelier à la seule connaissance de la stratégie envisagée (phase 2),
- choisir une stratégie adaptée pour changer de comportement (phase 3).

Rappelons que la campagne de simulation qui sert de support à notre étude met en jeu quatre facteurs contrôlés. Le scénario de chaque simulation est codé sur quatre caractères (les codes des modalités sont expliqués en annexe F).

- 1^{er} caractère : facteur F1 (nombre de cfg), varie dans [2,...8] ;
- 2^e caractère : facteur F2 (vitesse des cfg), varie dans [1,...4] ;

Caractérisation de stratégies de pilotage



1

Caractériser les classes
à l'aide des facteurs
contrôlés

2

Affecter un nouveau
scenario à un type de
comportement

3

Passer d'un comportement
à un autre

Figure 44.4

- 3^e caractère : facteur F3 (capacités de stockage), varie dans [A B D E F G H I J] ;
- 4^e caractère : facteur F4 (règle de gestion), varie dans [1,2].

Dans les paragraphes qui suivent nous allons voir le degré d'importance des différents facteurs dans la formation des classes (leur "puissance ségrégative"), puis la composition de chaque classe, en termes de facteurs contrôlés, sera analysée.

4.4.2.1. Puissance ségrégative des facteurs

Nous appelons "puissance ségrégative (p.s.)" d'un facteur contrôlé sa capacité plus ou moins grande à donner naissance à des comportements bien différenciés selon les modalités prises par ce facteur.

Pour mesurer ce critère, on dresse, pour chaque modalité de chacun des facteurs, une table de contingence représentant la présence de chaque modalité dans les classes retenues (cf figure 44.5). Il apparaît que certaines modalités sont complètement absentes de certaines classes, et cela d'autant plus que le facteur permet une bonne séparation des individus. On repère ensuite, sur la colonne correspondant à la modalité, le nombre de "0". La puissance ségrégative du facteur est donnée par le nombre total de "0", ramené au nombre total de cases du tableau. Plus la valeur du critère est élevée, plus l'explication donnée par un caractère est forte. On peut donc ordonner les facteurs des simulations selon leur puissance ségrégative.

D'après les tableaux de la figure 44.5, on a le classement suivant :

- | | |
|-------------------------------|------------|
| - F3 (capacités de stockage), | avec 0.60, |
| - F1 (nombre de cfg), | avec 0.38, |
| - F2 (vitesse des cfg), | avec 0.32, |
| - F4 (règle de gestion), | avec 0.07. |

Il s'agit d'une hiérarchie de l'influence des facteurs non plus pour la description mais pour la structuration du nuage.

Etape 5 : Caractérisation des stratégies

Puissance ségrégative des facteurs (p.s.)

		Nombre de cfg						
		2	3	4	5	6	7	8
C1			0	0	0	0	0	0
C2					0	0	0	0
C3			0					0
C4		0	0		0			
C5		0		0				
C6		0		0				
C7								
		3	3	3	3	2	2	3

$$p.s. = 19/49 = 0.38$$

		Vitesse des cfg			
		1	2	3	4
C1		0	0	0	
C2		0	0		
C3		0			
C4		0			
C5					
C6				0	0
C7					
		4	2	2	1

$$p.s. = 9/28 = 0.32$$

		Stockages									
		A	B	D	E	F	G	H	I	J	
C1		0	0	0	0	0	0	0	0		
C2		0							0	0	
C3						0		0			
C4		0	0	0	0	0				0	
C5		0		0		0	0	0	0	0	
C6		0	0	0	0	0		0		0	
C7			0		0		0		0		
		5	4	4	4	5	3	4	4	4	

$$p.s. = 37/63 = 0.59$$

		Règle de gestion	
		1	2
C1			0
C2			
C3			
C4			
C5			
C6			
C7			
		0	1

$$p.s. = 1/14 = 0.07$$

Figure 44.5

4.4.2.2. Caractérisation de chacune des classes

On peut caractériser une classe de scénarios en énumérant tous les éléments qui la composent ; la description est alors exhaustive mais inexploitable. Il faut parvenir à synthétiser l'information contenue dans les classes de scénarios.

Une seconde voie consiste à chercher, facteur par facteur, les points communs entre les modalités présentes (supérieures à..., comprises dans un certain intervalle de valeurs... pour les variables quantitatives, ou bien analogies et différences pour les variables qualitatives). On obtient ainsi une description plus synthétique que la liste complète (nous le verrons plus loin), mais les points communs entre scénarios ne sont pas toujours faciles à mettre en évidence. En outre, l'explication est construite à partir des facteurs considérés individuellement, les combinaisons de facteurs ne sont pas prises en compte ; l'analyse n'est donc pas complètement multi-facteurs. On pourrait essayer de repérer quelles combinaisons de facteurs sont fortement présentes, ou au contraire peu représentées, dans chacune des classes, mais on se heurte rapidement à la complexité combinatoire du problème. Une autre solution consisterait à agréger les facteurs entre eux pour diminuer le nombre de combinaisons, et regrouper, par exemple, "vitesse de cfg" et "nombre de cfg" en un seul facteur combiné : "force de transport", par exemple. Le problème est effectivement réduit mais cela ne répond pas à la question, puisque nous cherchons, au contraire, à conserver un niveau de détail assez fin.

Caractérisons chaque type de comportement, classe par classe, en établissant, pour chaque facteur, la liste des modalités présentes. Les facteurs sont annoncés dans l'ordre de leur puissance ségrégative. Dans les cas où elle était plus facile, nous avons choisi de faire la description synthétique des modalités absentes et non pas celle des modalités présentes dans la classe.

C1 :

Les cinq éléments ont le même scénario : 24J1.

C1 est caractérisé par "Deux cfg roulant très lentement (10 m/min), avec un stockage J". En fait, le stockage apparaît ici secondaire, c'est la combinaison "deux cfg et 10 m/min" qui est essentielle : le scénario 24J1 est en effet l'unique représentant de cette combinaison.

C2 :

F3 : B D E F G H

F1 : 2, 3 ou 4 cfg

F2 : 3 ou 4

F4 : 1 ou 2

F3 peut être décrit par ses modalités absentes (A, I, J). Les configurations de stockage manquantes ont en commun d'avoir le même profil (capacités identiques sur stock aval du poste de palettisation et sur stocks d'usinage et de montage, accompagnées d'une capacité environ deux fois supérieure sur cellule 1), que l'on peut appeler "profil-type" (cf figure 44.6).

Alors, C2 est caractérisé par "moins de 5 cfg roulant au plus à 15 m/min, associés à des configurations de stockage non conformes au profil-type".

C3 :

F3 : A B D E G I J

F1 : 2, 4, 5, 6, 7

F2 : 2, 3, 4

F4 : 1, 2

Profils des configurations de stockage

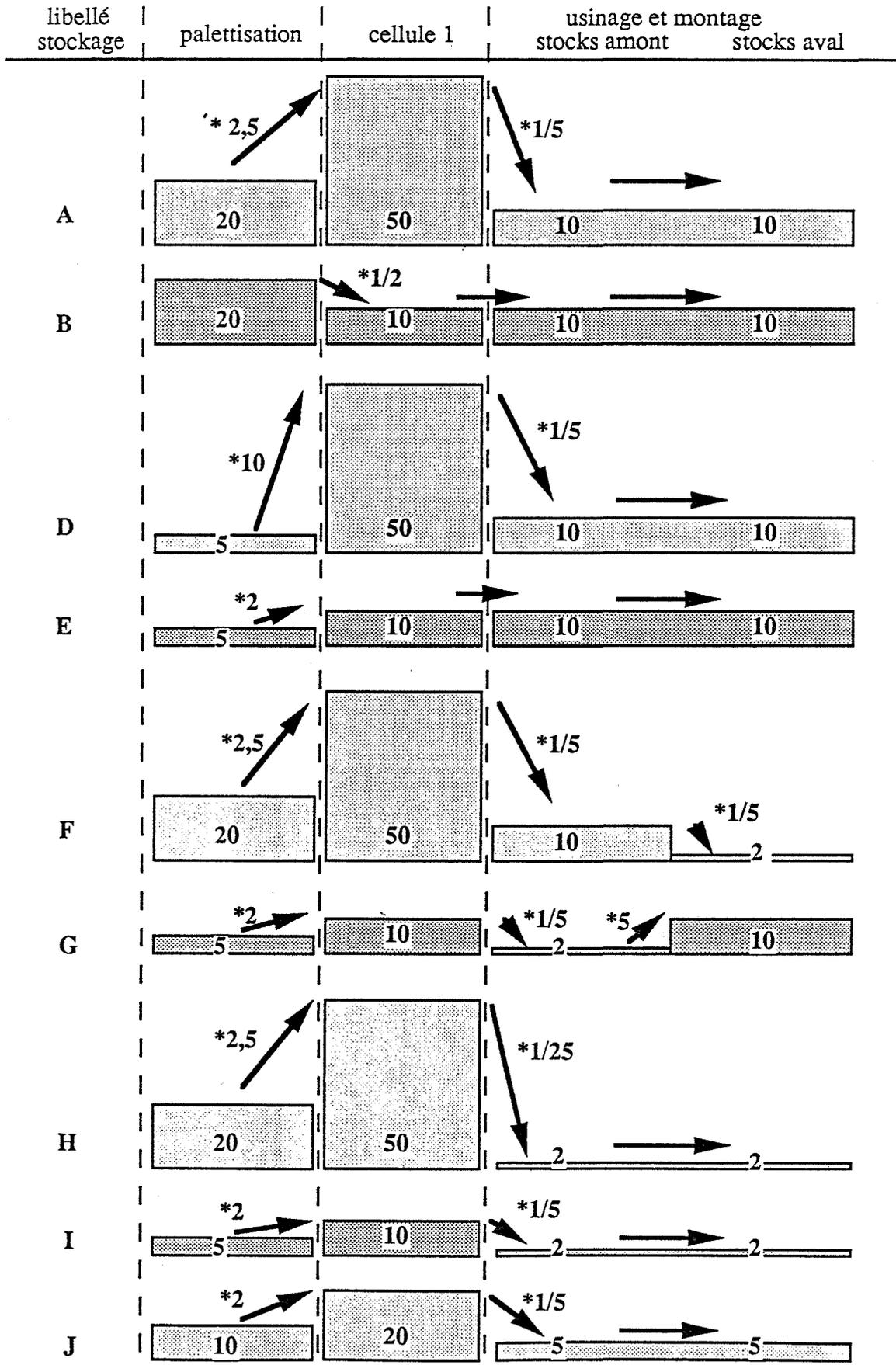


Figure 44.6

Décrivons les modalités absentes de C3 : F et H. Ces configurations ont en commun de fortes capacités en début d'atelier (palettisation et cellule 1) et de faibles capacités en sortie (aval usinage et montage).

C3 est caractérisé par "toute configuration de stockage qui ne présente pas simultanément de fortes capacités en entrée d'atelier et de faibles capacités en sortie d'atelier, associée à 7 cfg au plus, roulant au plus à 30 m/min".

C4 :

F3 : G H I

F1 : 4, 6, 7, 8

F2 : 2, 3, 4

F4 : 1, 2

C4 est caractérisé par "de faibles capacités de stockage en amont de l'usinage et du montage, associées à au moins 4 cfg, roulant au moins à 15 m/min".

C5 :

F3 : B E

F1 : 3, 5, 6, 7, 8

F2 : 1, 2, 3, 4

F4 : 1, 2

C5 est caractérisé par "de faibles capacités de stockage sur cellule 1, de fortes capacités sur l'usinage et le montage, associées à au moins 3 cfg".

C6 :

F3 : G I
 F1 : 3, 6, 7, 8
 F2 : 1, 2
 F4 : 1, 2

C6 est caractérisé par "de faibles capacités de stockage sur cellule 1, sur poste de palettisation et sur l'amont de l'usinage et du montage, associées à au moins 5 cfg, roulant au moins à 30 m/min".

C7 :

F3 : A D F H J
 F1 : 2, ...8
 F2 : 1, 2, 3, 4
 F4 : 1, 2

C7 est caractérisé par "de moyennes ou fortes capacités de stockage sur cellule 1".

La caractérisation, on le voit, est une tâche difficile surtout pour des facteurs comme F3 dont les relations entre modalités ne sont pas exprimables simplement. C'est une tâche qui, pour être bien menée, nécessiterait la prise en compte, d'une part, des combinaisons de facteurs et, d'autre part, d'information supplémentaire sur les facteurs. Peut-être des techniques d'apprentissage automatique permettraient-elles d'améliorer et d'automatiser ce processus ?

4.4.2.3. Règle d'affectation d'un scénario à un comportement

La structuration de l'espace des performances, transférée à l'espace des scénarios, fait apparaître en parallèle une typologie de configurations d'atelier et une typologie de comportements.

Il serait intéressant de formaliser les relations entre ces deux structures, au moyen, par exemple, de règles d'affectation d'un nouveau scénario à un comportement (figure 44.7). La forme de ces règles pourrait être celle d'un coefficient d'affectation ou bien d'une expression logique, etc...

L'idéal serait de disposer d'une description précise, complète, des classes, par une expression logique. Alors le processus d'affectation serait très simple : le scénario vérifie ou ne vérifie pas le prédicat caractéristique de la classe. Malheureusement, nous avons vu les difficultés que pose la caractérisation des classes à partir des facteurs contrôlés. Cette voie fait encore partie du domaine de la recherche en apprentissage automatique ; nous y reviendrons plus loin.

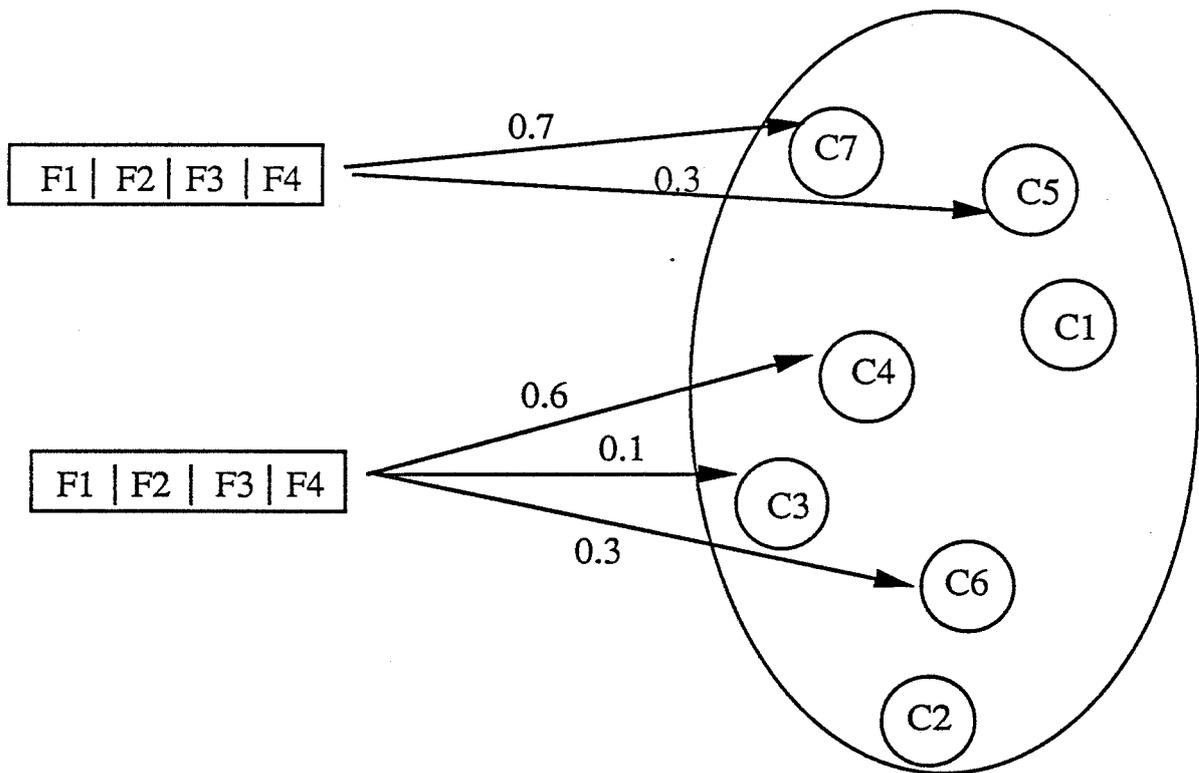
Nous nous tournons maintenant vers la construction de coefficients d'affectation représentant la probabilité d'appartenir à l'une ou l'autre des classes et prenant en compte la puissance ségrégative des facteurs. Ainsi, le facteur "règle de gestion", dont la puissance ségrégative est très faible, n'interviendra pratiquement pas dans le calcul du coefficient.

Pour chaque case des tableaux vus précédemment (figure 44.5), on calcule un coefficient d'affectation (C.A.), de la manière suivante :

$$\text{C.A.} = (\text{poids de la modalité dans la classe} / \text{poids dans toutes les classes}) \\ * \text{puissance ségrégative du facteur.}$$

Le résultat des calculs est constitué des tableaux de la figure 44.8. Un C.A. global est calculé pour chaque classe : on somme, pour chacune des classes, les C.A. des quatre modalités de facteurs qui composent le

Affectation d'un scénario à un comportement



Scénarios codés sur 4 caractères

Types de comportement

Figure 44.7

Etape 5 : Caractérisation des stratégies

Coefficients d'affectation (* 100)

Nombre de cfg (p.s. = 0.38)

	2	3	4	5	6	7	8
C1	5	0	0	0	0	0	0
C2	9	19	6	0	0	0	0
C3	9	0	6	6	11	6	0
C4	0	0	3	0	4	6	8
C5	0	4	0	6	4	3	11
C6	0	4	0	6	4	8	6
C7	9	7	18	17	9	11	8

Vitesse des cfg (p.s. = 0.32)

	1	2	3	4
C1	0	0	0	1
C2	0	0	9	7
C3	0	4	4	12
C4	0	2	9	4
C5	7	4	4	1
C6	13	2	0	0
C7	12	2	6	6

Stockages (p.s. = 0.59)

	A	B	D	E	F	G	H	I	J
C1	0	0	0	0	0	0	0	0	7
C2	0	7	10	7	13	5	30	0	0
C3	8	30	10	7	0	10	0	7	15
C4	0	0	0	0	0	20	10	22	0
C5	0	22	0	44	0	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0	25	0	30	0
C7	51	0	39	0	46	0	20	0	37

Règle de gestion (p.s. = 0.07)

	1	2
C1	0.2	0
C2	0.4	1.4
C3	0.7	1.6
C4	1.2	0.4
C5	0.7	1
C6	0.6	1.2
C7	3	1.4

Figure 44.8

scénario. L'affectation se fait à la classe qui possède le plus fort C.A. global. D'autres classes sont atteignables, mais avec des C.A. inférieurs (cf figure 44.9).

Des vérifications ont été effectuées sur quelques simulations supplémentaires. Le classement par C.A. n'a pas un taux de réussite très élevé. De toutes façons, cette règle n'est pas satisfaisante car si elle cherche à prendre en compte les poids respectifs et individuels des facteurs, elle fait l'impasse sur les interactions.

On pourrait essayer de l'améliorer, mais il nous paraît plus prometteur de porter nos efforts sur les apports de l'apprentissage automatique pour la phase de caractérisation.

4.4.2.4. Règle de passage d'un profil à l'autre

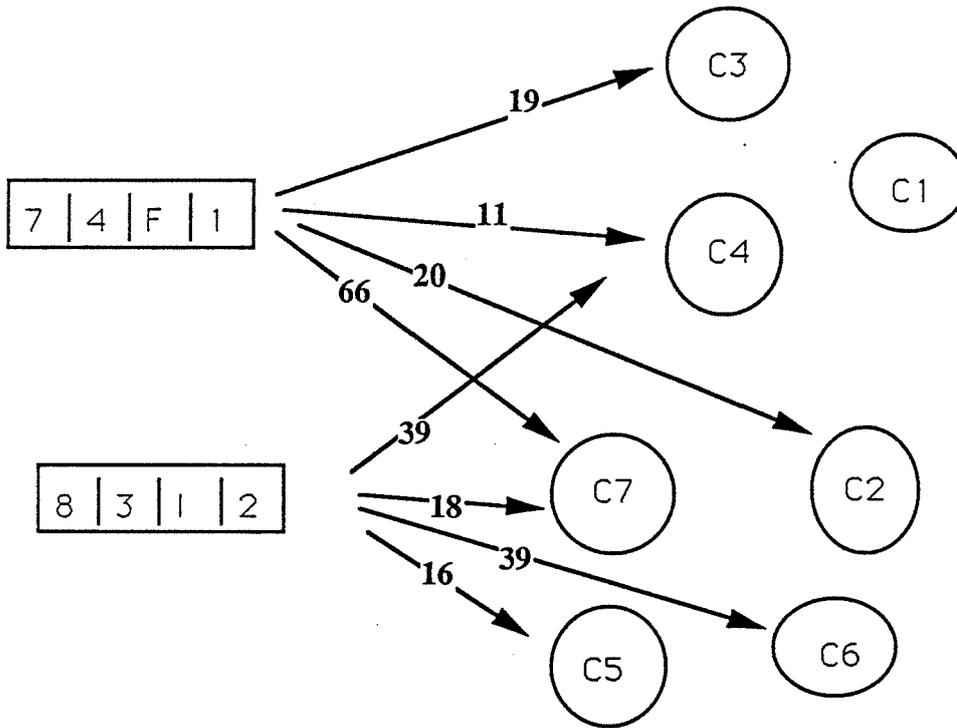
Il peut être intéressant de changer de classe de comportement, pour améliorer un critère particulier. Nous cherchons à bâtir un système qui permettrait d'aider l'utilisateur dans le choix des moyens à mettre en oeuvre pour parvenir à ce but.

Exemple de conseil : "Vous avez tel scénario, qui conduit à tel comportement. Pour passer à tel autre comportement, et compte tenu du scénario initial, vous pouvez jouer soit sur les stockages, soit sur le nombre de cfg. Choisissez ce qui vous coûte le moins cher, ou bien ce qui vous procure le plus grand avantage stratégique, la plus grande flexibilité, en termes de facilités à atteindre d'autres comportements satisfaisants."

Malheureusement, notre formalisme de caractérisation des classes est trop pauvre pour fournir des réponses aussi complètes. Les descriptions ne comprennent notamment pas de disjonctions de caractéristiques, ce qui interdit les choix alternatifs. On se contentera donc de conseils plus grossiers du type : "pour passer de tel comportement à tel autre, il faut jouer sur tel et tel facteur".

