



Titre: Modèle d'ordonnancement dynamique de projets de réfection
Title:

Auteur: Robert Pellerin
Author:

Date: 1997

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Pellerin, R. (1997). Modèle d'ordonnancement dynamique de projets de réfection
Citation: [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/6826/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6826/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Laurent Villeneuve
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÈLE D'ORDONNANCEMENT DYNAMIQUE
DE PROJETS DE RÉFECTION

ROBERT PELLERIN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ET DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

MAI 1997



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33018-4

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:
MODÈLE D'ORDONNANCEMENT DYNAMIQUE
DE PROJETS DE RÉFECTION

présentée par: PELLERIN Robert

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par la jury d'examen constitué de:

MME RIOPEL Diane, Doctorat, présidente

M. VILLENEUVE Laurent, M. Eng., membre et directeur de recherche

M. GHARBI Ali, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GOURDEAU Richard, Ph.D., membre

M. AIT KADI Daoud, Ph.D., membre externe

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage n'aurait pu voir le jour sans l'appui de nombreuses personnes auxquelles j'exprime ma reconnaissance. Je remercie d'abord mes deux directeurs de recherche, Monsieur Laurent Villeneuve et Monsieur Ali Gharbi, qui m'ont soigneusement aidé tout au long de mes études supérieures. Leur étroite collaboration jumelée à leur grande patience m'ont permis de découvrir et d'apprendre des facettes qui vont au-delà des connaissances académiques.

Monsieur Villeneuve m'a guidé depuis mes débuts aux études supérieures. En plus de m'avoir orienté dans mes recherches, il fut un conseiller formidable dans mon choix d'orientation de carrière. Je lui dois notamment mon passage direct au doctorat ainsi qu'une expérience inoubliable dans l'organisation d'un congrès scientifique de grande envergure. La pertinence et la sagesse de ces interventions m'ont fait découvrir de nouvelles façons d'approfondir mes connaissances.

De son côté, Monsieur Gharbi m'a permis, en plus d'avoir cosupervisé mes recherches, d'acquérir de l'expérience pratique dans le domaine de la réfection en m'impliquant dans un projet de recherche avec la Division des aéronefs militaires de Canadair. J'en profite d'ailleurs pour remercier tout le personnel de Canadair impliqué dans ce projet. Cette

expérience jumelée à ces judicieux conseils m'a permis de mieux comprendre la problématique entourant la planification des projets de réfection.

Je dois aussi souligner l'apport indispensable du Major Yves Turgeon à cette recherche. En plus de m'accorder de son précieux temps à de nombreuses reprises, il m'a donné accès à de l'information privilégiée au sujet de plusieurs projets de réfection réalisés au 202e Dépôt d'ateliers des Forces canadiennes.

Je tiens également à remercier tous les autres membres du jury qui, par leurs conseils, ont guidé cette recherche. Les commentaires judicieux apportés lors des tests de synthèse ont notamment permis d'orienter et de structurer la dernière étape de la recherche. La flexibilité et la grande disponibilité de la présidente du jury, Madame Diane Riopel, furent sincèrement appréciées. Le professionnalisme de ses interventions et la coordination exceptionnelle des activités reliées à la soutenance de la thèse ont certainement contribué à concentrer mes efforts sur la recherche uniquement.

Je désire souligner la collaboration très appréciée de Richard Pellerin lors de la phase de programmation. Les nombreuses heures qu'il m'a accordées ont grandement facilité la réalisation de cette thèse.

De plus, j'exprime ma reconnaissance à mon employeur, les Forces armées canadiennes, qui m'a donné l'opportunité de poursuivre mes études. Je tiens également à remercier les

organismes qui m'ont accordé des bourses d'excellence depuis mon arrivée à l'École Polytechnique, soit le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada, la fondation de l'École Polytechnique et le département de génie industriel de l'École Polytechnique.

Finalement, je remercie mon épouse et mes proches qui m'ont soutenu sans relâche au cours des trois dernières années. Leur support témoigne d'une grande amitié.

RÉSUMÉ

Un projet de réfection consiste à remettre à neuf l'ensemble d'un équipement en améliorant sa condition générale et ainsi prolonger sa vie utile. La réalisation d'activités de réfection est marquée de nombreux imprévus ce qui en complique la planification. Une évaluation précise des besoins de réfection est cependant nécessaire pour éviter d'entraîner des coûts additionnels et de prolonger inutilement la durée d'un projet. Les méthodes actuelles d'ordonnancement de projets ne permettent pas d'établir un échéancier réalisable pour des projets complexes de réfection à cause principalement de leurs hypothèses trop sévères, qui empêchent la considération de l'ensemble des contraintes et des phénomènes aléatoires de tels projets.