Etape 5 : Caractérisation des stratégies

**Exemples d'affectation de scénarios aux comportements
à l'aide des coefficients d'affectation**



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
7			6	6	3	8	11
4	1	7	12	4	1		6
F		13					46
1			1	1	1	1	3
	1	20	19	11	5	9	66

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
8			0	8	11	8	11
3		9	4	9	4		6
I			7	22		30	
2		1	2		1	1	1
	0	9	13	39	16	39	18

Figure 44.9

Application 1 :

Supposons que l'on cherche à passer d'un comportement C3, engendré par un scénario "74J2", à un comportement C5. D'après la caractérisation de C5, il faut changer le stockage "J" en stockage "B" ou "E". Il s'agit maintenant d'estimer :

- s'il est plus facile de passer à "B" ou à "E" à partir de "J",
- si le fait d'avoir "B" ou "E" engendre plus de risques de tomber dans un mauvais comportement au cas où l'un des autres facteurs subirait une altération (panne de cfg, par exemple).

Dans ce cas, le système d'aide à la décision a pu fournir une réponse, mais il se peut qu'il ne puisse pas répondre. En effet, les définitions des classes telles qu'elles sont formulées, sont trop larges ; elles peuvent recouvrir des éléments qui ne font pas partie de la classe.

Application 2:

Supposons que l'on cherche à passer d'un comportement C3, engendré par un scénario "64B2" à un scénario C5. On est alors dans l'impossibilité de répondre, car la caractérisation de C5 ne rejette pas "64B2". Il est, par conséquent, impossible de proposer un changement.

Nous voyons ici les limites de la caractérisation facteur par facteur. Il faut absolument, pour aller plus loin, pouvoir prendre en compte les interactions de facteurs.

4.4.3. Synthèse du chapitre

Des techniques de classification et de partitionnement ont permis de mettre en évidence un certain nombre de profils de performances (ou "comportements typiques").

On a pu remarquer que les "mauvais" comportements, c'est-à-dire ceux qui enregistrent de mauvaises performances sur la totalité des indicateurs, sont parfaitement délimités ; ils correspondent à des classes

complètement stables quelle que soit la technique de partitionnement utilisée. Cela signifie qu'on ne peut pas confondre un mauvais ou très mauvais scénario avec un scénario moyen ou bon. Par contre, les comportements "satisfaisants", qui représentent la majorité des configurations, sont moins bien différenciés entre eux, ce qui montre que nos indicateurs ne permettent pas de départager complètement les bonnes stratégies entre elles.

Chaque profil est caractérisé par la combinaison d'indicateurs de performance qui entrent dans sa composition. On obtient une qualification des profils par leurs performances. Ainsi, l'utilisateur dispose d'un éventail des comportements qui lui permet de choisir une configuration d'atelier en fonction des critères qu'il souhaite favoriser. Une telle caractérisation des profils, à base de coefficients numériques, n'est cependant pas toujours très explicite et nuit à l'interprétation.

A chaque profil de performances correspond un ensemble de stratégies de configurations (les scénarios), que l'on cherche également à qualifier. La caractérisation ne porte plus, ici, sur des grandeurs numériques mais sur des variables à modalités "symboliques". L'opération consiste à trouver une description qui recouvre tous les éléments de la classe et élimine tous les autres. Les techniques numériques, nous l'avons vu, sont mal adaptées à ce genre de travail.

Nous procédons, quant à nous, à une comptabilisation des modalités de facteurs qui entrent dans la composition des scénarios de la classe pour pouvoir dresser un portrait de cette dernière. Un coefficient d'affectation, calculé sur ce même principe, permet d'affecter une nouvelle stratégie de configuration d'atelier à la classe de stratégies la plus proche, au sens de ce critère. Des règles de passage d'un profil à un autre sont envisagées mais nous nous heurtons à la pauvreté de la description des stratégies.

4.5. BILAN DE L'UTILISATION DE L'ANALYSE DE DONNEES

Notre objectif est d'aider à la conception puis au pilotage efficace de systèmes de production performants par construction d'un modèle des comportements du système. Pour cela, nous cherchons à en améliorer notre connaissance par un apprentissage basé sur des simulations du système en fonctionnement. Au cours de cette démarche, deux questions importantes se sont posées à nous :

- celle de l'obtention d'observations pertinentes pour l'élaboration d'une connaissance sur le comportement du système de production.

- celle de l'exploitation des données fournies par les simulations ainsi que de la génération d'une connaissance utile pour la mise au point d'un outil d'aide à la conception.

En ce qui concerne le premier point, nous avons fait appel aux méthodes désormais classiques de la simulation, et notamment aux techniques statistiques, pour le calibrage des échantillons de simulation, en durée et en nombre. Nous nous sommes également attachés, ce qui est moins classique chez les praticiens de la simulation, à la construction de plans d'expériences adaptés. En effet, pour que les analyses effectuées sur les données aient une portée suffisamment générale, il importe de s'assurer, d'une part, que l'ensemble des simulations permet bien de tester tous les cas de figure souhaités et, d'autre part, que le plan de simulation global est équilibré. Cependant, les observations ne sont pertinentes que si les indicateurs adéquats ont été relevés. Nous avons montré comment il était possible de s'aider utilement de techniques d'analyse de données et notamment de l'analyse factorielle, pour déterminer, par itérations successives, un ensemble d'indicateurs représentatifs du comportement du système et un ensemble de facteurs mettant en jeu des situations intéressantes pour le problème.

Nous avons vu, dans cette première phase, le bénéfice que l'on pouvait tirer de méthodes numériques (statistiques, A.D., plans d'expériences) pour répondre au premier objectif, concernant la validité et la mesure de la pertinence des observations.

En ce qui concerne le second point, celui de l'interprétation et de l'exploitation des observations collectées, nous avons fait appel, également, à des techniques numériques d'analyse de données, pour transformer les informations contenues dans les observations en connaissance structurée, de type "regroupements par ressemblances", au moyen de techniques d'analyse de données.

Ces techniques, nous l'avons vu, donnent de bons résultats sur nos données numériques : les classes ainsi formées font preuve d'un caractère de stabilité assez fort, indépendamment de la méthode de classification utilisée. Par contre elles présentent de grosses faiblesses quant à l'interprétabilité des regroupements effectués.

Les contributions des variables, ou des facteurs, à la formation des classes permettent de donner une interprétation aux profils ainsi mis en évidence. Mais on se heurte à des difficultés lorsqu'il s'agit de caractériser les individus regroupés au sein d'une même classe. Les techniques numériques ne prenant pas en compte les phénomènes d'interactions entre facteurs, une interprétation multi-facteurs n'est, par conséquent, pas possible.

Ainsi, les techniques numériques nous fournissent des résultats que nous interprétons difficilement. Ces méthodes n'ont, en effet, pas pour objectif principal de fournir des explications sur les phénomènes mais d'abord de mettre ceux-ci en évidence. Les difficultés les plus fortes concernent le processus de caractérisation des classes d'objets décrites par des facteurs qualitatifs (stockage "A", gestion "SPT" etc..).

Les techniques numériques d'analyse de données atteignent clairement leurs limites lorsqu'il s'agit de trouver la signification des proximités observées. Cette phase explicative comporte un aspect nettement plus "symbolique" que les précédentes. L'aspect symbolique pourrait même certainement être introduit plus tôt dans l'analyse, lors de la formation des classes. En effet, Kodratoff estime que "introduire du symbolique dans le numérique consiste à favoriser la formation de regroupements pour lesquels on peut avoir une chance de trouver une explication sous forme d'un prédicat de la logique du premier ordre qui "reconnaît" ce regroupement." [Kodratoff 87], et c'est bien là ce qui nous fait défaut.

Finalement, nous nous heurtons, pour la construction du modèle comportemental de l'atelier, au problème de la **généralisation** (au sens de l'apprentissage automatique) **des expériences** réalisées par simulation. Généraliser les observations en règles comportementales, c'est retrouver l'information symbolique, plus synthétique, contenue dans les données numériques. Aussi, l'Apprentissage Symbolique Automatique nous apparaît-il prometteur pour la résolution de nos difficultés.

5. QUATRIEME PARTIE :

BILAN ET PROSPECTIVES

5.1. QUANT A L'ENRICHISSEMENT DU PROCESSUS DE SIMULATION

Nous avons essayé d'apporter une contribution au processus de simulation dans sa phase la moins étudiée : l'exploitation des résultats. Une exploitation valide doit impérativement reposer sur des résultats :

- fiables, d'une part,
- bien ciblés par rapport au problème à résoudre, d'autre part.

Le premier point appelle à une pratique rigoureuse de la simulation. Nous avons montré l'importance des phases de vérification du modèle, de validation statistique et de mise au point du contrôle des simulations.

Le second point concerne la définition et la mise au point des plans d'expériences, par affinage successif des jeux d'essais. Notre apport se situe dans la génération automatique des plans et dans la conduite des expériences, guidée, d'une itération à l'autre, par une procédure d'évaluation du jeu d'essai reposant sur des techniques d'analyse factorielle des données (affinage des facteurs).

5. 2. QUANT A LA CONSTRUCTION D'UN MODELE DE COMPORTEMENTS : UNE APPROCHE "APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE"

Si nous avons réussi à extraire un certain nombre de comportements-types de l'ensemble des observations, nous avons vu combien leur interprétation était mal-aisée, de même que la caractérisation des stratégies. Nous avons diagnostiqué ce phénomène comme une conséquence inhérente aux outils numériques utilisés et à leurs limites. L'apprentissage automatique semblerait être un moyen d'aller plus loin dans l'exploitation des comportements et des stratégies.

Si l'on considère la définition de l'apprentissage automatique donnée dans [Cohen 82] : "l'acquisition d'une connaissance explicite", alors nos travaux se placent clairement dans ce domaine. En effet, nous visons à l'élaboration d'un modèle des comportements du système au travers d'une génération automatique de

connaissances. Nous avons vu quelles étaient les limites d'un apprentissage numérique, c'est pourquoi il serait peut-être intéressant de se tourner vers d'autres techniques d'Apprentissage Automatique : les techniques d'**apprentissage symbolique** automatique (ASA). Parmi les méthodes existantes [Beaune 91], l'apprentissage à partir d'exemples (ou encore "acquisition de concepts") semble particulièrement adéquat.

5.2.1. Principes de l'apprentissage à partir d'exemples [Michalski 83], [Michalski 86]

Un concept est caractérisé par un certain nombre d'exemples et éventuellement de contre-exemples, à partir desquels est construite une description plus générale de ce concept.

Il s'agit de trouver une description caractéristique d'une classe d'objets [Kodratoff 86]. Les descriptions peuvent être de diverses formes mais se présentent le plus souvent comme des règles de production, auxquelles on peut appliquer les quatre opérateurs suivants : création, généralisation, spécialisation, composition. Une description est caractérisée par son niveau de "discrimination" (c'est-à-dire sa capacité à ne pas reconnaître les contre-exemples) ainsi que par sa "complétude" (c'est-à-dire sa capacité à reconnaître les exemples).

5.2.2. Application au cas des simulations

Dans le cas que nous traitons, l'apprentissage est de type multi-concepts. Chaque type de comportement, décrit par l'ensemble des scénarios qui le constitue, représente un concept à décrire. Un scénario est assimilé à un exemple.

Les scénarios qui n'entrent pas dans la composition du type concerné serviront à décrire la négation de ce concept (de ce type). Une bonne description d'un type de comportement est une description qui reconnaît tous les scénarios qui composent le type et rejette tous les autres.

Ainsi le type C7, par exemple, sera décrit par les scénarios suivants :

32F2 84F1 74F1 21A1 42D1 52F1 62F1 42A1 63A2 73A1 52D2 42F1 71H1 71D2 41A1 84D1 84A1
61F1 63J1 31J1 42J2 21J2 52H1.

Tous les autres scénarios du plan constituent l'ensemble des contre-exemples. L'intérêt des techniques d'apprentissage réside dans la prise en compte simultanée des facteurs. Cependant la généralisation est ici limitée car les observations, telles qu'elles sont présentées, ont un niveau de représentation très sommaire, qui n'autorise pas un niveau de généralisation très poussée.

Par contre, le système d'apprentissage peut devenir beaucoup plus intéressant dès lors qu'on lui adjoint une connaissance supplémentaire, plus complexe, utilisée jusqu'alors de façon implicite.

Ainsi, on lui adjointra une connaissance "stockage" en lui indiquant que :

- * "stockage A" signifie "cellule1" = 50 et "palettisation" = 20 et "amont_usinage" = 10 et "amont_montage" = 10 et "aval_usinage" = 10 et "aval_montage" = 10,
- * et ainsi de suite pour chaque modalité de stockage.

Alors le programme d'apprentissage recherche, par appariements successifs et selon les règles de son algorithme propre, l'expression qui décrit au mieux le concept de la classe.

Nous avons fait quelques tentatives avec un prototype de système d'apprentissage symbolique, APOGEE [Bisson 90], développé au LIA de ORSAY, mais les résultats se sont révélés plutôt décevants. Les opérations de généralisation de nos exemples n'ont pas pu aller très loin du fait d'un manque de connaissance supplémentaire.

La voie symboliste semble pourtant un passage obligé pour une meilleure explication et une meilleure interprétation des données, mais à la différence de ce que nous avons fait, il faudrait vraisemblablement envisager cette démarche dès le départ et la mêler notamment au processus de classification.

5.3. LES APPORTS DE NOTRE METHODE A L'ANALYSE DES SYSTEMES DE PRODUCTION : LIMITATIONS DE MACSI

La démarche proposée dans ce domaine contribue d'abord à la compréhension du système. En recherchant les indicateurs représentatifs, on met en lumière les points sensibles du système (on s'aperçoit, par exemple, que le critère d'en-cours moyen est très ambigu ; seul, il ne signifie rien). De même, la recherche des facteurs influents permet de savoir quels sont les facteurs déterminants pour la conduite du système (par exemple, la règle de gestion des files d'attente revêt une importance quasiment nulle, comparativement à la taille du parc-chariot).

Nous nous sommes cependant heurtés, dans nos conclusions, aux limitations de MACSI : le routage des cfg manque de complexité et le parc-machine est un peu petit. Par conséquent, les résultats tirés de ce modèle sont un peu triviaux. Dans un premier temps, cependant, cela permet de tester la démarche, mais pour aller plus loin, il faut maintenant l'appliquer à des modèles plus complexes, par leur taille, leurs politiques de gestion, la prise en compte de phénomènes aléatoires ou bien l'intégration d'autres niveaux de décision de l'entreprise.

Pour pouvoir vraiment être considérée comme un outil d'aide à la décision, notre approche nécessiterait d'intégrer un critère global permettant au décideur de valider et de comparer les stratégies choisies. La meilleure solution consiste vraisemblablement à affecter une valeur financière aux critères que nous avons utilisés et à calculer une fonction économique globale. SIMINT (SIMulation d'INTégration), autre produit de recherche développé au sein du laboratoire [Miry 91] modélise un système intégré de production et fournit précisément cette évaluation économique à partir des aspects financiers liés tant aux coûts de production (investissements, matières, appro, personnel, maintenance...) qu'aux ventes des produits réalisés. Il est envisagé, pour aborder un plus large éventail d'indicateurs (du niveau "fonctionnement de l'atelier" comme dans MACSI jusqu'au niveau "trésorerie" ou encore "compte d'exploitation") et pour mettre en lumière les relations entre indicateurs de fonctionnement et indicateurs financiers, d'appliquer nos principes d'analyse aux expériences issues de ce modèle.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

1. *Staphylococcus aureus*

2. *Staphylococcus epidermidis*

ABDALI A. et PREVOT P. (1989)

Aladin : prototype d'un système expert pour l'analyse des données industrielles. *Actes des 9èmes Journées Internationales "Systèmes Experts et Applications"*, Avignon : Editions EC2, 29 mai-2 juin 1989, p 613-625.

ALANCHE P. (1983)

La simulation outil d'évaluation des performances des installations de production discontinue. *Intelligence Artificielle et Productique* : novembre 1983, numéro spécial, p 13-16.

ALANCHE P. et ANCELIN B. (1984)

Evaluation des simulateurs à événements discrets. *Le Nouvel Automatismes*, mars 1984, p 61-68.

AMMAR M. (1984)

Conception et réalisation d'un macro-langage dédié à la simulation des systèmes de production. Thèse Docteur-Ingénieur : ENSAM Paris, 1984. 138 p.

AMMAR M. et KIEFFER J-P. (1985a)

De la simulation comme outil d'aide à l'exploitation des systèmes industriels. *Actes de la Convention Automatique Productique*, Paris, 2 déc. 1985, p 68-73.

AMMAR M., DAMRET J-L. et KIEFFER J-P. (1985b)

Utilisation d'un MACRO-LANGAGE dédié à la simulation des systèmes de production. *APII*, 1985, vol 19, n° 5, p 37-453.

BAGLIN G. et alii (1983)

Gestion informatique de la production et des stocks. Mise à jour périodique. Collection WEKA. 1983.

BALCIO. (1985)

Guidelines for successful simulation studies. Blacksburg-Viginia : Polytechnic Institute and State University, novembre 1985, 49p. Technical report TR-85-2.

BARBOUCHA M. (1987)

Modélisation structurale des systèmes complexes. Extraction et validation des règles d'un système expert. Thèse d'Etat : Université de Lille Flandres-Artois, juin 1987. 235 p.

BEAUNE P. (1991)

Un système d'apprentissage incrémental. Thèse de doctorat : Université de Montpellier, à paraître en 1991.

BEL G. et DUBOIS D. (1985)

Modélisation et simulation de systèmes automatisés de production. *APII*, 1985, vol 19, n° 1, p 3-43.

BESOMBES B. (1990)

Un système d'aide à la conduite d'ateliers flexibles basé Réseaux de Petri Colorés. Thèse de doctorat : Université de Lyon I, 8 novembre 1990. 204 p.

BISSON G. (1990)

KBG : a knowledge based generalizator. *Austin (Texas) : Machine Learning Conference*, 1990. p 9-15.

BONETTO R. (1987). *Les ateliers flexibles de production.*

Les ateliers flexibles de production. 2ème édition. Paris : Hermès, 1987. 230p.

BONNEAU F. et PROTH J.M. (1985)

Application de règles de gestion à un système de fabrication : classification des objectifs atteints en vue de leur utilisation. Paris : INRIA, 1985. Rapport n°372. 45 p.

BRAMS G. W. (1983)

Réseaux de Petri - Théorie et pratique. Paris : MASSON, 1983. 184 p.

CANALS D. (1986)

Ordonnancement d'atelier par simulation, étude des règles de priorité et aide au lancement. Thèse de Docteur Ingénieur : CERT/Toulouse, 1986. 326 p.

CAVILLE J.B. et PROTH J.M. (1988)

Pratique de la simulation en production discontinue. SIPRODIS. Editions EC2, Collection Novotique, 1988. 333 p.

CERNAULT Argan (1988)

La simulation des systèmes de production. Toulouse : CEPADUES, 1988. 387 p.

COHEN V. (1989)

Introduction aux plans d'expériences. *Revue de Statistique Appliquée*, 1989, Vol XXXVII, n°2, p 17-46.

COIFFET P. (1988)

La productique et ses outils. Paris : Hermès, 1988. 64 p.

CONESA P. et CAZALET M. (1990)

La simulation à l'appui d'une démarche d'automatisation de cellule de fabrication flexible. *Revue d'automatique et de productique appliquées*, 1990, vol 3, n°1, p 5-25...

DALLERY Y. (1984)

Analyse opérationnelle des réseaux de files d'attente. Evaluation des performances d'un atelier flexible. Thèse Docteur-Ingénieur, Grenoble, 1984. 88 p.

DELANEY W. et VACCARI E. (1989)

Dynamic Models and Discrete Event Simulation. New-York : Marcel Dekker, 1989.
The Experimental Aspect of Simulation, p 351-394.

DELGOULET J. (1986)

La conduite d'ateliers automatisés. Rapport de DEA : Informatique et Automatique Appliquées, INSA LYON, octobre 1986.

DIDAY E., LEMAIRE J., POUGET J. et TESTU F. (1982)

Éléments d'analyse de données. Paris : Dunod, 1982. 462 p.

DOUMEINGTS G. (1984)

Méthode GRAI : méthode de conception des systèmes en productique. Thèse d'état : Université de Bordeaux I, novembre 1984.

DRIDI N. et PROTH J.M. (1987)

Ordonnancement des tâches ; une méthode basée sur la technologie de groupe. *Actes de la 2ème Conférence Internationale Systèmes de Production.* Paris : INRIA, 6-10 avril 1987, p 61-74.

DUFFAU B. et BLOCHE E. (1984)

La simulation d'unités de production. *Intelligence Artificielle et Productique*, mars 1984, Vol 1, N°1, p 19-24.

ELZAS M.S., OREN T.I. et ZEIGLER B.P. (1986)

Modelling and simulation methodology in the artificial intelligence era. Amsterdam : North-Holland, 1986. 423p.

ERSCHLER J., FONTAN G. et MERGE C. (1988)

Agrégation et désagrégation en planification hiérarchisée. *Actes du Congrès Automatique AFCET, TEC88*, Grenoble : 10-12 octobre 1988, p 57-75.

FISHMAN G.S. (1973)

Concepts and methods in discrete event digital simulation. New-York : John Wiley & Sons, 1973. 385p.

GARCIA H. et PROTH J.M. (1987)

Group technology in production management : the short horizon planning level. *Actes de la 2ème Conférence Internationale Systèmes de Production, Volume "Cours"*. Paris, 6-10 avril 1987, p 97-125.

GELENBE E. et PUJOLLE G. (1982)

Introduction aux réseaux de files d'attente. Paris : Eyrolles et CNET-ENST, 1982. 192p.

GIARD V. (1988)

Gestion de la production, 2ème édition. Paris : Economica, 1988. 1068 p.

GIRARD M.A. (1982)

Conception d'un système adaptatif de décision en contrôle de qualité : contribution des méthodes d'analyse des données. Thèse de 3e cycle : Lyon I, octobre 1982. 106 p.

HERITIER C. et PIERREVAL H. (1988)

Apport de la simulation dans la conception d'un système de transport par chariots filoguidés, *Revue d'Automatique et Productique Appliquée*, avril 1988, Vol 1 N°1.

HILLION H.P. et PROTH J.M. (1988)

Systèmes de production hiérarchisée : conception et utilisation. *Actes du Congrès Automatique AFCET, TEC88*, Grenoble : 10-12 octobre 1988, p 49-56.

INGERSOLL ENGINEERS FRANCE (1983)

Les ateliers flexibles. England : John Mortimer, 1983. 238p.

JAMBU M. (1977)

Sur l'utilisation conjointe d'une classification hiérarchique et de l'analyse factorielle en composantes principales, *Revue de Statistique Appliquée*, 1977, vol XXV, n°4, p 5-35.

JAMBU M. (1978)

Classification automatique pour l'analyse des données. Paris : Dunod, 1978. 310p.

JULLIEN B. (1989)

La simulation ; méthodes et outils. Support de cours EMSE, 1989. 20 p.

KETCHAM M.G., SHANNON R.E. et HOGG G.L. (1989)

Information structures for simulation modeling of manufacturing systems. *Simulation* février 1989, p 59-67.

KIRAN A.S., SCLOFFER A. et HAWKINS D. (1989)

An integrated simulation approach to design of flexible manufacturing systems. *Simulation*, février 1989, p 47-52.

KLEIJNEN J.P.C. (1987)

Statistical tools for simulation practitioners. New-York : Marcel Dekker, 1987. 429p.

KODRATOFF Y. (1896)

Leçons d'apprentissage symbolique automatique. Toulouse : Cépadués-Editions, 1986.
191 p.

KODRATOFF Y. (1987)

Science des explications et science des nombres. *Actes des Journées "Symbolique-Numérique" pour l'apprentissage de connaissances à partir de données*. Paris : 8 et 9 décembre 1987.

LEBEAUX M.O. (1985)

Manuel de référence ADDAD - Version micro. Paris : ADDAD, 1985.

LE MOIGNE J.L. (1977)

La théorie du système général, théorie de la modélisation. Paris : PUF, 1977. 258p.

LERMAN I.C., NICOLAS J. et PETER P. (1988)

Classification Conceptuelle : une approche dans la combinaison de méthodes numériques et symboliques. *Actes des 2èmes journées "Symbolique-Numérique" pour l'apprentissage de connaissances à partir de données*. Paris : 12 et 13 décembre 1988.

LEROUDIER J., RENAULT D. et RENAULT M. (1977)

Etude de la gestion des événements dans une simulation à événements discrets. Paris : IRIA, août 1977. Rapport n°246. 26 p.

LEROUDIER J. (1980)

La simulation à événements discrets. Monographie AFCET, 1980. 104 p.

LHOSTE P., TIXADOR J.M., MOREL G. et ROESCH M. (1988)

Outils de conception des systèmes automatisés de production. *Actes du Congrès Automatique AFCET, TEC88, Grenoble*. 10-12 octobre 1988, p 331-340.

MARCOTORCHINO F. (1987)

Une approche unifiée des problèmes de décomposition en production. *Actes de la 2ème Conférence Internationale "Système de Production", Volume "Cours"*. Paris : INRIA, 6-10 avril 1987, p 49-76.

MATHON A. (1990)

Comptabilité industrielle et productique, *Cahier Technique du Pôle "De l'analyse des Coûts au choix d'Investissement dans un environnement productique"*. Saint-Etienne : Pôle Régional de Productique Rhône-Alpes, mai 1990, p 3-33.

MATHON A. et ROELENS J. (1985)

Méthodes mathématiques de l'ordonnancement. Support de cours EMSE, 1985. 62 p.

MELESE J. (1972)

L'analyse modulaire des systèmes de gestion. Boulogne Billancourt : Hommes et Techniques, 1972. 235 p.

MICHALSKI R., CARBONELL J. et MITCHELL T. (1983)

Machine learning : An Artificial Intelligence Approach. Volume 1, 1983. Berlin : Springer-Verlag. 572 p.

MICHALSKI R., CARBONELL J. et MITCHELL T. (1986)

Machine learning : An Artificial Intelligence Approach. Volume 2, 1986. Los Altos : Morgan Kaufmann. 738 p.

MIRY S., MATHON A. et VINCENT L. (1991)

Evaluation économique d'un système de production par simulation de politiques de gestion en présence d'aléas. *Actes du Congrès "Le Génie industriel"*. Tours : 19-21 mars 1991, p 635-645.

OREN T.I. et ZEIGLER B.P. (1979)

Concepts for advanced simulation methodologies. *Simulation Vol 32, n°3, mars 79*, p 69-82.

PEGDEN C.D. (1986) a)

Introduction to SIMAN, Version 3. Pennsylvania : Systems Modeling Corporation, 1986. 384p.

PEGDEN C.D. (1986) b)

Introduction to SIMAN, Version 3. Pennsylvania : Systems Modeling Corporation, 1986. Siman Output Analysis, p 221-295.

PIERREVAL H. (1987) a)

Outils complémentaires des logiciels de simulation usuels, basés sur des techniques graphiques et les systèmes experts. *Actes des JIIA-USINICA*. Paris : juin 1987.

PIERREVAL H. (1987) b)

Analyse, modélisation et simulation des Systèmes de production - Application au cas d'une fonderie. Thèse : LYON I, juin 1987.

PIERREVAL H. (1988)

Data Analysis Oriented Techniques for Learning about Manufacturing Control with Simulation. *Proceedings of the european simulation multiconference*, 1-3 juin 1988, Nice : SCS, p 61-66.

PIERREVAL H. et RALAMBONDRAINY H. (1990)

A Simulation and Learning Technique for Generating Knowledge about Manufacturing Systems Behavior. *J. Opl Res. Soc. Vol 41 N°6*, p 461-467 .

PRITSKER A.A.B. (1986) a)

Introduction to simulation and SLAMII, 3ème édition. New-York : Pritsker & Associates Inc., 1986. 839p.

PRITSKER A.A.B. (1986) b)

Introduction to simulation and SLAMII, 3ème édition. New-York : Pritsker & Associates Inc., 1986. Statistical aspects of simulation, p 723-767.

PROTH J.M. et QUENTIN DE GROMARD H. (1986)

Systèmes flexibles de production - Conception préliminaire. Paris : MASSON, 1986. 279 p.

SAPORTA G. (1990)

Probabilités, analyse des données et statistique. Paris : Technip, 1990. 493 p.

SIMULOG (1983)

New users' introduction to QNAP2. Paris : INRIA, 1983.

SOFTECH INC. (1981)

Integrated Computer Aided Manufacturing (ICAM) Function modeling manual (IDEFO), Doc. de Softech Inc, juin 1981.

TARDIEU H., ROCHEFELD O. et COLETTI R. (1983)

La méthode MERISE, principes et outils. Paris : Editions d'Organisation, 1983. 318 p.

VIGIER M.G. (1988)

Pratique des plans d'expériences - Méthodologie Taguchi. Paris : Les Editions d'Organisation, 1988. 155 p.

VINCENT L. et MATHON A. (1987)

Simulation des flux de tôlerie dans un atelier de parachèvement. Rapport d'étude Ecole des Mines de Saint-Etienne/Cégédur-Péchiney, 23 octobre 1986. 25 p.

VOYATZIS K. (1988)

Utilisation de l'intelligence artificielle pour les problèmes d'ordonnancement. Thèse de 3e cycle : Université Paris Dauphine, janvier 1987. 116 p.

WALLISER B. (1977)

Systèmes et modèles. Paris : Editions du Seuil, 1977. 248 p.

WOIRET P. (1988)

Modélisation et simulation pour l'aide à la conception des systèmes de convoyage. Thèse de Doctorat : INSA LYON, 1988. 296 p.

ZEIGLER B.P. (1976)

Theory of Modelling and Simulation. New-York : John Wiley & sons, 1976. 435 p.



NOM : HERITIER-PINGEON (avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)		DATE de SOUTENANCE :
Prénoms : Christine		
TITRE : <p align="center">Une aide à la conception de systèmes de production basée sur la simulation et l'analyse de données</p>		
NATURE :		Numéro d'ordre :
<input checked="" type="checkbox"/> DOCTORAT	<input type="checkbox"/> DOCTEUR-INGENIEUR	<input type="checkbox"/> DOCTORAT D'ETAT
<input type="checkbox"/> DOCTORAT de 3 ^e CYCLE	Spécialité : Informatique appliquée	
Code U.I.U. - Lyon : T 50/210/19 / et via		CLASSE :
RÉSUMÉ : <p>Les formes nouvelles de la concurrence imposent aux systèmes de production une flexibilité de plus en plus grande. Dans le cas de systèmes très automatisés, les décisions prises lors de la conception vont fortement conditionner les possibilités du futur système ainsi que ses capacités d'adaptation aux changements, donc son degré de flexibilité. Le travail contenu dans ce mémoire s'attache précisément à l'étude de méthodes et d'outils d'aide à la décision pour la conception de systèmes de production. Le lecteur est d'abord introduit au domaine puis aux outils et méthodes utilisés. Le modèle d'atelier qui sert de support à la démarche est alors présenté ; il est suivi d'une réflexion sur la construction des campagnes de simulations conduites à partir de ce modèle, réflexion concrétisée par la définition d'un module de génération automatique de plans de simulations associés au modèle d'atelier choisi. L'analyse des données utilisée comme méthode d'acquisition des connaissances sur le comportement des systèmes de production est ensuite envisagée ; une méthode d'analyse est proposée et expérimentée. Ce travail a été développé avec le souci constant d'explorer les possibilités de l'analyse de données dans le domaine et d'évaluer ces possibilités sur la base de nombreuses expériences.</p>		
MOTS-CLÉS : <p align="center">systèmes de production, aide à la conception, analyse de données, simulation.</p>		
Laboratoire (s) de recherches : <p align="center">Département "Stratégie du Développement" - Ecole des Mines de Saint-Etienne</p>		
Directeur de recherches : P. LADET, Professeur des Universités à l'INPG de Grenoble		
Président de jury :		
Composition du jury : MM J.P. KIEFFER (rapporteur), P. LADET (Directeur de thèse), A. MATHON (Directeur de laboratoire), P. PREVOT (rapporteur), H. PIERREVAL.		

T H E S E

présentée

devant L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

pour obtenir

Le grade de Docteur

Spécialité "Informatique et Automatique Appliquées"

par

Christine HERITIER-PINGEON

**Une aide à la conception de systèmes de production
basée sur la simulation et l'analyse de données**

(VOLUME 2)

soutenue le 20 juin 1991 devant la Commission d'Examen

Jury	M. J-P. KIEFFER,	Professeur des Universités à l'Université d'Aix-Marseille, Rapporteur
	M. P. LADET,	Professeur des Universités à l'INP de Grenoble, Directeur de thèse
	M. A. MATHON,	Professeur, Directeur du Département "Stratégie du développement" de l'EMSE
	M. H. PIERREVAL,	Maitre de Conférences au Laboratoire d'Informatique et Modélisation de Systèmes de Production, Université Claude Bernard, LYON I
	M. P. PREVOT,	Professeur des Universités à l'INSA de LYON, Directeur de la Formation Doctorale, Rapporteur

T H E S E

présentée

devant L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

pour obtenir

Le grade de Docteur

Spécialité "Informatique et Automatique Appliquées"

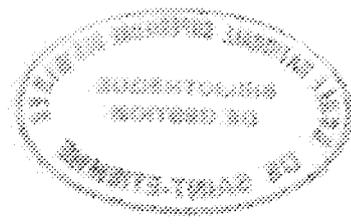
par

Christine HERITIER-PINGEON

**Une aide à la conception de systèmes de production
basée sur la simulation et l'analyse de données****(VOLUME 2)**

soutenue le 20 juin 1991 devant la Commission d'Examen

Jury	M. J-P. KIEFFER,	Professeur des Universités à l'Université d'Aix-Marseille, Rapporteur
	M. P. LADET,	Professeur des Universités à l'INP de Grenoble, Directeur de thèse
	M. A. MATHON,	Professeur, Directeur du Département "Stratégie du développement" de l'EMSE
	M. H. PIERREVAL,	Maître de Conférences au Laboratoire d'Informatique et Modélisation de Systèmes de Production, Université Claude Bernard, LYON I
	M. P. PREVOT,	Professeur des Universités à l'INSA de LYON, Directeur de la Formation Doctorale, Rapporteur



CONFIDENTIAL

Table des matières

EXHIBIT

THE STATE OF TEXAS, COUNTY OF DALLAS, ss. I, _____, Notary Public in and for said County and State, do hereby certify that the foregoing is a true and correct copy of the _____ of _____, as the same appears from the records of said County.

Given under my hand and seal of office, this _____ day of _____, 19____.

Notary Public in and for the County of Dallas, State of Texas.

My commission expires the _____ day of _____, 19____.

VOLUME 1

1. INTRODUCTION GENERALE.....	14
1.1. MODES DE PRODUCTION ET SYSTEMES DE PRODUCTION.....	15
1.1.1. Un peu d'histoire	15
1.1.2. Automatisation et flexibilité.....	16
1.1.3. Enjeux et complexité de la conception de systèmes de production.....	18
1.2. L'AIDE A LA CONCEPTION.....	18
1.2.1. Le problème de la modélisation	19
1.2.2. Le problème de l'expertise en conception de systèmes de production.....	19
1.2.3. Les limites de la simulation	19
1.3. PLAN DE LA THESE	20
2. PREMIERE PARTIE : INTRODUCTION AU DOMAINE ET AUX OUTILS	22
2.1. LES SYSTEMES DE PRODUCTION.....	23
2.1.1. Le domaine d'étude et la problématique.....	23
2.1.1.1. Hypothèses de modélisation.....	24
2.1.1.2. Modèles conceptuels des systèmes de production.....	25
2.1.2. Conception des systèmes de production automatisés.....	27
2.1.2.1. Les problèmes.....	27
2.1.2.2. L'évaluation du système futur.....	30
2.1.2.2.1. Les objectifs.....	30
2.1.2.2.2. Un compromis à trouver.....	31
2.1.2.3. La notion de performance.....	33
2.1.2.4. Conception conjointe du système de transport et de l'interface de stockage	35
2.1.3. Les méthodes.....	36
2.1.3.1. Les méthodes analytiques.....	36
2.1.3.2. La simulation.....	38
2.1.4. Un outil d'aide à la décision s'appuyant sur la simulation.....	39

2.2. LA SIMULATION A EVENEMENTS DISCRETS.....	40
2.2.1. Les simulateurs à événements discrets.....	41
2.2.1.1. Principes de fonctionnement.....	41
2.2.1.2. Les modèles pour la simulation.....	42
2.2.1.3. Les langages de simulation.....	42
2.2.1.4. Caractéristiques du langage choisi (SIMAN V3.21).....	43
2.2.2. Les étapes du processus de simulation.....	45
2.2.2.1. La démarche d'ensemble.....	40
2.2.2.2. Analyse du problème et collecte des données.....	47
2.2.2.3. Elaboration d'un modèle.....	50
2.2.2.3.1. Modélisation - Programmation.....	50
2.2.2.3.2. Vérification.....	50
2.2.2.3.3. Validation.....	53
2.2.2.3. Construction d'expériences.....	55
2.2.2.4. Exploitation des résultats.....	58
2.2.3. Bilan et perspectives de la simulation.....	59
2.3. SYNTHESE DE LA PREMIERE PARTIE.....	59
3. DEUXIEME PARTIE : SIMULATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION.....	61
3.1. ANALYSE ET MODELISATION DE "MACSI".....	62
3.1.1. Présentation du cas.....	62
3.1.2. Première étape du processus.....	62
3.1.2.1. Analyse et description du problème.....	62
3.1.2.2. Collecte des données et relevé des mesures.....	69
3.1.3. Deuxième étape du processus : de la modélisation à la validation.....	72
3.1.3.1. Modélisation.....	74
3.1.3.2. Programmation.....	81
3.1.3.3. Vérification.....	82
3.1.3.4. Validation.....	85
3.1.3.4.1. Les intervalles de confiance.....	88
3.1.3.5. Contrôle de la simulation.....	91
3.1.3.5.1. Compromis entre longueur de simulation et nombre d'échantillons.....	91
3.1.3.5.2. Détermination de la longueur des simulations (condition de terminaison).....	94
3.1.3.5.3. Calcul de "N", taille de l'échantillon.....	96
3.1.3.5.4. La période transitoire.....	97
3.1.3.5.5. Application : détermination de L (longueur de simulation) et de N (nombre de simulations).....	98
3.1.4. Synthèse du chapitre.....	103

3.2. CONSTRUCTION D'UNE CAMPAGNE DE SIMULATIONS.....	105
3.2.1. Pourquoi procéder par campagnes de simulation	105
3.2.1.1. Des questions multi-critères	105
3.2.1.2. Définition d'une "campagne"	107
3.2.2. Elaboration d'un plan de simulation	108
3.2.2.1. Les techniques existant pour la mise au point d'un plan.....	108
3.2.2.1.1. Plans d'expériences	109
3.2.2.1.2. Le test systématique partiel.....	111
3.2.2.2. La méthode retenue : le plan randomisé sur Test Partiel	111
3.2.2.2.1. Les facteurs du plan - Variation par groupe	112
3.2.2.2.2. Un plan "randomisé".....	115
3.2.2.2.3. Les indicateurs	115
3.2.3. Application : Génération Automatique de Plans de Simulations (GAPS) 117	
3.2.3.1. Description de GAPS	117
3.2.3.2. Test partiel : le vecteur PLAN.....	120
3.2.3.3. Plan Randomisé : taille de l'échantillon.....	121
3.2.4. Synthèse du chapitre.....	121
3.3. CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	122

4. TROISIEME PARTIE : L'ANALYSE DES DONNEES COMME METHODE D'ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LE COMPORTEMENT DES SYSTEMES DE PRODUCTION

123

4.1. L'ANALYSE DES DONNEES POUR LES SIMULATIONS : PROPOSITION DE METHODE.....	124
4.1.1. Les apports attendus de l'A.D.....	124
4.1.1.1. Principes de l'ACP (Analyse en Composantes Principales)..	128
4.1.1.2. Principes de la classification automatique.....	130
4.1.1.3. Les limites de l'A.D.....	132
4.1.2. Proposition de méthode.....	134
4.1.2.1. Introduction à la démarche	134
4.1.2.2. Apports de l'analyse de données à l'analyse de systèmes de production : état de l'art.....	135
4.1.2.2.1. Apports de l'ACP.....	137
4.1.2.2.2. Apports de la Classification	138
4.1.2.3. Une démarche d'exploitation des résultats de simulation	138
4.1.2.4. Résumé de la procédure	141
4.1.3. Synthèse du chapitre.....	142

4.2. ETAPES 1 ET 2 : PHASES PREPARATOIRES.....	143
4.2.1. Etape 1 : cadrer les expériences / déterminer les valeurs standard de contexte.....	143
4.2.1.1. Les standards du bloc "T".....	143
4.2.1.2. Les standards du bloc "O".....	150
4.2.1.3. Synthèse de la phase de cadrage des simulations.....	154
4.2.2. Etape 2 : Affinage des facteurs et des indicateurs.....	154
4.2.2.1. Affinage des indicateurs.....	154
4.2.2.2. Affinage des facteurs.....	163
4.2.2.3. Conclusion de la phase d'affinage.....	167
4.2.3. Synthèse du chapitre.....	167
4.3. ETAPE 3 : DESCRIPTION SYNTHETIQUE DU NUAGE PAR ACP.....	168
4.3.1. Présentation de la campagne de test.....	168
4.3.2. Description de l'ensemble des simulations par ACP.....	171
4.3.2.1. Mise en oeuvre.....	171
4.3.2.2. Exploitation.....	171
4.3.2.2.1. L'interprétation des axes.....	173
4.3.2.2.2. Les points isolés.....	182
4.3.2.3. Synthèse de la description du nuage.....	182
4.3.3. Hiérarchie des facteurs d'influence.....	184
4.3.4. Liens entre indicateurs.....	184
4.3.4.1. Les non-corrélations.....	185
4.3.4.2. Les corrélations positives.....	186
4.3.4.2.1. Corrélations positives triviales.....	186
4.3.4.2.2. Corrélations positives non triviales.....	189
4.3.4.3. Remarques sur le graphe.....	189
4.3.5. Synthèse du chapitre : conclusions sur l'ACP.....	191
4.4. ETAPES 4 ET 5 : RECHERCHE ET INTERPRETATION DE TYPES DE COMPORTEMENTS ET DE STRATEGIES.....	192
4.4.1. Etape 4 : Structuration du nuage - Typologie des comportements.....	195
4.4.1.1. Construction d'une partition sur l'ensemble des performances.....	195
4.4.1.1.1. Partition de référence.....	196
4.4.1.1.2. Stabilité de la partition.....	196
4.4.1.2. Interprétation des profils.....	199
4.4.1.2.1. Analyse de l'arbre de classification.....	199
4.4.1.2.2. Description des types de comportements.....	200
4.4.1.2.3. Comparaison des profils de comportement sur les facteurs principaux.....	206

4.4.2. Etape 5 : Caractérisation des classes (ou "stratégies").....	210
4.4.2.1. Puissance ségrégative des facteurs.....	212
4.4.2.2. Caractérisation de chacune des classes.....	214
4.4.2.3. Règle d'affectation d'un scénario à un comportement	219
4.4.2.4. Règle de passage d'un profil à l'autre.....	222
4.4.3. Synthèse du chapitre.....	224
4.5. BILAN DE L'UTILISATION DE L'ANALYSE DE DONNEES.....	226
5. QUATRIEME PARTIE : BILAN ET PROSPECTIVES	229
5.1. QUANT A L'ENRICHISSEMENT DU PROCESSUS DE SIMULATION	230
5.2. QUANT A LA CONSTRUCTION D'UN MODELE DE COMPORTEMENTS : UNE APPROCHE "APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE"	230
5.2.1. Principe de l'apprentissage a partir d'exemples.....	231
5.2.2. Application au cas des simulations.....	231
5.3. LES APPORTS DE NOTRE DEMARCHE A L'ANALYSE DES SYSTEMES DE PRODUCTION : LIMITATIONS DE MACSI.....	233
BIBLIOGRAPHIE	234

VOLUME 2

Annexe A	11
Annexe B	25
Annexe C	28
Annexe D.....	34
Annexe E	41
Annexe F	45
Annexe G	52
Annexe H	54
Annexe I	58
Annexe J	76

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Souplesse et/ou automatisation des systèmes de production
Figure 21.1	Décomposition fonctionnelle du système physique de production
Figure 21.2	Modèle conceptuel GRAI
Figure 21.3	Triangle d'évaluation des performances
Figure 21.4	Domaines de fonctionnement satisfaisant
Figure 22.1	Relations entre les événements, les activités et les processus
Figure 22.2	Les étapes d'une simulation
Figure 22.3	L'analyse du problème
Figure 22.4	Etape modélisation
Figure 31.1	Architecture de MACSI
Figure 31.2	Blocs élémentaires
Figure 31.3	MACSI : un modèle conceptuel des données
Figure 31.4	MACSI : un modèle conceptuel des traitements
Figure 31.5	Etape modélisation
Figure 31.6	Les objets du modèle
Figure 31.7	MACSI : les ressources "transport"
Figure 31.8	MACSI : les ressources "fabrication"
Figure 31.9	Architecture d'une simulation
Figure 31.10	Vérification du caractère des distributions de probabilité utilisées dans le modèle
Figure 31.11	Normalité des distributions - Test du Chi-Deux
Figure 31.12	Construction d'échantillons indépendants
Figure 31.13	Caractère cyclique des indicateurs de performance de MACSI
Figure 31.14	Compromis entre longueur de simulation et taille de l'échantillon
Figure 31.15	Troncature des données
Figure 31.16	Détermination de L
Figure 32.1	Etape Exploitation
Figure 32.2	Exemple d'un fichier LOT
Figure 32.3	Environnement complet de simulation