Cette recherche vise à proposer un modèle d'ordonnancement stochastique adapté aux projets de réfection et capable d'évaluer avec précision la distribution statistique de la durée d'une remise à neuf.

L'approche préconisée consiste, dans un premier temps, à élaborer un mécanisme qui permet d'imiter le déroulement réel d'un projet de remise à neuf. Puis, dans un deuxième temps, recourir à un algorithme de résolution pour l'ordonnancement des activités en fonction des contraintes de zones et de ressources. Le résultat final de cette approche est l'établissement d'un échéancier de base pour le suivi de la production ainsi qu'une stratégie

d'affectation des ressources et des zones de travail lors de l'ordonnancement des activités en temps réel.

Le modèle proposé nécessite la description d'un projet sous la forme d'un réseau d'activités formé des activités de réparation connues a priori. Ce réseau d'activités sert de base pour la simulation d'événements stochastiques. La construction d'un ordonnancement admissible s'effectue progressivement d'une manière similaire au déroulement chronologique du projet. Les décisions liées à l'affectation des ressources et des zones de travail sont prises à chaque itération compte tenu de l'avancement simulé dans le temps des différentes activités. Cette approche d'ordonnancement progressif se veut dynamique en actualisant la priorité relative des activités, déterminée par méthodes heuristiques, à chaque moment de résolution. Une nouvelle règle d'affectation heuristique tirant profit du caractère dominant des activités et de la structure d'un réseau d'activités d'un projet de réfection fut aussi introduite.

La phase d'expérimentation a d'abord traité le cas déterministe à partir d'un ensemble de 300 réseaux d'activités générés de façon aléatoire. Ces premiers tests visent à démontrer le caractère dominant des contraintes disjonctives de zones de travail et à évaluer par le fait même la performance de la règle d'affectation proposée. Puis dans un deuxième temps, le modèle complet, incluant la simulation du réseau d'activités, est testé en utilisant le même ensemble de réseaux d'activités. Finalement, l'utilisation pratique du modèle fut testé en menant une série d'expériences effectuées à partir d'un cas réel.

Ces expériences ont démontré l'avantage de recourir à un algorithme de résolution dynamique pour l'ordonnancement des activités. Bien que l'algorithme proposé fut introduit dans un contexte d'analyse de projets stochastiques, il semble que celui-ci réagit tout aussi bien pour l'ordonnancement de projets déterministes avec contraintes de zones de travail. La reconnaissance des activités dominantes, par l'intermédiaire de la règle d'affectation proposée, apparaît comme une approche supérieure aux règles d'ordonnancement connues pour minimiser la durée espérée d'un projet.

La validité et la pertinence des résultats obtenus ont encouragé la généralisation du modèle d'ordonnancement aux environnements de production multi-projet. Cette généralisation permet d'utiliser le modèle autant au niveau de l'ordonnancement qu'au niveau de la planification stratégique. Cette dernière utilisation est particulièrement avantageuse en permettant la construction d'un plan directeur de production réalisable en accord avec les objectifs stratégiques d'une entreprise de réfection. La méthodologie de planification stratégique proposée dans un contexte multi-projet a permis de réduire les délais de livraison de projets réels de 25 % sans nécessiter aucun investissement.

La recherche a aussi fait ressortir le besoin pressant de fournir des outils de planification plus performants aux entreprises responsables des projets de réfection. Jusqu'à ce jour, la recherche s'est plutôt concentrée sur la problématique des gestionnaires d'équipements en présentant principalement des modèles de détermination du moment de remise à neuf. La

problématique des entreprises de réfection, caractérisée par un environnement de production des plus aléatoires, demeure peu étudiée et offre de nombreux défis.

Du point de vue de la recherche dans l'industrie de la réfection, l'incertitude du contenu de travail des activités de réparation et la gestion difficile des inventaires qui en résulte représentent un défi de taille. Bien que les contraintes de ressources et de zones de travail furent ici considérées, aucune approche ne fut tentée pour synchroniser l'établissement d'un ordonnancement réalisable avec la consommation et la commande de matériel. Les gestionnaires de projet doivent néanmoins composer avec ce besoin. Cette avenue de recherche comprend sans contredit le potentiel de bénéfices le plus important pour les gens de l'industrie.

ABSTRACT

An overhaul project consists of the complete rebuild of an equipment, improving its general condition and thus prolonging its useful life. This remanufacturing environment is typically marked with many unforeseen breakdowns and requirements which greatly complicate the planning process. Thus, the need for the precise evaluation of production activities is essential in order to avoid additional costs and to unnecessarily prolong the duration of a project. The existing method of project scheduling does not allow the establishment of achievable milestones during complex repair projects. This is caused mainly by the severe restrictions and limitations which prevent the random phenomena within a remanufacturing process from being considered.