Figure 41.1	Tableau initial des données (RES)
Figure 41.2	Structure du fichier des résultats (RES)
Figure 41.3	Algorithme des nuées dynamiques
Figure 41.4	Arbre de classification
Figure 41.5	Construction d'un méta-modèle de MACSI
Figure 41.6	Démarche en 5 étapes pour exploiter les résultats de simulation
Figure 42.1	Cadrage des simulations - Détermination du contexte
Figure 42.2	Environnement - facteurs F3, T2, T3
Figure 42.3	Facteurs "T" - Plan factoriel des axes 1 et 2 - Projection des individus
Figure 42.4	Facteurs "T" - Plan factoriel des axes 3 et 4 - Projection des individus
Figure 42.5	Environnement - Facteurs "O"
Figure 42.6	Facteurs "O" - Plan factoriel des axes 1 et 2 - Projections des objets
Figure 42.7	Affinage des indicateurs
Figure 42.8	Affinage des indicateurs - Plan factoriel des axes 1 et 2
Figure 42.9	Affinage des facteurs
Figure 43.1	Description des simulations avec l'ACP
Figure 43.2	Plan factoriel des axes 1 et 2
Figure 43.3	Domaine de variation du facteur "Stockage"
Figure 43.4	Plan factoriel des axes 2 et 3
Figure 43.5	Plan factoriel des axes 3 et 4
Figure 43.6	Graphe des corrélations positives
Figure 44.1	Structuration des simulations
Figure 44.2	Partition de référence
Figure 44.3	Projection des centres de gravité des classes sur les axes principaux de l'ACP
Figure 44.4	Caractérisation de stratégies de pilotage
Figure 44.5	Puissance ségrégative des facteurs (p.s.)
Figure 44.6	Profils des configurations de stockage
Figure 44.7	Affectation d'un scénario à un comportement
Figure 44.8	Coefficients d'affectation (* 100)
Figure 44.9	Exemples d'affectation de scénarios aux comportements à l'aide des coefficients d'affectation

ANNEXE A

Figure 1
 Figure 2
 Figure 3
 Figure 4
 Figure 5
 Figure 6
 Figure 7
 Figure 8
 Figure 9
 Figure 10
 Figure 11
 Figure 12
 Figure 13
 Figure 14
 Figure 15
 Figure 16
 Figure 17
 Figure 18
 Figure 19
 Figure 20
 Figure 21
 Figure 22
 Figure 23
 Figure 24
 Figure 25
 Figure 26
 Figure 27
 Figure 28
 Figure 29
 Figure 30
 Figure 31
 Figure 32
 Figure 33
 Figure 34
 Figure 35
 Figure 36
 Figure 37
 Figure 38
 Figure 39
 Figure 40
 Figure 41
 Figure 42
 Figure 43
 Figure 44
 Figure 45
 Figure 46
 Figure 47
 Figure 48
 Figure 49
 Figure 50
 Figure 51
 Figure 52
 Figure 53
 Figure 54
 Figure 55
 Figure 56
 Figure 57
 Figure 58
 Figure 59
 Figure 60
 Figure 61
 Figure 62
 Figure 63
 Figure 64
 Figure 65
 Figure 66
 Figure 67
 Figure 68
 Figure 69
 Figure 70
 Figure 71
 Figure 72
 Figure 73
 Figure 74
 Figure 75
 Figure 76
 Figure 77
 Figure 78
 Figure 79
 Figure 80
 Figure 81
 Figure 82
 Figure 83
 Figure 84
 Figure 85
 Figure 86
 Figure 87
 Figure 88
 Figure 89
 Figure 90
 Figure 91
 Figure 92
 Figure 93
 Figure 94
 Figure 95
 Figure 96
 Figure 97
 Figure 98
 Figure 99
 Figure 100

Validation - Intervalles de confiance

1. Le problème de l'aléatoire

2. Les intervalles de confiance

3. L'estimation de la variance

4. La question de l'autocorrélation

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This ensures transparency and allows for easy verification of the data.

In the second section, the author details the various methods used to collect and analyze the data. This includes both manual and automated processes. The goal is to ensure that the data is as accurate and comprehensive as possible.

The third part of the document focuses on the results of the analysis. It shows that there is a clear trend in the data, which is consistent with the initial hypothesis. This finding is significant and warrants further investigation.

Finally, the document concludes with a summary of the findings and a list of recommendations. It suggests that the current methods are effective but could be improved in certain areas. The author also notes that the data is still being analyzed and that a final report will be provided in the near future.

1. Le problème de l'aléatoire

[Pegden 86], [Schriber 81], [Pritsker 86], [Surle 84]

Les modèles manipulés pour la simulation séquentielle utilisent des générateurs de nombres aléatoires à partir du moment où leur comportement n'est pas complètement déterministe, c'est-à-dire dans la majorité des cas.

Par conséquent, les résultats fournis par les simulations ne sont que des réalisations de variables aléatoires ; ils doivent donc, avant d'être utilisés, faire l'objet d'un traitement statistique. En effet, la variabilité, l'incertitude, introduites dans le modèle par le biais des nombres aléatoires nécessitent la construction d'intervalles de confiance, de tests d'hypothèses quant aux valeurs des résultats.

Une seule simulation ne suffit pas pour caractériser le système.

Le problème consiste à produire des inférences à partir de simulations de processus aléatoires dont on ne connaît pas les paramètres (autrement, on aurait utilisé les méthodes analytiques). Il va donc s'agir de déterminer la similarité des résultats de la simulation avec ceux d'un processus connu ; pour cela, il faut caractériser le phénomène observé et calculer : moyenne, écart-type, médianes, quantiles,...

On cherchera, par exemple, à construire un intervalle de confiance afin d'encadrer au plus près et avec le plus de certitude possible les véritables moyennes : longueur des files, taux d'utilisation, durées d'attente/de passage,... avant d'utiliser ces valeurs.

2. Les intervalles de confiance

Principe :

Soit un échantillon statistique x_1, \dots, x_n , de taille n . On suppose les x_i indépendantes et identiquement distribuées selon une loi normale de moyenne " m " et d'écart-type " s ".

Soit la variable $X = 1/n * \sum x_i$.

D'après le théorème Central Limite, si n est suffisamment grand, la variable X est asymptotiquement normalement distribuée,

avec

$$E(X) = m$$

$$S_X^2 = s^2/n$$

X est un estimateur de la moyenne. Soit m une estimation de la moyenne.

Construire un intervalle de confiance (IC), autour de la moyenne théorique m , avec un degré d'erreur a , c'est trouver

tel que :

$$P(-h < X - m < h) = 1 - a$$

h est la demi-largeur de l'intervalle de confiance ;

m est la moyenne théorique de l'échantillon .

Or, on sait que la variable centrée réduite :

$$(X - m) / s_X, \text{ avec } s_X = \text{écart-type de } X$$

suit une loi normale, de moyenne 0 et d'écart-type 1. On ne connaît généralement pas S_X , alors on utilise la relation suivante :

$$S_X = s/n^{1/2}, \text{ avec "s" = écart-type de l'échantillon.}$$

Comme on ne connaît pas non plus "s", on utilise un estimateur :

$$S = \{(\sum(x_i - m)^2)/(n-1)\}^{1/2}$$

Soit s une estimation de S, et m une estimation de la moyenne.

On sait que $(X-m) / (s/n^{1/2})$ suit une loi de Student à n-1 d.l. notée T_{n-1} .

Alors, on a $P(|m-m| < h) = 1-a$
 et $P(|m-m| / (s/n^{1/2}) < t_{n-1,a/2}) = 1-a,$

avec $t_{n-1,a/2}$, la valeur trouvée dans la table de Student pour un degré de confiance de $(1-a/2)$.

$$\Leftrightarrow P(|m-m| < t_{n-1,a/2} * (s/n^{1/2})) = 1-a$$

On obtient donc $h = t_{n-1,a/2} * (s/n^{1/2})$, et l'IC suivant, avec un degré de confiance de a :

$$m \text{ se trouve dans } [m - t_{n-1,a/2} * (s/n^{1/2}) ; m + t_{n-1,a/2} * (s/n^{1/2})]$$

En résumé

- on a besoin, pour construire un estimateur sans biais de la moyenne(X), d'un estimateur sans biais de l'écart-type(S) de l'échantillon ;
- la construction d'intervalles de confiance est fondée sur trois hypothèses fortes : l'indépendance des x_i , leur distribution identique (même moyenne, même variance), leur normalité.

3. L'estimation de la variance

Le problème de l'estimation de la variance du phénomène est central car c'est cette dernière qui permet d'affiner l'information apportée par la moyenne.

Il existe plusieurs techniques pour estimer la variance :

- * les statistiques "classiques" ;
- * l'analyse des séries chronologiques ("time series") ;
- * l'analyse spectrale.

Le principe de base du premier groupe de méthodes consiste à élaborer des échantillons indépendants et identiquement distribués selon une loi normale afin d'utiliser les méthodes classiques de la statistique et de construire des intervalles de confiance comme ci-dessus. Les deux autres techniques reposent sur l'analyse détaillée d'un seul run et ne font pas d'hypothèse d'indépendance.

3.1. Méthodes reposant sur l'indépendance des échantillons

Il s'agit de construire des échantillons indépendants et identiquement distribués ; la normalité est induite par le théorème Central Limite quand la taille de l'échantillon est assez élevée ; l'égalité des moyennes et des variances est garantie du fait que les résultats sont obtenus avec le même modèle de simulation, aux générateurs aléatoires près. Il ne reste donc plus qu'à s'assurer de l'indépendance des X_i .

Pour cela trois méthodes sont envisageables :

- les "replications" de simulation ;
- le découpage en blocs des simulations ;
- les points de régénération.

* replications indépendantes

Les deux paramètres à déterminer sont la **durée de simulation** et le **nombre de runs**.

Chaque run engendre un échantillon de valeurs indépendant des autres.

n runs => n valeurs pour X : $X_i, i=1,n$;

mais n runs => n phases transitoires .

Les X_i sont déjà, généralement, issues d'un calcul sur les valeurs prises au cours d'un run par une variable aléatoire (moyennes,écart-types) ; d'après le théorème central limit, si ces valeurs sont assez nombreuses, alors on peut faire l'hypothèse que les X_i suivent une loi normale.

Par contre, si les X_i sont des valeurs uniques - Min ou Max de variables d'état - alors l'hypothèse de normalité est remise en question. En fait, d'après [Pegden 86], à partir de 20 runs la violation de l'hypothèse n'affecte pas trop les résultats.

On utilise les estimateurs suivants :

$$\bar{X} = (\sum X_i)/n$$

$$\text{Var}X = (\sum(\bar{X} - X_i)^2)/(n-1)$$

$$\text{Var}\bar{X} = \text{Var}X/n$$

* découpage en blocs

Les paramètres sont le nombre de blocs et la taille des blocs.

On sépare une longue et unique simulation en blocs de même taille, puis on cherche un découpage tel que l'autocorrélation entre les blocs soit minimale (on augmente progressivement la taille des blocs). La "profondeur" de l'autocorrélation dépend de l'"ordre" du processus, c'est-à-dire du nombre d'étapes antérieures qui ont une influence sur le comportement actuel. On admet généralement qu'à partir de 20 blocs, l'intervalle de confiance est satisfaisant.

Reste à déterminer la taille des blocs...

Il existe un test permettant de vérifier l'indépendance des blocs en fonction de la taille choisie : h.

Le test statistique est construit à partir du coefficient de corrélation, $\rho(k)$, entre les moyennes des blocs et suit une loi normale $N(0,1)$. On peut se référer à [Pegden 86b] pour plus de détails. Dans la pratique, on prend pour "h" la valeur maximale telle que $\rho(k)$ ne soit pas nul. Pour cela, on s'aide des corrélogrammes.

On utilise ensuite les estimateurs classiques de la moyenne et de l'écart-type de l'échantillon (voir plus haut).

* points de régénération

Un processus est "régénératif" s'il existe des dates entre lesquelles les portions de simulation sont indépendantes et identiquement distribuées. Le système repasse périodiquement par un certain état et l'évolution entre deux points de régénération est appelée "cycle".

Le système parvient à un "état de régénération" lorsque le passé n'a plus d'influence. On considère alors les portions de simulation comprises entre les points de régénération comme des échantillons indépendants, puis on utilise les estimateurs classiques.

L'inconvénient de cette méthode réside dans la difficulté de la détermination des points.

3.2. Méthodes sans hypothèse forte d'indépendance

* analyse des séries chronologiques

Ces méthodes sont basées sur l'analyse d'un seul run.

Les observations sont considérées comme potentiellement dépendantes des précédentes ; on cherche à ajuster aux données un modèle paramétrique :

- AR (autorégressif),
- ARMA (" à moyenne mobile),
- ARIMA (" " " intégrée).

1ère étape : identifier l'ordre du modèle ;

2ème étape : estimer, à partir des observations, les paramètres du modèle ainsi que la variabilité de l'estimateur de la moyenne du processus.

*** méthode spectrale [Surle 84]**

Cette méthode exploite la corrélation structurelle des observations mais ne nécessite pas de poser l'hypothèse d'un modèle paramétrique spécifique. On montre que le problème de l'intervalle de confiance se ramène à celui de l'estimation de la densité spectrale du processus à la fréquence zéro.

Cette méthode présente l'avantage de ne pas faire d'hypothèse forte sur les données (indépendance) et de prendre en compte la covariance. Elle nécessite l'étude d'un seul run.

On se place sous l'hypothèse d'un processus à covariance stationnaire,

$$\Leftrightarrow C(k) = E[(X(n)-m)(X(n+k)-m)] = C(-k)$$

à des instants différents, la variation enregistrée sur une variable au cours d'un même écart de temps est invariante.

Relations entre densité spectrale et covariance :

$$p(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(k) \cos(2kf * \Pi) dk$$

$$C(k) = \int_{-\infty}^{\infty} p(f) \cos(2kf * \Pi) df$$

Alors l'intervalle de confiance est donné par la relation suivante :

$(m-M) / [(P(0)/n)^{1/2}]$, qui suit une loi de Student à C degrés de liberté,

M = estimateur sans biais de la moyenne ;

P = estimateur de la densité spectrale ;

C = nombre de cycles.

Tout est basé sur l'estimation de la densité spectrale à la fréquence zéro ; on peut consulter la thèse [Surle 84] pour avoir des détails sur la procédure.

4. La question de l'autocorrélation

Les modes du premier groupe supposent l'indépendance des X_i ; or on a souvent affaire à des observations autocorrélées. Il est possible, d'une part, d'en mesurer l'effet produit sur les résultats précédents ; d'autre part, il existe des méthodes qui prennent en compte cette structuration (généralement temporelle) des données.

* Effets de l'autocorrélation sur les estimateurs habituels

[Banks & Carson 84]

On se place sous l'hypothèse d'un processus à covariance stationnaire.

$$\Leftrightarrow C(k) = E[(X(n)-m)(X(n+k)-m)] = C(-k)$$

La variation enregistrée sur une variable au cours du temps dépend uniquement de la largeur de l'intervalle, et non de la date à laquelle on effectue la mesure.

Remarque : des valeurs mesurées en régime permanent ont des chances d'avoir une covariance stationnaire, mais pas en régime transitoire.

$C(k) = \text{Cov}(Y_i, Y_{i+k})$, covariance d'ordre k

$C(0) = \text{Var } Y_i$

alors

$\rho(k) = C(k)/C(0)$ est le coefficient d'autocorrélation d'ordre k.

Soit m^* la moyenne estimée, alors on peut calculer la variance de l'estimateur m^* en tenant compte de l'autocorrélation :

$$\text{Var}(m^*) = [C(0)/N] * [1 + 2 * \sum_{k=1}^{N-1} (1-k/N) * \rho(k)]$$

L'estimateur habituel, $S^2(m^*) = S^2/n$ est biaisé.

Conséquences :

1) Si les corrélations sont positives, alors on accorde à l'estimateur une trop grande confiance. La variance réelle est plus forte que la variance calculée !...

2) Si elles sont négatives, alors la précision de l'estimateur est sous-estimée par le test.

Or les autocorrélations positives ne sont pas rares !... Il convient donc d'être prudent.

Fishman utilise un estimateur de la moyenne qui tient compte de l'autocorrélation ; il est construit à partir de l'estimation des covariances aux différents ordres du processus. Il est utile de disposer d'un test d'autocorrélation : celui de Banks et Carson, par exemple.

* Test d'autocorrélation (Jerry Banks & John S. Carson, in "Discrete event system simulation", 1984)

Soit une séquence de valeurs : R_1, R_2, \dots, R_n . On se pose la question de leur indépendance. On fait alors un test de corrélation entre tous les m nombres, à partir du i ème :

$$R_i, R_{i+m}, R_{i+2m}, \dots, R_{i+(M+1)m},$$

avec M le plus grand entier tel que $i+(M+1)m < \text{ou} = n$.

Soit ρ_{im} l'autocorrélation calculée sur cette séquence ;

$$H_0 : \rho_{im} = 0$$

$$H_1 : \rho_{im} < 0 ;$$

Soit un estimateur de ρ_{im} , $\hat{\rho}_{im}$ (normal si M est assez grand), alors

$$Z_0 = \hat{\rho}_{im} / (\text{écart-type } \hat{\rho}_{im}) \text{ tend, en loi, vers } N(0,1).$$

Donc on ne rejettera pas H_0 tant que $-Z_{\alpha/2} < Z_0 < Z_{\alpha/2}$, α étant le degré de confiance.

Pour $\hat{\rho}_{im}$, Banks & Carson proposent d'utiliser :

$$\hat{\rho}_{im} = [(\sum R_{i+km} * R_{i+(k+1)m}) / (M+1)] - 0.25$$

$$\hat{\rho}_{im} = (13 * M + 7)^{1/2} / 12 * (M+1).$$

Ces formules ont été données par Schmidt & Taylor (1970), dans "Simulation and analysis of Industrial Systems", Irwin, Homewood, Ill.

Attention : ce test fournit de mauvais résultats si M est trop petit et/ou les R_i proches de zéro, car alors $\hat{\rho}_{im}$ est proche de -0.25 et Z de -1.95, ce qui n'est pas suffisant pour rejeter H_0 .

Références bibliographiques

Pegden D.(86)

Introduction to SIMAN - 1986.

Schriber T.S. and Andrew R.W.(81)

A conceptual framework for research in the analysis of simulation output - in
Communication of the ACM - Vol24 N°4 - april 81.

Pritsker A.A.B.(86)

Introduction to simulation and SLAM II - 3ème édition - 1986.

Fishman (73)

Concepts and methods in discret event digital simulation - 1973.

Surle Marielle (84)

Durée de simulation de processus stationnaires du 2nd ordre - Orsay - Thèse - 1984.

Banks J. & Carson J.S.(84)

Discrete-event system simulation - 1984.

Kleijnen J.P.C. (74)

Statistical techniques in simulation - Part I - 1974 - Marcel Dekker - N.Y.

ANNEXE B

Blocs Elémentaires

Postes de travail

- **machine** : effectue des opérations de transformation, montage (composant sur pièce maîtresse, et non assemblage), robot-manutention, lavage, contrôle.

- **palettisation** : associe une palette vide et un certain nombre de pièces de même type, compatibles avec la palette.

- **cellule machines différentes** : regroupe des machines spécialisées (peu flexibles), pouvant réaliser un ensemble E d'opérations distinctes.
Ce type de cellule est dédié aux familles de pièces dont une partie de la gamme est comprise dans E.
Alimentation par un stock en vrac.

- **cellule machines identiques** : regroupe des machines spécialisées, identiques. Ce type de cellule est dédié aux opérations longues, susceptibles d'engendrer un goulot d'étranglement pour l'atelier. Alimentation par un stock en vrac.

Stockage

- **stock en vrac** : stockage de palettes pour lesquelles la séquence des sorties peut être différente de celle des entrées. Un stock en vrac est caractérisé par une capacité, un délai d'obtention des palettes et une règle de gestion.
Rq : un stock dont la règle de gestion est fixée à FIFO sera représenté comme une section de réseau de transport.

Transport

- **section de réseau (tronçon)** : portion de circuit sur laquelle les objets sont acheminés en ordre FIFO. La section est caractérisée par sa capacité.

- **aiguillage - canton** (entrées/sorties de machines, aiguillages divergents, convergents, en X) :

points de décision concernant le routage. La décision porte sur le passage du chariot d'une branche incidente de l'aiguillage à une branche de sortie ou bien sur son arrêt éventuel sur le réseau. La capacité d'un canton est de une place. Il est en outre caractérisé par un délai de prise de décision constant et une règle de routage.

ANNEXE C

Plans d'expériences

1 - Méthode de construction de plans d'expériences

Soient X_1, X_2, \dots, X_n les facteurs contrôlés de l'expérience, et Y la variable réponse. Il s'agit d'expliquer Y à l'aide de (X_1, X_2, \dots, X_n) , dans le cadre d'un certain modèle.

Plaçons-nous dans le cas classique d'une **modélisation linéaire**. On distingue alors les effets principaux des facteurs (effet de X_1 , par exemple) et les effets d'interactions de k facteurs combinés ($k \leq n$).

Modèle sans interactions :

$$Y = a.X_1 + b.X_2 + \dots + n.X_n$$

Modèle avec interactions du premier ordre :

$$Y = a.X_1 + b.X_2 + \dots + n.X_n + \\ (ab).X_1X_2 + \dots + (mn).X_mX_n$$

Les coefficients $a, b, \dots, n, ab, \dots, mn$ sont les **effets** des facteurs. Ce sont ces coefficients que l'on cherche à calculer à partir des expériences.

* Type de plan

Il existe trois grandes catégories d'approches pour la conception des expériences :

- **1 facteur à la fois ;**

On fait varier le niveau de chaque facteur individuellement, les autres paramètres restant fixés.

Cette approche présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte les effets d'interaction des facteurs.

- **plan factoriel complet ;**

Cette approche devient rapidement impraticable lorsque le nombre de facteurs et de niveaux est important ; c'est le problème de l'explosion combinatoire.

ex : pour 4 facteurs, 5 niveaux, le plan factoriel complet comprend 625 expériences !.... Or chaque expérience, pour répondre à des impératifs de validité doit être répétée un certain nombre de fois (aléarisation).

- **plan factoriel incomplet - plans fractionnaires ;**

Cette dernière approche permet l'investigation de plusieurs facteurs avec un nombre réduit de simulations. On peut citer les plans de type Box-Behnken, les carrés latins, les plans en blocs, les plans randomisés...et les tables orthogonales de Taguchi dont on trouvera le détail dans [Vigier 88].

Calcul des effets des facteurs à partir d'un plan factoriel complet (exemple tiré de [Vigier 88])

Soient 2 facteurs, A et B, avec chacun 2 niveaux : A_1, A_2, B_1, B_2 .

Le plan factoriel complet comprend donc 4 essais.

Dans la description des expériences, le niveau 1 est noté "-", le niveau 2 est noté "+".

A chaque essai, on relève une valeur de Y, la réponse du système ; on obtient donc Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 ,

ce qui est résumé dans le tableau ci-dessous (S signifie "Somme") :

		I	A	B	AB	Y
(1)	+	-	-	+	Y_1	
a	+	+	-	-	Y_2	
b	+	-	+	-	Y_3	
ab	+	+	+	+	Y_4	
S						

Le modèle est le suivant : $\sim Y = I + [a_1 \ a_2]A + [b_1 \ b_2]B$

I est la moyenne des résultats sur l'ensemble des essais ;

$[a_1 \ a_2]$ est l'effet du facteur A sur I ;

$[b_1 \ b_2]$ est l'effet du facteur B sur I.

Le calcul des coefficients est très simple :

$a_1 = \Sigma(\text{réponses du système pour "A=a}_1\text{") / nb de cas}$

$a_2 = \Sigma(\text{réponses du système pour "A=a}_2\text{") / nb de cas}$

idem pour b_1 et b_2 .

ex : soient les résultats suivants

		I	A	B	AB	Y
(1)	+	+	-	-	+	4
a	+	+	+	-	-	4.1
b	+	+	-	+	-	4.9
ab	+	+	+	+	+	4.3
S		17.3	-0.5	1.1	-0.7	
S/4		4.32	-.12	.27	-.17	

I vaut 4.32. L'effet total de A est de -0.5 (- 4 + 4.1 - 4.9 + 4.3).

Calcul des coefficients du modèle :

a_2 , l'effet de $(A=a_2)$ vaut -0.12 , cad $(4.1 + 4.3)/2 - I$;

a_1 l'effet de $(A=a_1)$ vaut $+0.12$, cad $(4 + 4.9)/2 - I$;

idem pour b_1, b_2 .

$(ab)_{11}$, l'effet de l'interaction $(A=a_1 \text{ \& } B=b_1)$ vaut :

$$(ab)_{11} = Y_1 - I - a_1 - b_1,$$

$$(ab)_{11} = 4 - 4.32 - 0.12 + 0.27 = -0.17$$

idem pour $(ab)_{12}, (ab)_{21}, (ab)_{22}$.

Le modèle s'écrit alors :

$$\tilde{Y} = 4.32 + [0.12 \ -0.12] * A + [-0.27 \ 0.27] * B + [-0.17 \ 0.17] * AB$$

L'exemple décrit ici est de petite taille. Lorsque les facteurs et les niveaux sont plus nombreux, on ne peut plus faire de plans complets.

2 - Méthode Taguchi

La méthode Taguchi propose une analyse des expériences "sans se soucier des relations entre les causes" (donc sans modèle mathématique), "mais uniquement en analysant leurs effets" sur les fonctions de mesure [Constant 89].

A cet effet, G. Taguchi a mis au point un outil pour simplifier la planification des essais : les tables orthogonales standards et leurs graphes linéaires associés, qui donnent naissance à des portions de plans factoriels. Il suffit d'affecter un effet à chaque colonne de la table. Par contre, il faut faire l'hypothèse que la

plupart des interactions d'ordre 2 peuvent être considérées comme négligeables. On trouvera des explications complètes dans [Vigier 88] ou [Constant 89].

Taguchi préconise également le calcul et l'analyse d'une variable mesurant le ratio du signal sur le bruit, afin de maîtriser la robustesse du système.

Références bibliographiques

COHEN V. (1989)

Introduction aux plans d'expériences. *Revue de Statistique Appliquée*, 1989, Vol XXXVII, n°2, pp17,46.

CONSTANT C. (1989)

La méthodologie Taguchi. Introduction à la recherche technologique. Gestion fonctionnelle de la qualité ou gestion "off-line". *Revue de Statistique Appliquée*, 1989, Vol XXXVII, n°2, pp47,78.

DELANEY W. et VACCARIE E. (1989)

Dynamic Models and Discrete Event Simulation. New-York : Marcel Dekker, 1989. The Experimental Aspect of Simulation, pp351,394.

KLEIJNEN J.P.C. (1987)

Statistical tools for simulation practitioners. New-York : Marcel Dekker, 1987. 429p.

VIGIER M.G. (1988)

Pratique des plans d'expériences - Méthodologie Taguchi. Paris : Les Editions d'Organisation, 1988. 155p.

ANNEXE D

Données Techniques de l'atelier

Les machines

n° machine	libellé du poste de travail
1	palettisation
2	première machine de la cellule 1
3	deuxième machine de la cellule 1
4	première machine de la cellule 2
8	deuxième machine de la cellule 2
9	troisième machine de la cellule 2
5	usinage
6	montage

Les gammes

Les durées opératoires sont exprimées en secondes par pièce.

n° gamme	n° opération	n° machine	durée opératoire
G1	1	1	30
	2	3	60
	3	6	40

n° gamme	n°opération	n° machine	durée opératoire
G2	1	1	30
	2	2	50
	3	3	70
	4	6	30
G3	1	1	30
	2	3	20
	3	2	40
	4	6	40
G4	1	1	30
	2	2	40
	3	3	50
	4	2	10
	5	6	30
G5	1	1	30
	2	3	20
	3	2	40
	4	3	30
	5	6	40
G6	1	1	30
	2	3	20
	3	2	40

n° gamme	n°opération	n° machine	durée opératoire
G7	1	1	30
	2	2	20
	3	3	40
	4	5	40
	5	6	40
G9	1	1	30
	2	2	60
	3	3	40
	4	4	160
	5	6	30
G10	1	1	30
	2	3	50
	3	2	10
	4	4	140
	5	5	30
	6	6	40
G12	1	1	30
	2	3	30
	3	2	30
	4	5	20
	5	6	30

n° gamme	n°opération	n° machine	durée opératoire
G13	1	1	30
	2	2	10
	3	3	10
	4	4	180
	5	5	20
	6	6	40
G14	1	1	30
	2	3	10
	3	2	20
	4	4	130
	5	5	30
	6	6	30
G15	1	1	30
	2	2	20
	3	3	10
	4	5	50
	5	4	140
	6	6	40
G16	1	1	30
	2	3	40
	3	2	20
	4	5	30
	5	4	120
	6	6	30

n° gamme	n°opération	n° machine	durée opératoire
G17	1	1	30
	2	4	130
	3	2	20
	4	3	30
	5	6	40
G18	1	1	30
	2	4	120
	3	5	10
	4	6	20
G20	1	1	30
	2	5	40
	3	2	20
	4	3	30
	5	5	40
	6	6	40
G21	1	1	30
	2	5	40
	3	6	30

n° gamme	n°opération	n° machine	durée opératoire
G22	1	1	30
	2	5	40
	3	4	190
	4	6	40
G24	1	1	30
	2	4	180
	3	5	30
	4	3	20
	5	2	50
	6	6	40
G25	1	1	30
	2	4	90
	3	6	30

ANNEXE E

**Performances du système : 248 variables observées
(premières simulations)**

%GT	:	taux de production global ;
%G1...%G25	:	taux de production par Gamme ;
LY1...LY25	:	durée de cycle moyenne d'un Lot complet (par gamme) ;
LS1...LS25	:	écart-type de la durée de cycle par Lot ;
PY1...PY25	:	durée de cycle moyenne d'une Palette (par gamme) ;
PS1...PS25	:	écart-type de la durée de cycle par Palette ;
%M1...%M11	:	taux d'occupation moyen des Machines et robots ;
SM1...SM11	:	écart-type sur les taux d'occupation des Machines et robots ;
%CO	:	taux d'utilisation moyen de l'ensemble des Chariots ;
%C1...%C8	:	taux d'utilisation moyen de chaque Chariot ;
ECY	:	En-Cours moyen ;
ECX	:	En-Cours maximal ;
ECS	:	écart-type de l'En-Cours moyen ;
a1Y, a2Y, a4Y a5Y, a6Y	:	niveau moyen des stocks amont palettisation, cellule 1, cellule 2, usinage et montage ;
a1X, a2X, a4X a5X, a6X	:	niveau maximal des stocks amont ;
a1S, a2S, a4S a5S, a6S	:	écart-type sur le niveau des stocks amont ;
p1Y, p2Y, p4Y p5Y, p6Y	:	niveau moyen des stocks aval (post) palettisation, cellule 1, cellule 2, usinage et montage ;

p1X, p2X, p4X		
p5X, p6X	:	niveau maximal des stocks aval ;
p1S, p2S, p4S		
p5S, p6S	:	écart-type sur le niveau des stocks aval ;
TY1, TY2, TY4		
TY5, TY6, TY8	:	durée moyenne d'attente en amonT des postes palettisation, cellule 1, cellule 2, usinage, montage, sortie ;
TS1, TS2, TS4		
TS5, TS6, TS8	:	écart-type sur les durées d'attente amonT ;
TAY, TBY	:	durée moyenne d'attente devant robot1 et robot2 ;
TAS, TBS	:	écart-type sur les durées d'attente robots ;
VY1, VY2, VY4		
VY5, VY6	:	durée moyenne d'attente en aVal des postes palettisation, cellule 1, cellule 2, usinage, montage, sortie ;
VS1, VS2, VS4		
VS5, VS6	:	écart-type sur les durées d'attente aVal ;
S1Y...S16Y	:	taux d'utilisation moyen des tronçons (Sections de transport) ;
S1S...S16S	:	écart-type sur le taux d'utilisation des tronçons .

Mode de calcul des observations

Taux de production	=	(nombre de pièces sorties pendant la période) / (nombre de pièces entrées pendant la période).
Durée de cycle	=	date de sortie de l'atelier - date d'entrée dans l'atelier (amont palettisation).
Taux d'occupation	=	(nombre d'unités de ressource occupées * durée de l'occupation) / durée de la période de simulation.
Durée d'attente en stock	=	(date de sortie de stock - date d'entrée en stock) ; cette quantité est enregistrée par stock, pour toute palette y assant.

ANNEXE F



Fichiers Paramètres de référence

Une configuration d'atelier est entièrement définie par un ensemble de dix facteurs. Chacun des facteurs est susceptible de varier à l'intérieur d'un intervalle de valeurs.

Les paramètres proposés dans les fichiers qui suivent concernent un type d'atelier dédié à la fabrication de gammes comprises dans l'ensemble (G5, G7, G20, G21) ; elles sont caractérisées par le fait qu'elles ne sollicitent pas les machines de la cellule 2.

Type.dat : Fichier des Types d'Atelier (T1)

C'est un inventaire des types d'ateliers envisageables. Chaque enregistrement comporte un code de dénomination suivi de 25 positions à "1" ou bien à "0" selon que la gamme correspondante entre ou non dans la composition du type.

n° gamme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
label	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25					
K	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0					
L	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0					
N	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0					

Toutes les gammes passent sur les postes "palettisation" et "montage" ; elles se distinguent par les autres opérations.

"K" comprend G5, G7, G20 et G21 : l'ensemble des quatre gammes passe sur cellule 1 et usinage.

"L" comprend G5 : une seule gamme, monoposte, qui utilise uniquement la cellule 1.

"M" comprend G21 : une seule gamme, monoposte, qui utilise uniquement l'usinage.

"N" comprend G7 et G20 : deux gammes qui passent chacune sur la cellule 1 et sur l'usinage.

Ratio.dat : Fichier des Ratios de Fabrication (T2)

Liste des "équilibrages" de production : répartition du volume global entre les gammes du "type" défini dans T1.

nom	n°d'ordre dans le "type"			
	1ère	2e	3e	4e
1	100			
2	50	50		
3	20	80		
4	80	20		
5	25	25	25	25
6	40	20	20	20
7	20	40	20	20
8	20	20	40	20
9	20	20	20	40

"1" est la répartition pour les "type de production -T1" à 1 gamme.

"2","3","4" sont des répartitions possibles pour T1 à 2 gammes.

"5","6","7","8","9" concernent les T1 à 4 gammes.

Signification : une répartition "3" s'applique à un type d'atelier comprenant deux gammes. La première gamme de T1 représente 20% du volume de production, la deuxième 80%.

Charg.dat : Fichier des Niveaux de Charge de l'Atelier (T3)

Le niveau de charge de l'atelier est celui de la machine la plus chargée. Il est calculé à partir des facteurs précédents et des données du fichier GAMME.

code valeur

3 60

5 70

7 80

9 90

charge = "3" correspond à une charge de 60%, sur la machine la plus chargée ;

charge = "5" " " 70% " " "

charge = "7" " " 80% " " "

charge = "9" " " 90% " " "

Ordo.dat : Fichier des Ordonnements (O1)

C'est la séquence de lancement des gammes définies dans le facteur T1 ; elle sert à l'élaboration d'un fichier ordonné des lancements : le fichier LOT. Si la séquence fait référence à une gamme qui n'existe pas dans T1 son tour est simplement "sauté".

code 1^{ère} 2^e 3^e 4^e gamme

W 5 21 20 7

X 21 5 20 7

Y 7 20 21 5

Z 20 7 21 5

avec "W", on lance d'abord les gammes "monopostes", c'est-à-dire celles qui ne passent que sur la cellule 1 ou que sur le poste d'usinage. On place en tête celle qui utilise la cellule 1.

avec "X", même chose mais on place en tête la gamme qui commence sur le poste d'usinage.

avec "Y", on lance d'abord les gammes "multipostes" en tête.

avec "Z", les gammes sont lancées par ordre de durée de transport décroissante.

Taille.dat : Fichier des tailles de lots (O2)

code valeur

Z 50

Y 100

X 150

V 16

T 80

S 160

Avec "Z" on lance des lots de 50 pièces ;

Avec "Y" de 100 pièces ;

Avec "X" de 150 pièces ;

Avec "V" de 16 pièces ;

Avec "T" de 80 pièces ;

Avec "S" de 160 pièces.

Cadence.dat : Fichier des cadences de lancement (O3)

code coef

1	1
2	2
3	3

A partir du volume de production et de la taille des lots, on calcule le nombre de lots à lancer sur la période de fabrication ainsi que l'intervalle de temps correspondant à des entrées dans l'atelier uniformément réparties au cours du temps. Cet intervalle est la cadence-standard : C_0 .

Cadence = "1" signifie que l'on utilise C_0 , la cadence-standard calculée elle-même ;

Cadence = "2" est 2 fois plus rapide que C_0 ;

Cadence = "3" est 3 fois plus rapide que C_0 .

En passant de la cadence "1" à la cadence "2", puis "3", on procède à une accélération des lancements.

Rout.dat : Fichier des routage chariots (F2)

Le routage est caractérisé par la vitesse des cfg.

code libellé du routage

1	routage n°1
2	routage n°2
3	routage n°3
4	routage n°4

routage = "1" => vitesse = 60 m/min

routage = "2" => vitesse = 30 m/min

routage = "3" => vitesse = 15 m/min

routage = "4" => vitesse = 10 m/min

Stoc.dat : Fichier des capacités de stockage (F3)

Il s'agit de la liste des combinaisons proposées entre les capacités des stocks de l'atelier.

code	st1	st2	st3	st4	st5	st6	st7
A	50	50	20	10	10	10	10
B	10	50	20	10	10	10	10
D	50	50	5	10	10	10	10
E	10	50	5	10	10	10	10
F	50	50	20	10	10	2	2
G	10	50	5	2	2	10	10
H	50	50	20	2	2	2	2
I	10	50	5	2	2	2	2
J	20	50	10	5	5	5	5

st1	:	stock de la cellule 1 ;
st2	:	stock de la cellule 2 ;
st3	:	stock aval du poste "palettisation" ;
st4	:	stock amont du poste "usinage" ;
st5	:	stock amont du poste "montage" ;
st6	:	stock aval du poste "usinage" ;
st7	:	stock aval du poste "montage".

remarque : on ne s'intéresse pas à st2, stock de la cellule 2, car il n'est pas concerné par les simulations en cours. Son dimensionnement n'a donc aucune influence sur les résultats.

stoc = "A"	:	capacités fortes sur tous les stocks ;
stoc = "B"	:	idem , sauf sur la cellule 1 ;
stoc = "D"	:	idem , sauf en aval du poste "palettisation" ;
stoc = "E"	:	faibles capacités sur cellule 1 et aval palettisation, fortes sur le reste ;
stoc = "F"	:	fortes capacités partout, sauf en aval usinage et montage ;
stoc = "G"	:	faibles capacités partout , sauf en aval usinage et montage ;
stoc = "H"	:	fortes capacités sur cellule 1 et aval palettisation, faibles sur le reste ;
stoc = "I"	:	faibles capacités partout ;
stoc = "J"	:	capacités moyennes sur cellule 1 et aval palettisation, faibles sur le reste.

ANNEXE G

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

Codage des centres de gravité

Nous expliquons ici le codage des centres de gravité affichés dans les plans factoriels.

Les points représentant les centres de gravité de deux modalités de facteurs sont codés sur 4 caractères :

|c1|c2|c3|c4|,

c1 et c2 indiquent quel est le premier facteur, et quelle est la modalité de ce facteur, concernés par le calcul du centre de gravité ; c3 et c4 fournissent les mêmes indications pour le deuxième facteur.

Ainsi c1 (resp. c3) vaudra :

- "R"					les Ratios de production,
- "C"	"	"	"	"	le taux de Charge,
- "N"	"	"	"	"	le Nombre de cfg,
- "V"	"	"	"	"	la Vitesse des cfg,
- "S"	"	"	"	"	les capacités des Stocks,
- "G"	"	"	"	"	la Gestion des stocks-machines.

c2 (resp. c4) précise alors la modalité du facteur à l'aide du code qui permet de la retrouver dans le fichier d'environnement concerné (cf annexe E).

Si le centre de gravité est calculé sur un seul facteur, alors le codage se fait de la même façon sur deux caractères seulement.

Exemple : le point "N4SD" représente le centre de gravité de l'ensemble des expériences où sont mis simultanément en jeu un parc de 4 cfg et un stockage de type "D" ; "G2" est le centre de gravité de toutes les simulations qui utilisent la règle de gestion de stocks n°2, quelle que soit la valeur des autres facteurs.

ANNEXE H

Performances du système : 161 variables observées

%GT	:	taux de production global ;
%G1...%G25	:	taux de production par Gamme ;
PYT	:	durée moyenne globale de passage (toutes gammes) ;
PST	:	écart-type de la durée globale ;
PY1...PY25	:	durée de cycle moyenne d'une Palette (par gamme) ;
PS1...PS25	:	écart-type de la durée de cycle par Palette ;
%B1...%B9	:	taux de Blocage moyen des machines ;
%MT	:	taux d'occupation global des machines ;
%M1...%M9	:	taux d'occupation moyen des Machines ;
SM1...SM9	:	écart-type sur les taux d'occupation des Machines ;
TAY, TBY	:	durée d'attente en Amont des robots ;
TAS, TBS	:	écart-type sur les durées d'attente robots ;
%CO	:	taux d'utilisation moyen de l'ensemble des Chariots ;
SCO	:	écart-type sur l'occupation des chariots ;
%CR	:	taux moyen de chariots Roulant ;
SCR	:	écart-type sur le nombre de chariots roulant ;
ECY	:	En-Cours moyen ;
ECX	:	En-Cours maximal ;
ECS	:	écart-type de l'En-Cours moyen ;
c1Y, c1X, c1s		
c2Y, c2X, c2s	:	niveau moyen, maximal et écart-type des stocks sur cellule 1 et cellule 2 ;
a2Y, a4Y, a5Y,		
a6Y	:	niveau moyen des stocks amont palettisation, cellule 1, cellule 2, usinage et montage ;

a2X, a4X, a5X, a6X	:	niveau maximal des stocks amont ;
a2S, a4S, a5S, a6S	:	écart-type sur le niveau des stocks amont ;
p1Y, p2Y, p4Y p5Y, p6Y	:	niveau moyen des stocks aval (post) palettisation, cellule 1, cellule 2, usinage et montage ;
p1X, p2X, p4X p5X, p6X	:	niveau maximal des stocks aval ;
p1S, p2S, p4S p5S, p6S	:	écart-type sur le niveau des stocks aval ;
TY2, TY4, TY5, TY6, TY8	:	durée moyenne d'attente en amont des postes palettisation, cellule 1, cellule 2, usinage, montage, sortie ;
TS2, TS4, TS5, TS6, TS8	:	écart-type sur les durées d'attente amont ;
VY1, VY2, VY4 VY5, VY6	:	durée moyenne d'attente en aval des postes palettisation, cellule 1, cellule 2, usinage, montage, sortie ;
VS1, VS2, VS4 VS5, VS6	:	écart-type sur les durées d'attente aval ;

Mode de calcul des observations

Taux de production	=	(nombre de pièces sorties pendant la période) / (nombre de pièces entrées pendant la période).
Durée de cycle	=	date de sortie de l'atelier - date d'entrée dans l'atelier (amont palettisation).
Taux d'occupation	=	(nombre d'unités de ressource occupées * durée de l'occupation) / durée de la période de simulation.
Durée d'attente en stock	=	(date de sortie de stock - date d'entrée en stock) ; cette quantité est enregistrée par stock, pour toute palette y passant.

ANNEXE I

Modélisation de MACSI

Un modèle pour la simulation est formé de deux parties : une partie statique qui décrit les données et une partie dynamique qui décrit le fonctionnement du système.

* **MACSI - Partie statique** : les éléments (entités, ressources, files d'attente)

+ **Les entités** : ce sont les éléments qui bougent, qui circulent dans le système.

Fabrication : les entités entrantes sont les lots, qui sont ensuite "éclatés" en entités-palettes.

Transport : les entités sont les **chariots filoguidés**.

Il faut déterminer le nombre d'attributs nécessaires par entité ainsi que leur signification. Dans MACSI, les entités ont 10 attributs. L'entité-lot est éclatée en entités-palettes.