This research aims at the proposal of a stochastic scheduling model, adapted to the overhaul project, and capable of precisely evaluating the statistical distribution of the duration of a remanufacturing project.

The recommended approach includes the development of a mechanism which enables the simulation of the real progress of a remanufacturing project. Then, as a second phase, a resolution algorithm schedules the activities with respect to work space and resource constraints. The end result of this approach is the establishment of a production schedule as well as an allocation strategy for resources and work areas throughout the production unit, in real time.

The proposed model necessitates that the project be described in the form of an activity network. This activity network serves as the basis for the simulation of stochastic events. The production schedule develops gradually in a manner similar to the chronological progress of the project. Decisions connected to the allocation of resources and work areas are taken at each iteration by considering the simulated current status of the different activities in progress. This progressive scheduling approach is dynamic in that it considers the relative priority of activities, determined by heuristic methods, at each time and place throughout the overhaul process. A new rule for heuristic allocation, which weighs the dominant factor of the activities within the remanufacturing network structure, was also introduced.

The experimental phase of this research studied the deterministic case using 300 activity networks. These first tests were aimed at demonstrating the dominant characteristics of the disjunctive work zone constraints during scheduling and, at the same time, evaluating the performance of the allocation rule proposed. Next, the complete model, including the simulation of the activity network, was tested using the same set of activity networks. Finally, the practical application of the model was tested using an actual remanufacturing project.

Both laboratory research and the practical application have demonstrated the advantage in using a dynamic resolution algorithm for activity scheduling. Although the proposed

algorithm was introduced in the context of analysing stochastic projects, it seems that it performs equally well for the scheduling of projects with dominant work zone constraints. The dominant activity recognition, using the allocation rule proposed, appears to be a superior approach compared with scheduling rules known to minimise project cycle time. The dynamic rule performs better than those relying strictly on information obtained from critical path calculations.

The validity and the relevance of the results obtained, have encouraged the generalisation of the scheduling model to include multi-project production environments. This generalisation allows the model to be used not only for scheduling but also for strategic planning. This last application is particularly advantageous by allowing the development of an achievable production plan which is in agreement with the strategic objectives of a remanufacturing enterprise. Practical use of the strategic planning methodology in a multi-project context has already allowed a reduction of 25% in product delivery time with no investment.

The research has also demonstrated the pressing need to provide more effective planning tools to the production managers for overhaul projects. Until today, the research has been predominantly focused on the problems of equipment maintenance managers and has produced models concentrating on the determination of when to remanufacture. The problem of remanufacturing, characterised by a more random production environment, has been the focus of little attention and continues to offer many challenges.

From the perspective of research in the remanufacturing industry, inventory management remains a significant challenge due to great fluctuations in repair work content and duration. Although constraints of resources and work zones were considered here, no attempt was made to synchronise the establishment of an achievable schedule with parts consumption and ordering. Production managers must, nevertheless, consider these factors. This avenue of research holds, without question, great potential to benefit this sector of industry.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DES FIGURES	xxii
LISTE DES SIGLES ET SYMBOLES.....	xxiii
LISTE DES ANNEXES.....	xxv
AVANT-PROPOS	xxvi
INTRODUCTION	1
 CHAPITRE I: INTRODUCTION À LA RÉFECTION D'ÉQUIPEMENTS	 3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Description d'un programme de maintenance.....	3
1.2.1 Les niveaux de maintenance	4
1.2.2 Le rôle de la réfection au sein d'un programme de maintenance.....	5
1.2.3 Les objectifs de la réfection	7
1.3 Description du processus de réfection	8
1.3.1 Les modes de réfection.....	9
1.3.2 Les avantages de la réfection au besoin.....	10
1.4 Description de la problématique	11

1.4.1 La nature stochastique des opérations de réfection	12
1.4.2 Description des imprévus	13
1.4.3 Limitations des méthodes de planification actuelles.....	15
1.5 Conclusion.....	16
 CHAPITRE II: REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	17
2.1 Introduction.....	17
2.2 Modélisation d'un projet de remise à neuf.....	18
2.2.1 Définition du réseau d'activités	18
2.2.2 Construction du réseau d'activités d'un projet de réfection.....	21
2.2.3 Programmation du réseau.....	22
2.3 Le modèle déterministe	23
2.3.1 L'algorithme du CPM.....	24
2.3.2 Définition des marges et des activités critiques	25
2.3.4 Limitations du CPM pour un projet de réfection	26
2.4 Les modèles stochastiques	26
2.4.1 La méthode PERT	28
2.4.2 Les méthodes d'analyse exacte	30
2.4.3 Les méthodes d'approximation et de bornes.....	30
2.4.4 La simulation Monte Carlo.....	31
2.5 Les modèles généraux.....	33
2.5.1 Représentation d'un réseau stochastique général.....	33
2.5.2 Résolution des modèles GERT.....	34