Signification des attributs

Entité-lot

1	:	date de création
2	:	numéro de lot
3	:	numéro de gamme
4	:	taille du lot
5	:	type de palette
6	:	date de lancement au plus tôt
7	:	non utilisé
8	:	non utilisé
9	:	attribut de calcul de délai de lancement
10	:	nombre de palettes du lot non encore sorties

Entité-palette

1	:	date de création
2	:	numéro de palette
3	:	type de palette
4	:	capacité de la palette
5	:	nombre de pièces présentes
6	:	numéro de gamme
7	:	index d'avancement dans la gamme
8	:	machine suivante
9	:	durée de l'opération suivante
10	:	indice de la pièce en cours de traitement

Les rubriques "date de création" serviront, par la suite, à calculer les durées de passage des palettes dans l'atelier. La rubrique "durée de l'opération suivante" est nécessaire lorsqu'on utilise certaines règles de gestion de files d'attente (Shortest Processing Time (SPT), par exemple).

Lorsqu'une palette est transportée, l'entité-palette, avec la totalité de ses attributs, est stockée en attente tandis que certains de ses attributs sont recopiés sur le chariot.

Entité-chariot**chariot vide****chariot chargé**

1	:	numéro de chariot	
2	:	0	numéro de palette chargée

3	:	0	type de palette
4	:	numéro de station suivante	
5	:	durée du trajet	
6	:	numéro du tronçon courant	
7	:	non utilisé	
8	:	non utilisé	
9	:	non utilisé	
10	:	numéro de routage	

On reconnaît qu'un chariot est chargé à ce que l'attribut n°2 est non nul.

+ **Les ressources et files d'attente associées** (cf figures 31.7 et 31.8 du texte principal) : les ressources sont des éléments nécessaires à l'exécution des processus mais dont la quantité est limitée.

Fabrication : machines et robots M1 à M11.

Transport : tronçons et cantons. On a 16 ressources-tronçons T1 à T16 (les capacités sont indiquées sur le schéma), et 14 ressources-cantons A1 à A14.

Interface : stocks amont et aval des machines, qui sont à dimensionner

Les ressources sont caractérisées par leur nombre d'unités.

*** MACSI - Partie dynamique : les traitements (processus)**

+ **Les processus** : ce sont les traitements qui s'exercent sur les entités : création, transformation, attente, déplacement, destruction. Ils sont caractérisés par les ressources mobilisées et par une durée constante, probabiliste ou indéterminée.

Les processus de MACSI sont les suivants (les schémas en blocs SIMAN sont regroupés en fin d'annexe) :

- initialisation et lancement en fabrication ;

A partir d'un fichier ordonné des lots à lancer, on génère les entités entrantes du système. Les lots sont introduits dans le système à leur date de début si elle est indiquée, sinon le lancement de l'ensemble est réparti uniformément au cours de la période de production. On calcule un délai moyen entre deux lancements : $d_0 = (\text{durée période} * 0.95) / \text{nombre de lots}$. L'arrivée réelle des lots dans l'atelier se fait alors suivant une distribution triangulaire de mode d_0 , de valeur minimale ($0.9 * d_0$), de valeur maximale ($1.1 * d_0$).

exemple : pour un fichier de 26 lots, le délai moyen vaut $(1440 * 0.95) / 26$ soit 53 min. On adopte alors une distribution triangulaire de mode 53, minimum 47.7 et maximum 58.3.

Lors de la première création, le système est initialisé, c'est-à-dire que les données concernant les gammes, les machines, les palettes sont lues sur des fichiers externes, que les entités chariots sont mises en place et que les capacités de stockage sont dimensionnées.

- processus archivage

Les performances, l'état du système sont enregistrés à chaque fin de simulation afin de constituer une mémoire des comportements du système.

- processus-machines ;

Il s'agit de traduire le déplacement des palettes sur les machines, suivant leur gamme.

L'avancement dans la gamme est géré par un sous-programme.

Les valeurs moyennes des temps opératoires sont données par la gamme.

Leur distribution réelle suit une loi normale centrée sur cette valeur moyenne et d'écart-type (durée moyenne)/10.

exemple: pour une durée opératoire de "30" indiquée dans le fichier "gammes", les temps opératoires réels seront distribués selon une loi normale $N(30,3)$. A chaque poste de travail est utilisée une source aléatoire propre.

Chaque type de machine ayant un fonctionnement différent, on a autant de processus particuliers que de postes de travail. On utilise cependant la modélisation par blocs "STATION" afin de profiter des mécanismes-SIMAN de routage automatique entre stations.

On a donc 6 processus, et leurs ressources associées :

"Palettisation"	demande	machine(1) et stock(7) ;
"Cellule 1"	"	machine(2), machine(3), robot1 et stock(1) ;
"Cellule 2"	"	machine(4), machine(8), machine(9), robot2, stock(2);
"Usinage"	"	machine(5), stock(4) et stock(10) ;
"Montage"	"	machine(6), stock(5) et stock(11) ;
"Sortie".		

- processus-chariots

Il s'agit de traduire le déplacement des chariots sur le réseau de transport. Le routage des chariots est géré par un sous-programme. Le fonctionnement des tronçons est très simple : on affecte simplement une durée de transfert au chariot après avoir vérifié qu'il y a une place disponible sur le tronçon. Par contre les cantons ont trois types de fonctionnement, qui correspondent aux trois types d'aiguillages et sont représentés par trois catégories de processus avec des blocs STATION.

"Intersection"	(cantons A4, A8 ou A11).
"Entrée-machine"	(cantons A2, A5, A7, A9, A12 ou A14).
"Sortie-machine"	(cantons A1, A3, A6, A10 ou A13).

Chaque processus fait appel à la ressource-canton de l'aiguillage concerné ainsi qu'au tronçon qui se trouve en sortie.

On a ainsi modélisé les déplacements d'entités sur l'un et l'autre des sous-systèmes.

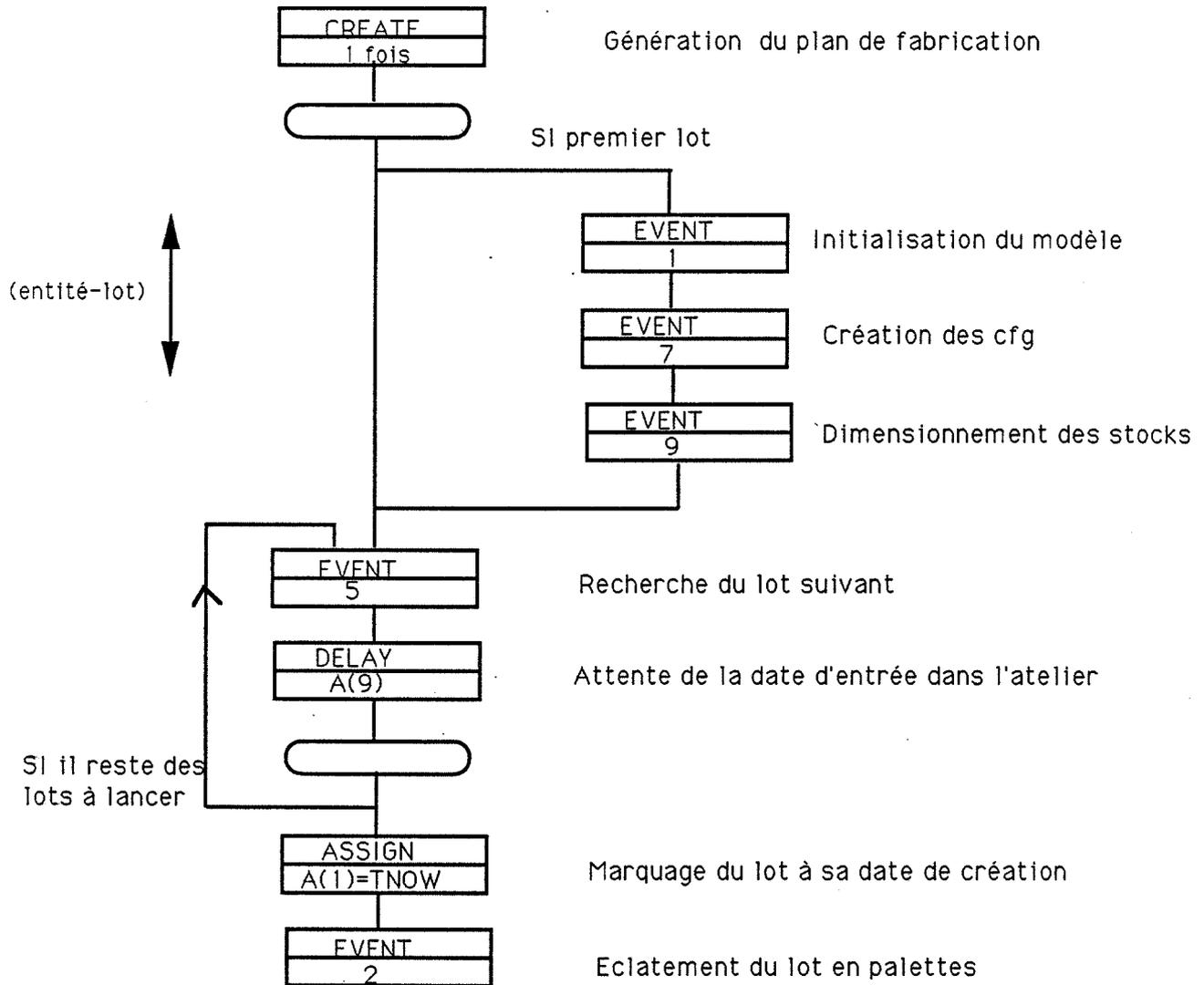
La communication entre les deux parties est assurée, au niveau de l'interface, par le partage des ressources STOCK (requête/libération). En effet, le niveau d'un stock est modifié soit du fait de la fabrication qui prend des palettes en amont pour les évacuer en aval, soit du fait du transport qui charge des palettes en aval des machines et les dépose en amont.

Il faut régler la synchronisation entre les activités de transport et de fabrication ; par exemple, une palette transportée ne doit entrer dans son stock de destination que lorsque l'opération de transport s'achève ; or la durée de cette opération est indéterminée car elle dépend de l'état du réseau. Les processus-machines et chariots sont synchronisés par les primitives WAIT et SIGNAL.

L'ensemble de ces processus fait appel à 8 sous-programmes.

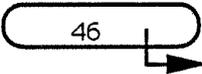
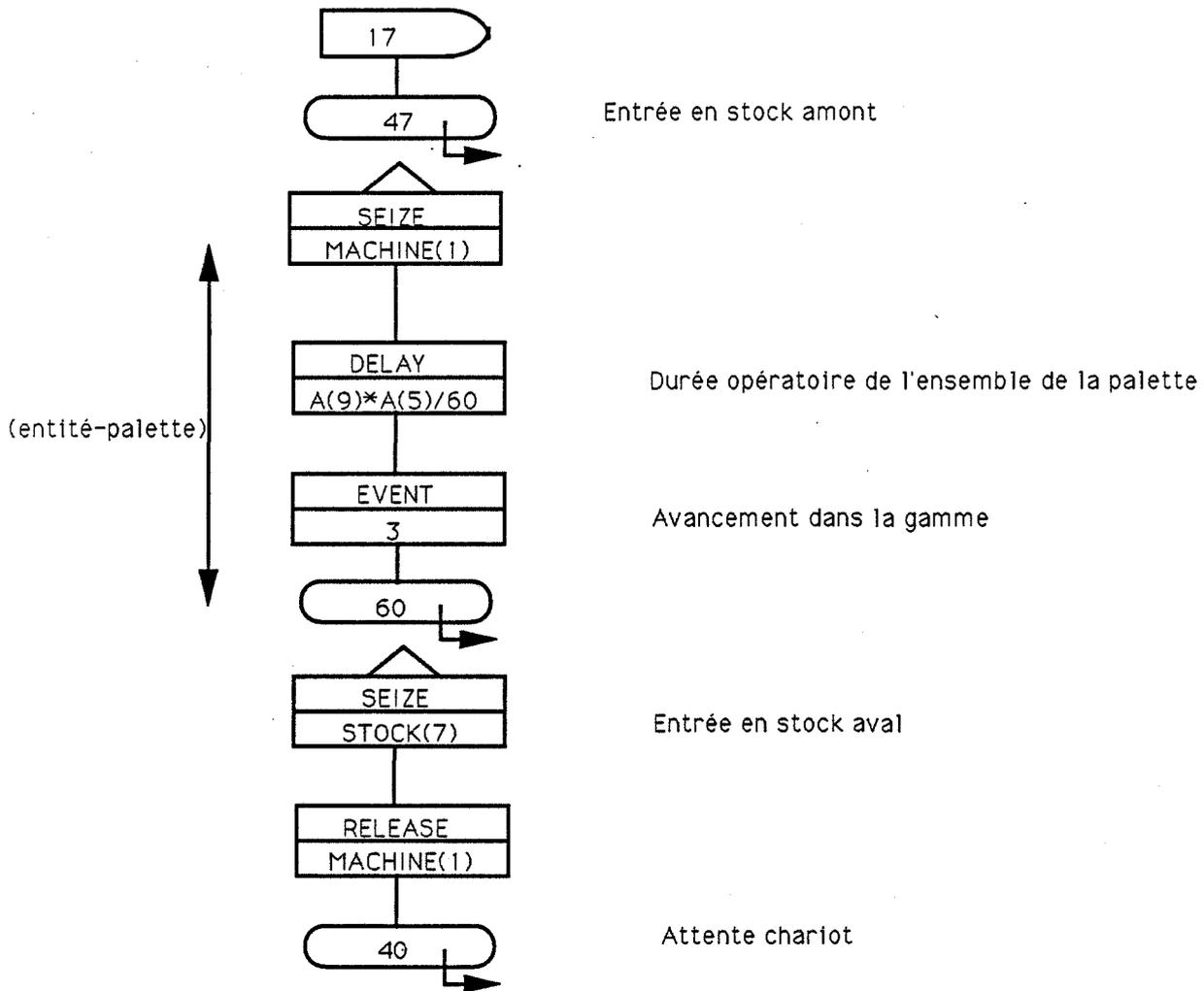
- initialisation et génération des lots :
 - + transfert des données permanentes du modèle.
 - + éclatement du lot en palettes.
 - + création des lots.
 - + création des chariots.
 - + dimensionnement des capacités de stockage.
- processus-machine :
 - + avancement dans la gamme et calcul de la durée opératoire suivante.
- processus-chariots :
 - + chargement d'une palette sur un chariot.
 - + algorithme de routage.

PROCESSUS DE GENERATION DES PALETTES ET INITIALISATION DU MODELE

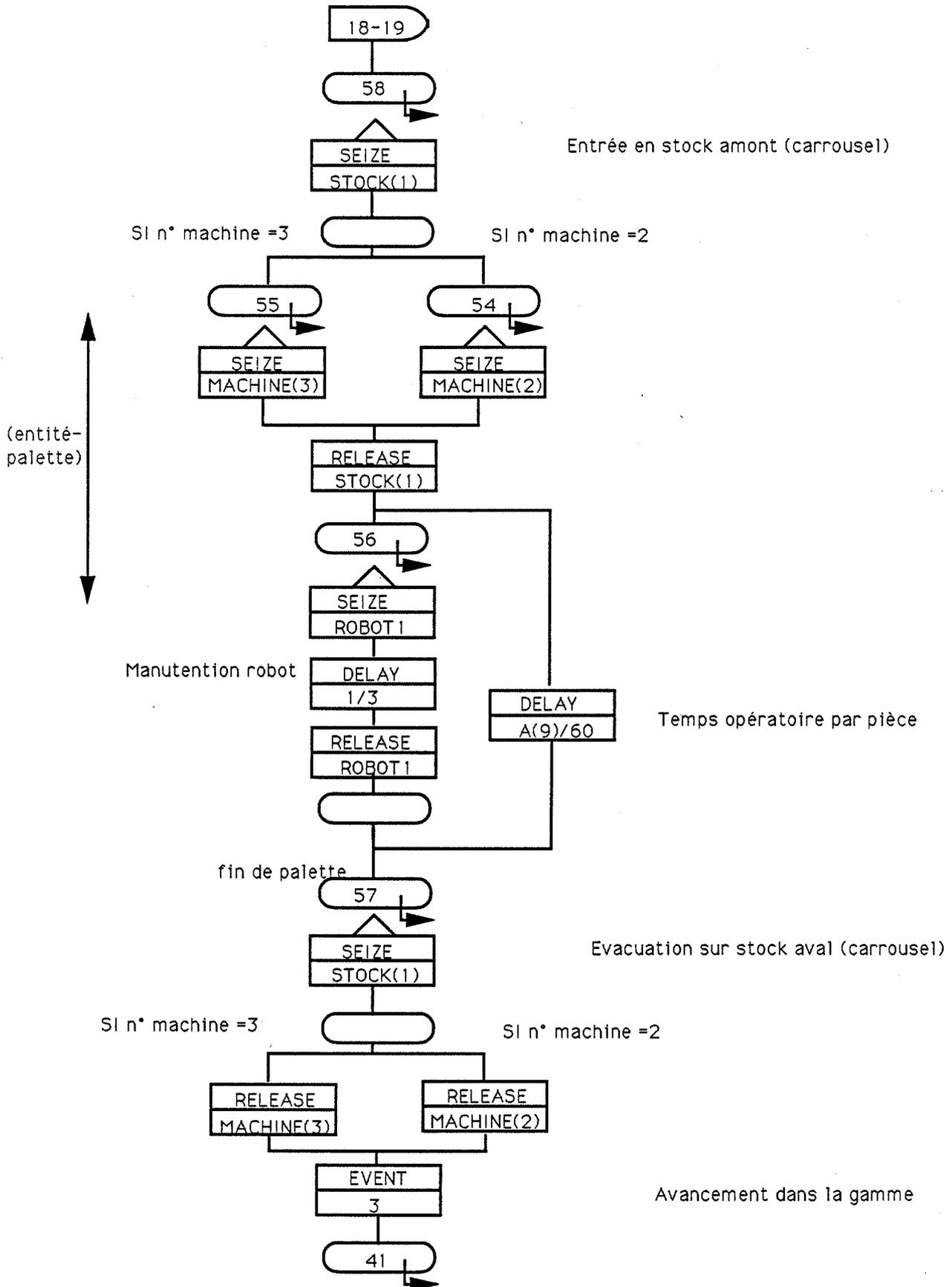


PROCESSUS DE PALETTISATION

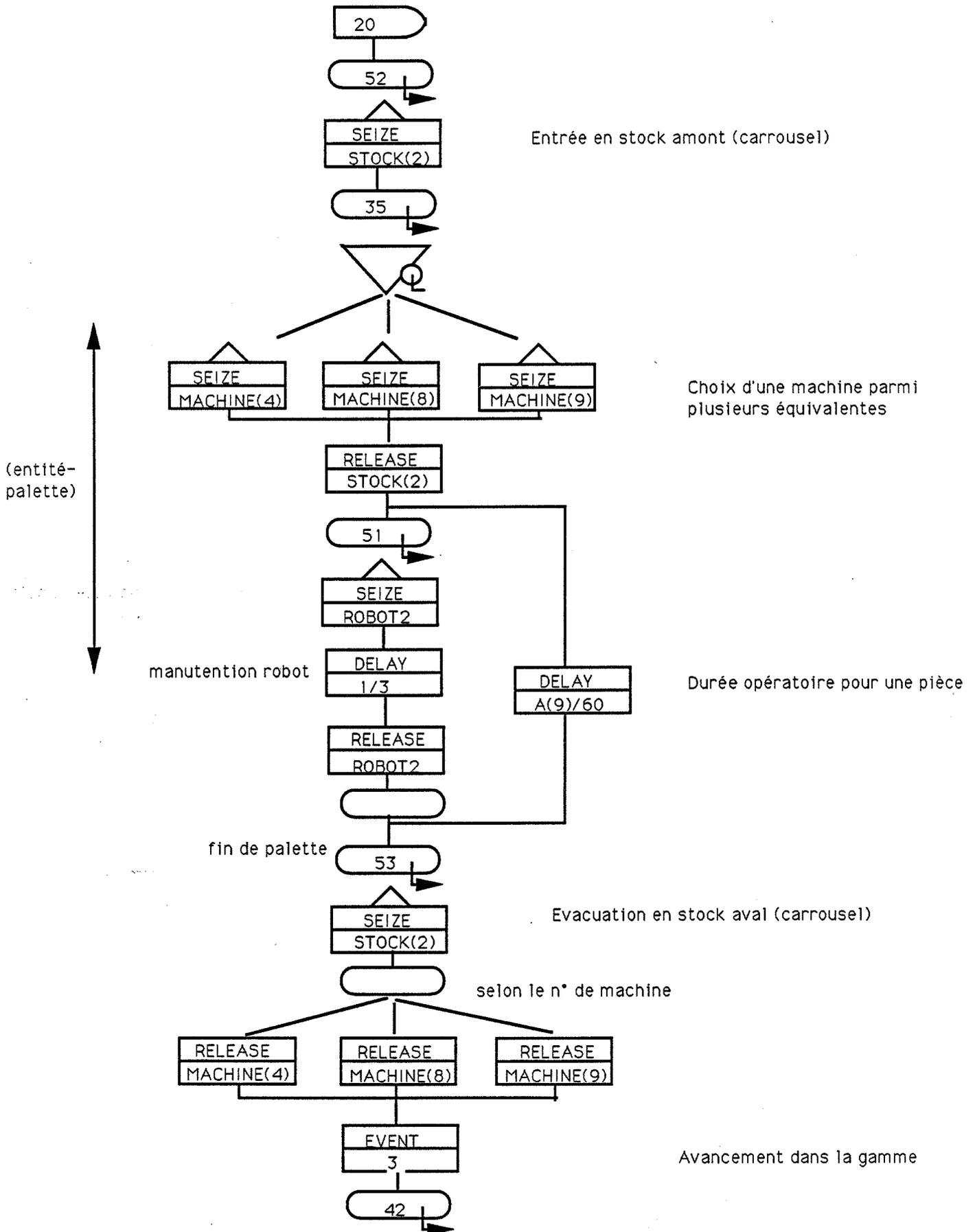
(Station 17)

STOLO  Stockage de l'entité-lot

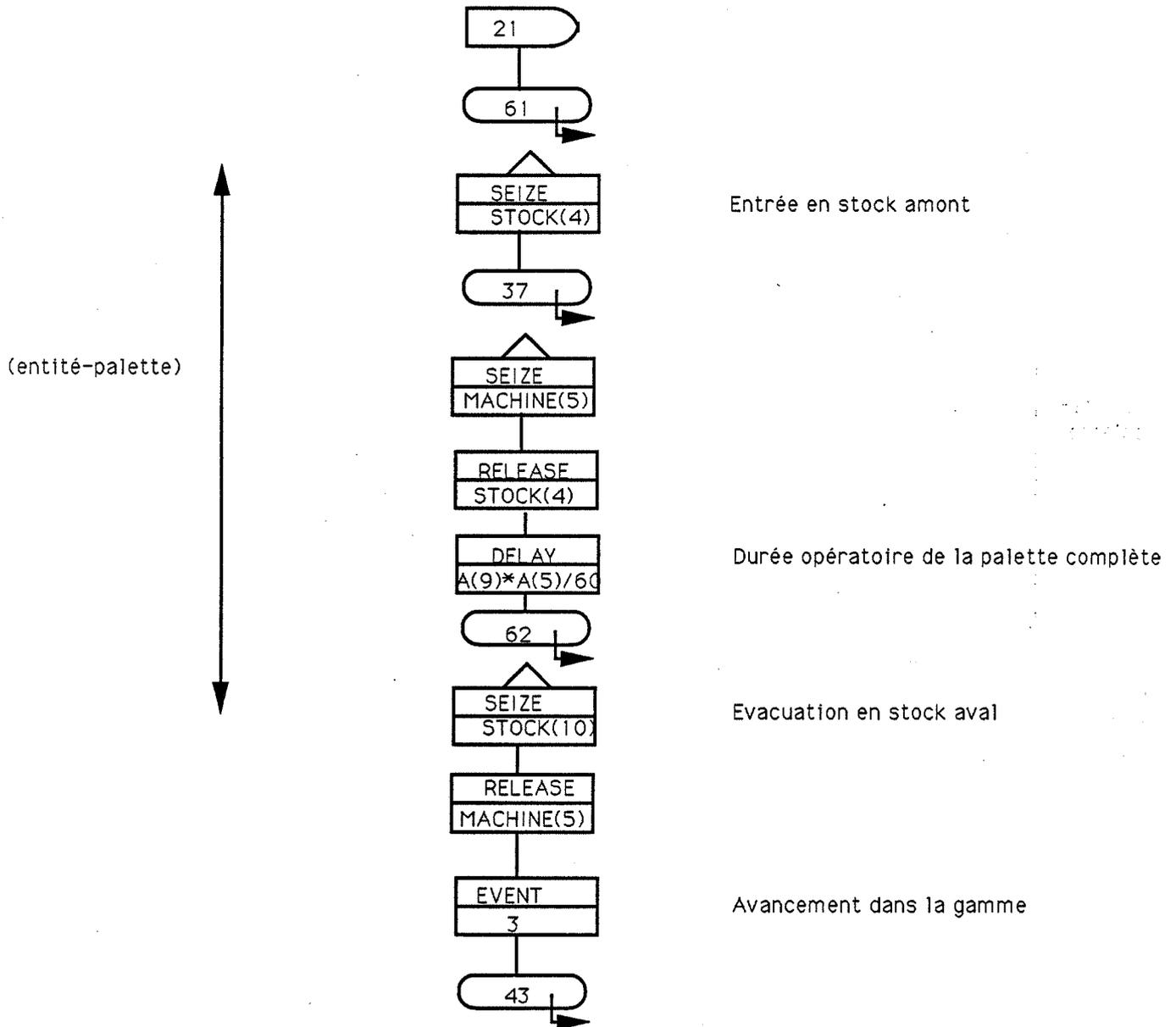
PROCESSUS CELLULE 1



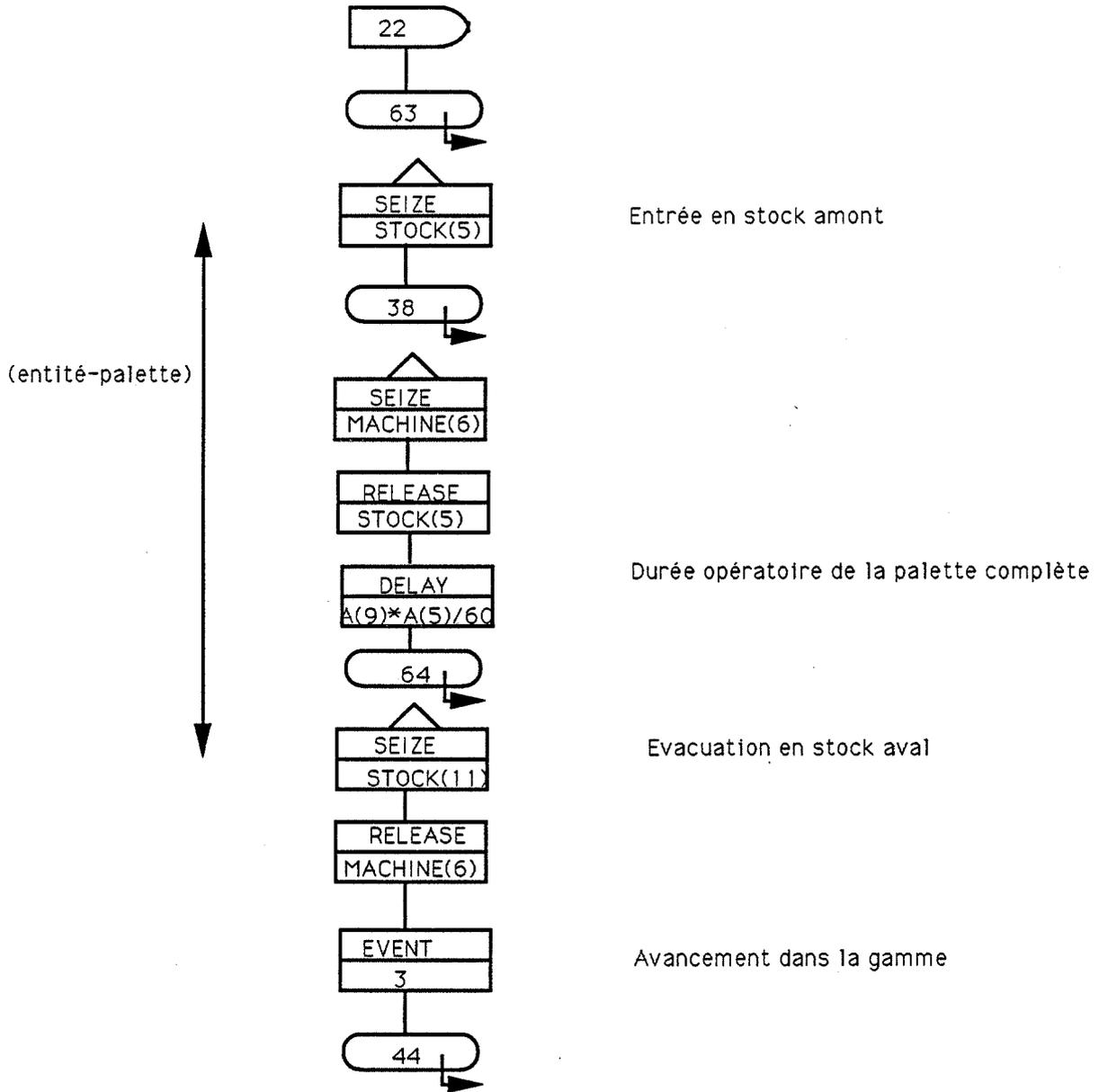
PROCESSUS CELLULE 2



PROCESSUS MACHINE 5



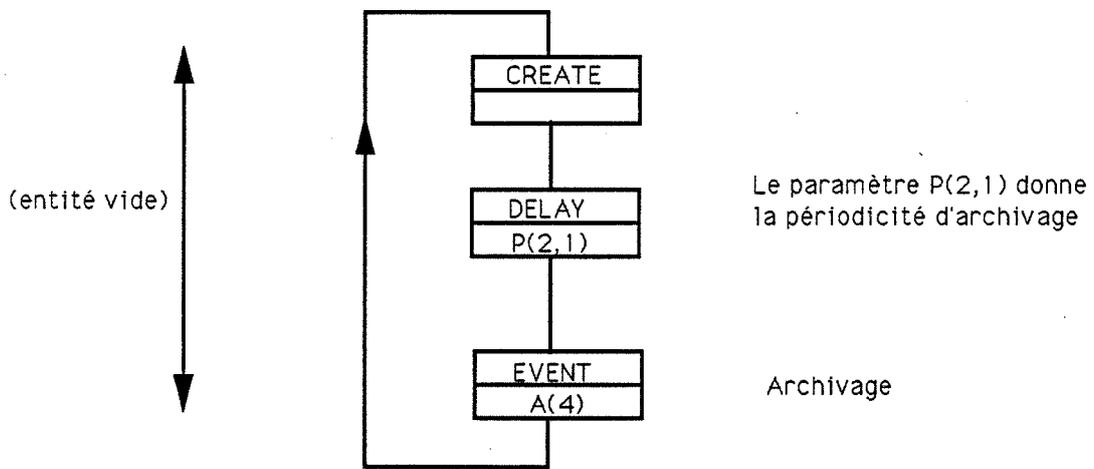
PROCESSUS MACHINE 6



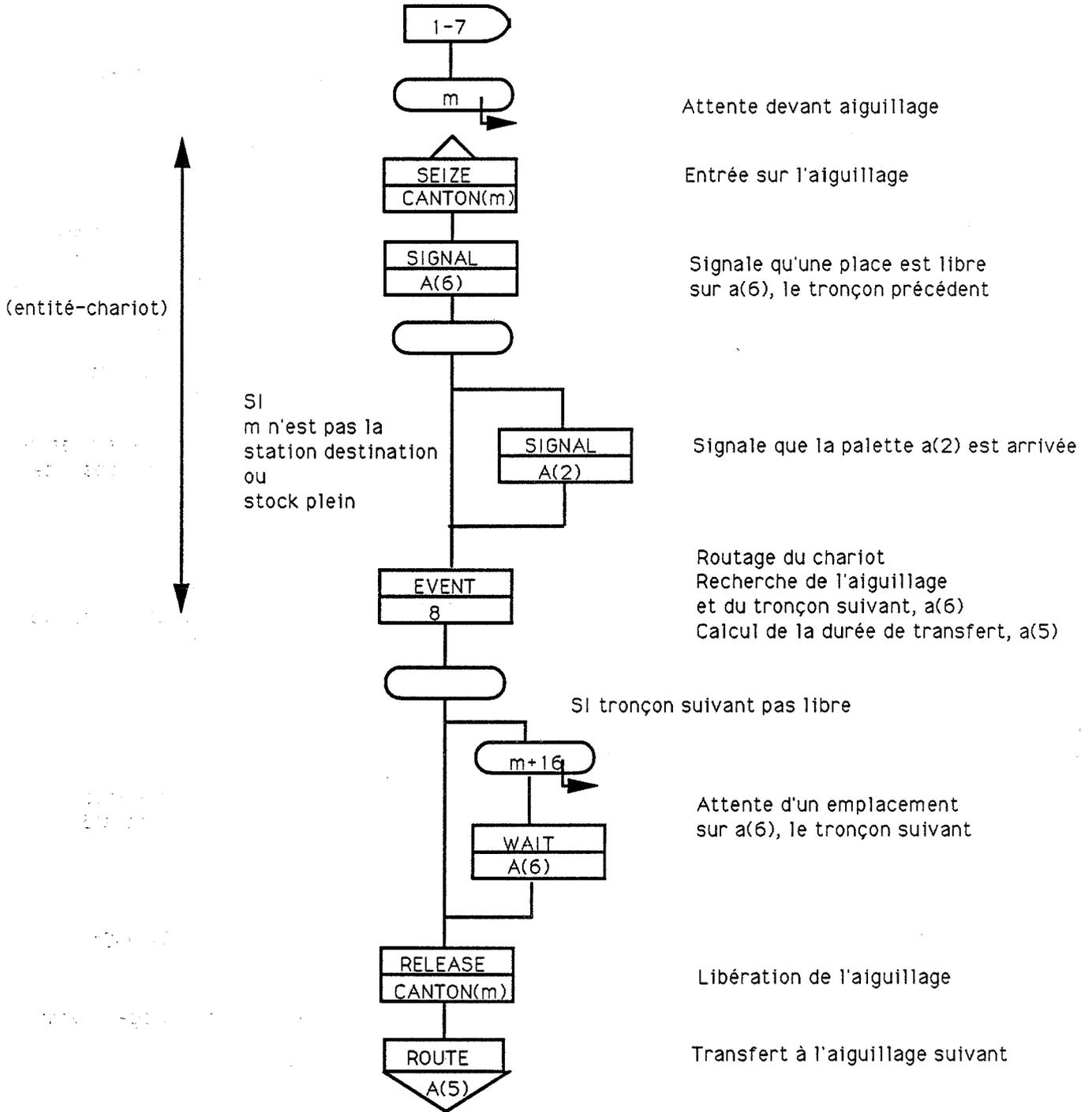
PROCESSUS REBUT



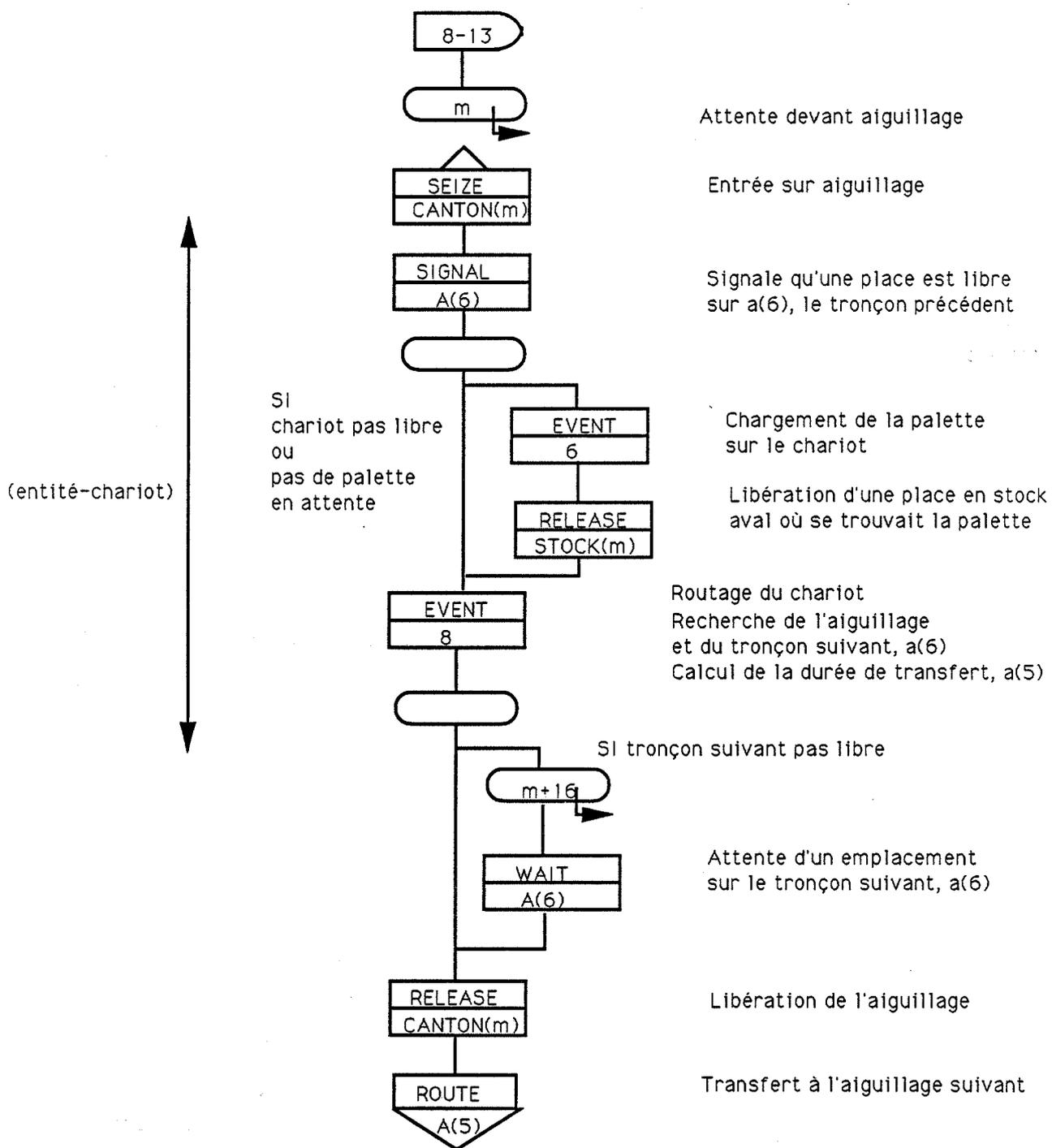
PROCESSUS ARCHIVAGE



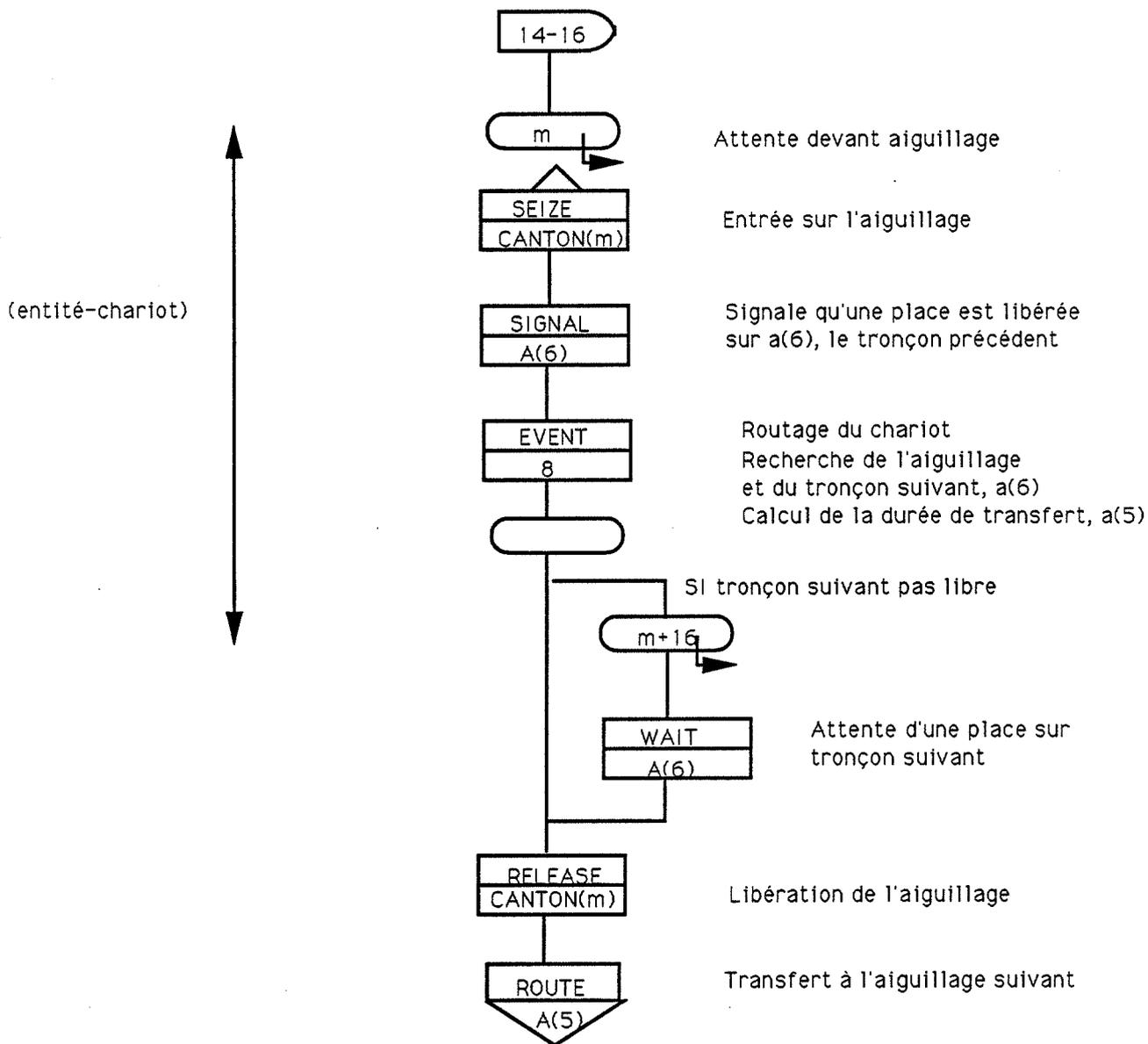
PROCESSUS AIGUILLAGE :
ENTREE POSTE DE TRAVAIL



PROCESSUS AIGUILLAGE :
SORTIE POSTE DE TRAVAIL



PROCESSUS AIGUILLAGE
INTERSECTION



ANNEXE J

1870

1871

1872

1873

1874

1875

1876

1877

1878

1879

1880

1881

1882

1883

1884

1885

1886

1887

Mise au point et traitement de la campagne-test

L'annexe J détaille les deux questions suivantes :

- affinage du choix des facteurs et indicateurs, avec l'Analyse Factorielle en Composantes Principales (ACP), c'est-à-dire identification des indicateurs qui apportent le plus d'information sur l'état du système et sélection des facteurs , et surtout des modalités de facteurs, qui engendrent des comportements suffisamment différenciés de l'atelier.

- description du nuage de points de par l'organisation des individus entre eux et sur les variables explicatives (les indicateurs) ; les axes factoriels de l'ACP permettent de synthétiser l'information contenue dans les variables explicatives de la structure du nuage.

Ces deux points seront éclairés par une ACP afin de rendre compte de la représentativité des variables d'une part, de la dispersion ou du regroupement des objets selon leur nature d'autre part.

Pour les phases de cadrage et d'affinage, nous avons travaillé sur un contexte de production très simplifié, avec un type d'atelier $T1 = \{G1,G2,G3,G4,G5\}$ ne sollicitant que la cellule 1, la palettisation et le montage ; le réseau de transport par conséquent n'est que partiellement utilisé.

Détermination du cadre expérimental

Valeurs standard de "T" et de "O"

Les expérimentations concernent le comportement du système en réaction aux facteurs du groupe "F". Il faut donner aux facteurs non actifs des valeurs qualifiées de "standard". Une première série de simulations est réalisée afin de fixer taux de charge et répartition de la production, puis une seconde pour fixer les paramètres relatifs à l'ordonnancement et au lancement. Le cadrage des facteurs du contexte de l'expérience conduit finalement aux standards suivants (cf texte principal) :

$$T1 = (G1, G2, G3, G4, G5)$$

$$T2 = (20, 20, 20, 20, 20)$$

$$T3 = 70\%$$

$$O1 = (5\ 4\ 2\ 3\ 1)$$

$$O2 = T (80 \text{ pièces})$$

$$O3 = 1 \text{ (cadence de base, la plus basse)}$$

Le contexte étant complètement défini, on peut passer à l'affinage des facteurs et indicateurs.

Phase d'affinage des facteurs et des indicateurs

Les facteurs des groupes "T" et "O" sont fixés aux valeurs déterminées ci-dessus. La campagne va porter sur les effets liés aux facteurs "F". Il s'agit, dans la phase d'affinage, de mettre en évidence les variables performance les plus sensibles aux variations de "F" : des variables qui représenteront bien le phénomène. Il s'agit également d'imposer au modèle des entrées dont les effets sont assez différenciés : des facteurs explicatifs des sorties.

Contexte de simulation

La campagne est caractérisée par :

- T1 = (G1,G2,G3,G4,G5) ;
- T2 = (20, 20, 20, 20, 20) ;
- T3 = 70% de charge ;
- O1 = (5, 4, 2, 3, 1) ;
- O2 = 80 pièces par palette ;
- O3 = cadence de base (cadence "basse") ;
- F1 variable dans (2, 3, 4 ou 5 chariots) ;
- F2 = 30 m/min ;
- F3 variable dans (A, B, D, E, F, G) ;
- F4 = SPT.

Taille de l'échantillon : F3 varie selon 6 modalités. Pour essayer d'avoir au moins 5 exemplaires de chaque, il faut au minimum 30 scenarios, soient 150 simulations. Nous en avons généré 200.

Affiner les indicateurs

L'affinage se déroule selon le processus de la figure 42.7 du texte principal.

Pour ce cas, 99 variables ont été relevées, dont la liste suit :

%GT, %G1, %G2, %G3, %G4, %G5, LY1, LS1, LY2, LS2, LY3, LS3, LY4, LS4, LY5, LS5, PY1, PS1, PY2, PS2, PY3, PS3, PY4, PS4, PY5, PS5, %M1, SM1, %M2, SM2, %M3, SM3, %M6, SM6, %MA, %CC, %C1, %C2, %C3, %C4, %C5, ECY, ECX, a1Y, a1X, a1s, p1Y, p1X, p1s, a2Y, a2X, a2s, p2Y, p2X, p2s, a6Y, a6X, a6s, p6Y, p6X, p6s, T1Y, T1s, T2Y, T2s, T6Y, T6s, TAY, TAs, V1Y, V1s, V2Y, V2s, V6Y, V6s, S1Y, S1s, S2Y, S2s, S3Y, S3s, S4Y, S4s, S5Y, S5s, S6Y, S6s, S7Y, S7s, SBY, SBs, SCY, SCs, SDY, SDs, SEY, SEs, SFY, SFs.

Pour des raisons liées à la taille des tableaux de données du logiciel d'analyse de données, nous n'avons pas pu prendre simultanément en compte tous les indicateurs. L'analyse a donc été conduite sur un nombre restreint de variables : 71 sur 99.

Les écarts-types sur les durées de passage et l'occupation des tronçons ont été exclus, dans un premier temps, de la construction des axes factoriels. Une ACP est donc réalisée sur les 71 variables restantes. Les 10 premières valeurs propres peuvent être considérées comme significatives (cf figure J1). Nous nous contentons de retenir les 5 premiers axes qui, ensemble, expliquent plus de 80% de la variance totale (83%).

Exploitation de l'ACP :

Seuls les centres de gravité des facteurs sont visualisés. Le premier plan factoriel explique 66% de la variance totale.

Variables représentatives : ce sont celles qui présentent la plus forte contribution à l'axe, les plus éloignées sur l'axe. Les contributions indiquées dans le tableau de la figure J2 font apparaître

- sur l'axe 1 : %C1, %C2, p1Y, p1S, p2Y, p2S, a6S, p6Y, V1Y, V1S, V2Y, V2S, V6Y.
- sur l'axe 2 : %G2, LY2, LY3, LY4, LY5, PY2, PY3, PY4, pY5, ECY, ECX, a2Y, a2X, T2Y, T2S.
- sur l'axe 3 : %M1, %M6, a1Y, a1S, p6X, p6S, T1Y, T1S.
- sur l'axe 4 : %GT, %G3, %M6, a6Y, p6X, p6S, T6Y, T6S.
- sur l'axe 5 : %GT, %G3.

Ce sont les variables qui participent le plus activement à l'analyse. On trouve des indicateurs de chacune des trois grandes catégories : durées, en-cours, taux d'engagement des équipements. Ces variables sont porteuses d'information sur le système ; il est a priori intéressant de les garder.

Les invariants : à l'inverse des précédentes, ces variables ne participent pas à la formation des axes ; elles n'apportent pas d'information sur le nuage. On les repère par leur contribution très faibles dans le tableau de la figure J2 : %G1, %G4, %G5, %M2, %M3, %MA, %CC, %C3, %C4, %C5, a1X, p1X, p2X, a6X, V6S. Ce sont des indicateurs inutiles pour l'interprétation.

Il est intéressant de noter que le taux de réalisation de certaines gammes (G1, G4, G5) n'est absolument pas significatif alors que celui d'autres gammes (G2, G3) est bien représentatif du comportement du système. Cela signifie qu'il existe des gammes "critiques", qui peuvent servir de test de fonctionnement parce qu'elles sont plus sensibles aux options de gestion du système. De même, alors que l'engagement des postes de palettisation et de montage est significatif, celui des machines ou du robot de la cellule 1 n'est pas générateur de connaissance.

Les redondances : elles apparaissent bien sur le premier plan. Ainsi, des groupes se distinguent :

- durées d'attente aval (V1Y, V1s, V2Y, V2s, V3Y, V3s) et occupation des stocks aval (p2Y, p6Y, p1Y, p2s, p1s) ;
- durées de passage par lot et durées de cycle par palette ;
- les taux de production ;
- les occupations de tronçons ;
- les durées d'attente en amont des machines et les occupations des stocks amont.

On peut les vérifier avec les corrélations aux axes données par la figure J2 :

coordonnées sur	axe1	axe2	axe3	axe4	axe5
LY1	-831	-288	-17	46	80
PY1	-870	-256	-3	21	60

	LY2	-755	-481	-77	-8	14
	PY2	-785	-499	-161	0	15
	LY3	-691	-509	-149	-110	8
	PY3	-620	-595	-177	-110	1
	LY4	-7	-635	-283	124	-3
	PY4	397	-685	-272	-48	-74
	LY5	-674	-555	-137	-62	35
	PY5	-372	-636	-239	-130	16

Mis à part LY4/PY4 et LY5/PY5 sur le premier axe, les autres variables sont exactement redondantes deux à deux. Comme elles font partie du même registre de signification (durées de passage), il faut supprimer l'une des deux catégories. On conservera les PY_i (durées de passage des palettes), qui sont les plus éloignées sur l'axe, au détriment des LY_i (durées de passage des lots). En outre, les durées de passage par lot posent un problème d'homogénéité quand les lots ne sont pas tous de la même taille ; pour une gamme donnée, le dernier lot est souvent incomplet.

Les taux d'occupation des tronçons, qui varient toujours ensemble, n'apportent pas d'information utile sur l'occupation du réseau en fonction des stratégies de routage. On observe simplement que plus il y a de chariots plus les tronçons sont utilisés, ce qui est une observation triviale puisque les chariots roulent constamment, même vides.

Les autres redondances :

- durées d'attente aval (V1Y, V1s, V2Y, V2s, V3Y, V3s) et occupation des stocks aval (p2Y, p6Y, p1Y, p2s, p1s),
- les taux de production,

- les durées d'attente en amont des machines et les occupations des stocks amont, seront conservées car elles ne sont pas inutiles dans la mesure où elles concernent des catégories d'indicateurs différents (durées / taux d'engagement) ou encore parce qu'elles reflètent la redondance entre un critère global et un critère détaillé de la même catégorie (%GT et les %Gi, par exemple). Cette redondance est l'expression du lien "hiérarchique" entre les critères. Si on supprimait le niveau des stocks (a_iY et p_iY) pour ne garder que les durées d'attente (T_iY et V_iY), il ne resterait que l'en-cours global pour mesurer l'état des stocks. Or on souhaite conserver, pour chaque catégorie d'indicateurs, un niveau global et un niveau détaillé.

En résumé, après plusieurs itérations de ce type, nous sommes passés de 248 variables initiales à 161 (cf texte principal). Les 161 variables finalement retenues sont détaillées en annexe H.

Affiner les facteurs

L'affinage des facteurs, tout comme celui des indicateurs, est également un processus itératif dont la conduite et les résultats sont présentés dans le texte principal.

On retient finalement les 4 domaines de définition suivants pour les facteurs "F" :

- F1 : 2, 3, 4, 5, 6, 7 ou 8 chariots ;
- F2 : 10, 15, 30 ou 60 m/min ;
- F3 : A, B, D, E, F, G, H, I ou J ;
- F4 : SPT ou FIFO.

L'échantillon de base : présentation

Cadre d'expérimentation

Les expérimentations sur lesquelles nous avons fondé notre méthode d'exploitation des résultats concernent le groupe "F" des facteurs. Les facteurs des groupes "T" et "O" sont fixés à des valeurs "standard" et constituent le cadre de l'étude, qui restera invariant dans la suite de l'exposé. La liste des options possibles se trouve en annexe G.

+ T1 = {G5, G7, G20, G21} (= "K")

Le poste "cellule 2" n'est pas utilisé par ces gammes. Le réseau de transport est utilisé dans sa totalité.

+ T2 = {25, 25, 25, 25} (= "5")

Le volume global de production est réparti uniformément entre les 4 gammes.

+ T3 = charge de 70% (= "5")

Le niveau de charge n'est pas trop élevé, afin de permettre l'observation du fonctionnement "moyen" de l'atelier, et non à ses limites.

+ O1 = (7 - 21 - 5 - 20)

Cet ordonnancement a été choisi au hasard dans le fichier ORDO.

+ O2 = 80 pièces (= "T")

La taille des lots est exactement de 5 palettes.

+ O3 = cadence "1"

C'est la cadence "basse". Les lancements sont effectués régulièrement tout au long de la période.

+ F1 variable entre 2 et 8 chariots ;

+ F2 variable entre 10, 15, 30 ou 60 m/min ;

+ F3 variable entre les stockages A, B, D, E, F, G, H, I, J ;

+ F4 variable entre SPT et FIFO.

Compte tenu de la configuration et du paramétrage choisis, on peut calculer des "fourchettes" théoriques pour certains résultats.

Taux d'engagement théoriques des machines:

Palettisation	: 48%
M2-cellule 1	: 56%
M3-cellule 1	: 68%
Usinage	: 64%
Montage	: 60%

Durées de cycle théoriques (exprimées en min). Elles dépendent, bien sûr, de la vitesse des cfg et varient entre un minimum, pour une vitesse de 60 m/min, et un maximum, pour une vitesse de 10 m/min.

	durée minimale	durée maximale (dont durée de fabrication)	
Gamme G5	77	129	(66)
Gamme G7	75	142	(61)
Gamme G20	97	234	(69)
Gamme G21	40	107	(26)

Les temps de transport sont loin d'être négligeables devant les durées de fabrication.

La campagne de simulation

Le plan comprend 4 facteurs actifs : F1, F2, F3, F4 car l'objectif est d'observer le comportement du système dans une problématique de dimensionnement des équipements.

Le facteur F3 est susceptible de prendre 9 modalités. Il faut donc générer au minimum 45 scenarios soient 225 simulations. Nous en avons effectué 350.

On vérifie par croisement des modalités que les effectifs du plan sont équilibrés.

* Croisement "Nombre de cfg" (lignes) et "Vitesse des cfg" (colonnes)

	1	2	3	4	
2	10	10	5	5	30
3	10	10	10	15	45
4	5	30	10	10	55
5	5	15	0	5	25
6	25	5	20	25	75
7	20	5	15	20	60
8	20	0	10	30	60
	95	75	70	110	

* Croisement "Vitesse des cfg" (lignes) et "Stockages" (colonnes)

	A	B	D	E	F	G	H	I	J	
1	10	5	5	15	5	20	5	20	10	95
2	5	5	10	5	20	15	0	5	10	75
3	15	10	5	5	5	10	5	10	5	70
4	5	20	10	15	15	15	10	5	15	110
	35	40	30	40	45	60	20	40	40	

* Croisement "Nombre de cfg" (lignes) et "Stockages" (colonnes)

	A	B	D	E	F	G	H	I	J	
2	5	5	0	0	0	5	0	5	10	30
3	0	5	0	5	10	5	10	5	5	45
4	15	0	15	0	10	5	0	0	10	55
5	0	5	5	5	5	5	0	0	0	25
3	5	20	0	10	10	15	0	10	5	75
4	5	0	5	5	5	10	5	15	10	60
5	5	5	5	15	5	15	5	5	0	60
	35	40	30	40	45	60	20	40	40	

* Croisement "Gestion f.a." (lignes) et "Stockages" (colonnes)

	A	B	D	E	F	G	H	I	J	
1	30	5	15	20	35	35	10	10	15	175
2	5	35	15	20	10	25	10	30	25	175
	35	40	30	40	45	60	20	40	40	

* Croisement "Gestion f.a." (lignes) et "Nombre de cfg" (colonnes)

	2	3	4	5	6	7	8	
1	15	10	35	10	40	25	40	175
2	15	35	20	15	35	35	20	175
	30	45	55	25	75	60	60	

* Croisement "Gestion f.a." (lignes) et "Vitesse des cfg" (colonnes)

	1	2	3	4	
1	55	35	35	50	175
2	40	40	35	60	175
	95	75	70	110	

Par rapport au critère "5 scenarios au moins pour chaque modalité", le stockage "H" est un peu sous-représenté. Il manque surtout d'exemples de couplage avec des modalités faibles de "Nombre de cfg".

On complètera donc l'échantillon avec 5 simulations "Stockage H"- "2 cfg" et 5 simulations "Stockage H"- "5 cfg".

Finalement l'échantillon de base est constitué de 360 simulations. 70 variables sont calculées et participent à l'analyse :

%GT %G5 %G7 %GK %GL PYT PST PY5 PS5 PY7 PS7 PYK PSK PYL PSL %B1 %B5 %B6
 %MT %M1 %M2 %M3 %M5 %M6 TAY TAS %CO SCO SCR ECY ECX ECS c1Y c1X c1s p1Y p1X
 p1s a2Y a2X a2s p2Y p2X p2s a5Y a5X a5s p5Y p5X p5s a6Y a6X a6s p6Y p6X p6s T2Y T2S T5Y
 T5S T6Y T6S V1Y V1S V2Y V2S V5Y V5S V6Y V6S.

Description unidimensionnelle des indicateurs

Les variables peuvent d'abord être décrites individuellement par leurs moyenne, écart-type, valeurs minimale et maximale et par leur histogramme de fréquences, ce qui donne un ordre de grandeur des valeurs faibles ou fortes.

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
%GT	0.78	0.13	0.26	0.85
%G5	0.78	0.13	0.28	0.86
%G7	0.78	0.13	0.26	0.86
%GK	0.78	0.13	0.25	0.87
%GL	0.78	0.13	0.24	0.85

On ne réalise jamais plus de 86% de la production prévue ; les aléas sur les rythmes de lancement introduisent donc un retard non négligeable. La répartition des objets sur ces indicateurs montre que 90% des observations correspondent à de "bonnes" valeurs de l'indicateur et que la queue de l'histogramme, très longue, est constituée de quelques individus seulement, toujours les mêmes pour cette série d'indicateurs (moins de 4 chariots et vitesse inférieure à 15m/min).

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
PYT	410	510	140	3750
PST	143	222	33	1428
PY5	410	500	140	3790
PS5	139	228	27	1504
PY7	420	510	130	3790
PS7	147	230	40	1445
PYK	500	540	160	3910
PSK	155	221	33	1470
PYL	330	500	80	3690
PSL	130	234	19	1470

On observe que la très large majorité des simulations (90% environ) est située autour des valeurs minimales ("bonnes" valeurs) des variables. La queue de l'histogramme est formée de quelques individus isolés ou points "catastrophiques" : 24J1 et 34E2 (2 ou 3 cfg, vitesse=10 m/min). La moyenne est, en fin de compte, peu éloignée du minimum. Plus la vitesse et le nombre de cfg sont faibles plus la durée de cycle s'allonge. Les écarts-types sur durées de cycle suivent le même comportement.

Par comparaison aux durées théoriques, les durées observées, même les meilleures, sont largement plus élevées, ce qui s'explique par le fait que les durées théoriques n'incluent pas les temps d'attente de chariot ou de machine, que l'on ne peut pas connaître a priori.

Tableau 10 : Répartition des résultats des simulations en termes de blocage-machines

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
%B1	16.6	27.6	0	84.4
%B5	2.4	8.3	0	67.8
%B6	2	7.4	0	60.4

La majorité des simulations (70 à 90%) présente des taux de blocage-machines très faibles (entre 0 et 6%) mais quelques cas, là encore, montrent des résultats particulièrement mauvais. Les "mauvais" scénarios sont plutôt caractérisés par des stockages "I", "F" ou "H".

Tableau 11 : Répartition des résultats des simulations en termes d'engagement des machines

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
%ME	59.4	10.2	19.8	64.1
%M1	45.4	8	15.6	49.4
%M2	60.4	10.7	18.9	66.7
%M3	73.6	13.1	23.4	80.5
%M5	60.8	10	20.8	65.8
%M6	56.9	9.4	19.4	62.1

Tableau 12 : Répartition des résultats des simulations en termes de vitesse et de nombre de cfg

Pour 80 à 85% des simulations, le taux d'engagement des machines se situe dans la tranche des valeurs élevées. Les autres simulations, associées à de faibles taux d'engagement, sont caractérisées par une vitesse et un nombre de cfg faibles.

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
TAY	0.07	0.02	0.01	0.09
TAS	0.1	0.001	0.03	0.11

On observe, là encore, une séparation des points en deux groupes : 83% des cas correspondent à des valeurs fortes, les autres cas ont moins de 4 cfg et une vitesse inférieure à 15 m/min.

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
%CO	55.7	27	11.4	89.1
SCO	20.8	5.8	10.4	35.8
SCR	0.4	0.44	0	1.6

La répartition sur %CO et SCO est assez uniforme. En ce qui concerne SCR, la majorité des cas (50%) enregistre de faibles valeurs. Les valeurs fortes sont liées à des nombres importants de cfg, ce qui est logique : plus il y a de chariots, plus ils risquent de se gêner.

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
ECY	2.73	0.64	1.6	5.8
ECX	7.5	1.4	3	11
ECS	1.5	0.5	0.5	2.1

80% des cas concernent des ECY faibles. Par contre 65 à 70% des cas ont des valeurs de ECX et ECS élevées.

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
c1Y	0.18	0.12	0.04	0.58
c1X	0.49	0.30	0.08	1
c1s	0.09	0.07	0.01	0.21

Une moitié des simulations enregistre des valeurs faibles sur ces 3 indicateurs ; l'autre moitié est associée à des valeurs fortes . La répartition se fait apparemment plutôt sur le facteur "Stockage". Il en va de même pour les indicateurs suivants qui mesurent l'occupation des stocks.

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
a2Y	0.09	0.07	0	0.22
a2X	0.41	0.27	0.04	0.9
a2s	0.09	0.06	0	0.2
a5Y	0.1	0.09	0	0.29
a5X	0.6	0.3	0.1	1
a5s	0.17	0.12	0	0.39
a6Y	0.04	0.04	0	0.2
a6X	0.53	0.34	0.1	1
a6s	0.1	0.08	0	0.3
p1Y	0.36	0.4	0.01	1
p1X	0.66	0.3	0.1	1
p1s	0.1	0.09	0	0.4
p2Y	0.09	0.11	0	0.52
p2X	0.29	0.2	0.04	0.7
p2s	0.06	0.05	0.01	0.15
p5Y	0.22	0.23	0.01	0.98
p5X	0.55	0.33	0.1	1
p5s	0.15	0.11	0.03	0.39
p6Y	0.21	0.23	0.01	0.98
p6X	0.54	0.33	0.1	1
p6s	0.14	0.11	0.03	0.4

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
T2Y	12.56	5.99	0.2	20.58
T2S	16.4	8.8	0.9	44.7
T5Y	7.87	4.27	0	26.87
T5S	10.10	5.39	0	30.08
T6Y	2.97	1.62	0	16.11
T6S	4.58	1.91	0	22.88
V1Y	95	162	2	709
V1S	18.2	17.1	1.9	92.9
V2Y	36.7	33.6	2.2	117.1
V2S	20.4	14.3	2	76.1
V5Y	20.1	17.8	2.2	92.8
V5S	12.7	7.9	1.8	40.4
V6Y	19.5	17.9	2	93.8
V6S	11.5	8.2	1.7	46.2

Conclusion :

Pour la plupart des indicateurs, on distingue deux grandes catégories de simulations :

- la majorité, associée à de "bonnes" valeurs des indicateurs ;
- une minorité, associée à des valeurs très dégradées de ces mêmes indicateurs.

La moyenne calculée constitue le point charnière entre ces deux catégories.

DATE DE SOUTENANCE

NOM : **HERTIER-PINGEON**

(avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)

Prénoms : **Christine**

TITRE :

Une aide à la conception de systèmes de production basée sur la simulation et l'analyse de données

NATURE :

Numero d'ordre :

DOCTORAT D'ÉTAT DOCTORAT DE CYCLE de Spécialité : **Informatique appliquée**
 DOCTORAT DE CYCLE de Spécialité :

COTE D.E.U. - Lyon : **T 50/210/19 / et s.s.**

CLASSE :

RÉSUMÉ :

Les formes nouvelles de la concurrence imposent aux systèmes de production une flexibilité de plus en plus grande. Dans le cas de systèmes très automatisés, les décisions prises lors de la conception vont fortement conditionner les possibilités du futur système ainsi que ses capacités d'adaptation aux changements, donc son degré de flexibilité. Le travail contenu dans ce mémoire s'attache précisément à l'étude de méthodes et d'outils d'aide à la décision pour la conception de systèmes de production. Le lecteur est d'abord introduit au domaine puis aux outils et méthodes utilisés. Le modèle d'atelier qui sert de support à la démarche est alors présenté ; il est suivi d'une réflexion sur la construction des campagnes de simulations conduites à partir de ce modèle, réflexion concrétisée par la définition d'un module de génération automatique de plans de simulations associés au modèle d'atelier choisi. L'analyse des données utilisée comme méthode d'acquisition des connaissances sur le comportement des systèmes de production est ensuite envisagée ; une méthode d'analyse est proposée et expérimentée. Ce travail a été développé avec le souci constant d'explorer les possibilités de l'analyse de données dans le domaine et d'évaluer ces possibilités sur la base de nombreuses expériences.

NOTES-CLÉS :

systèmes de production, aide à la conception, analyse de données, simulation.

Laboratoire (s) de recherches :

Département "Stratégie du Développement" - Ecole des Mines de Saint-Etienne

Directeur de recherches :

P. LADET, Professeur des Universités à l'INPG de Grenoble

Président de jury :

Composition du jury : MM

J.P. KIEFFER (rapporteur), P. LADET (Directeur de thèse),

A. MATHON (Directeur de laboratoire), P. PREVOT (rapporteur),

H. PIERREVAL