2.5.3 Limitations des modèles généraux	35
2.6 Ordonnancement.....	35
2.6.1 Modèles d'optimisation	36
2.6.2 Méthodes heuristiques.....	37
2.6.3 Limitations des modèles d'ordonnancement.....	38
2.7 Conclusion.....	38

CHAPITRE III: DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE PLANIFICATION 40

3.1 Introduction.....	40
3.2 Description du modèle de planification proposé.....	41
3.2.1 Choix d'une approche de résolution	42
3.2.2 Utilisation de la simulation	43
3.2.3 Simulation de l'environnement de réfection.....	44
3.2.4 Description de la méthodologie de planification	45
3.3 Procédure d'ordonnancement des activités	48
3.3.1 Méthode de résolution.....	48
3.3.2 Ordonnancement dynamique	49
3.4 Conclusion.....	50

CHAPITRE IV: SIMULATION D'UN PROJET DE RÉFECTION 52

4.1 Introduction.....	52
4.2 Simulation du réseau d'activités	53
4.2.1 Modélisation de la durée des activités de base.....	54

4.2.2 Description des défauts non prévus.....	57
4.2.3 Modification du réseau d'activités de base.....	59
4.3 Description du modèle de simulation.....	61
4.3.1 Diagramme d'influence.....	63
4.3.2 Description des fonctions du modèle de simulation.....	62
4.4 Techniques de réduction de variance.....	65
4.4.1 Fonctionnement des techniques de réduction de variance.....	66
4.4.2 Techniques traditionnelles utilisées en planification de projet.....	67
4.4.3 Technique de réduction de variance proposée.....	68
4.5 Conclusion.....	70
 CHAPITRE V: ORDONNANCEMENT DYNAMIQUE DES ACTIVITÉS.....	71
5.1 Introduction.....	71
5.2 Méthodologie d'affectation dynamique des ressources.....	72
5.2.1 Description de l'algorithme d'ordonnancement dynamique.....	72
5.2.2 Mise à jour des données du CPM.....	75
5.3 Sélection des règles d'affectation de ressources.....	81
5.3.1 Règles d'affectation statiques.....	82
5.3.2 Règles d'affectation dynamiques.....	84
5.3.3 Recherche de dominance.....	85
5.4 Conclusion.....	88

CHAPITRE VI: EXPÉRIMENTATION.....	90
6.1 Introduction.....	90
6.2 Cadre expérimental	91
6.2.1 Génération des réseaux d'activités.....	92
6.2.2 Programme de simulation	93
6.3 Expérimentation.....	94
6.3.1 Expérimentation dans le cas déterministe	96
6.3.2 Expérimentation dans le cas stochastique.....	99
6.4 Analyse d'un projet réel de réfection.....	103
6.4.1 Description du projet.....	103
6.4.2 Description des zones de travail.....	104
6.4.3 Détermination d'une stratégie d'ordonnancement	105
6.5 Conclusion.....	111
 CHAPITRE VII: GÉNÉRALISATION DU MODÈLE.....	 113
7.1 Introduction.....	113
7.2 Ordonnancement en mode multi-projet.....	114
7.2.1 Méthodologie d'ordonnancement multi-projet	115
7.2.2 Généralisation de l'algorithme d'ordonnancement.....	116
7.2.3 Algorithme d'ordonnancement multi-projet	117
7.3 Planification stratégique en mode multi-projet	118
7.3.1 Importance des décisions stratégiques	119
7.3.2 Objectifs de planification stratégique de projets	120

7.3.3 Description de la méthodologie de planification stratégique	122
7.3.4 Calcul du nombre d'employés requis	125
7.3.5 Évaluation de la capacité optimale.....	126
7.4 Conclusion.....	130
 CHAPITRE VIII: RECOMMANDATIONS.....	131
8.1 Introduction.....	131
8.2 Utilisation rationnelle du système de planification.....	132
8.2.1 Intégration au système d'information de gestion de la production	132
8.2.2 Fonctionnalités recherchées du module d'ordonnancement	135
8.3 Tendances du marché de la réfection et de la recherche	136
8.4 Conclusion.....	137
 CONCLUSION.....	138
RÉFÉRENCES	141
ANNEXES	157

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1	Description des règles d'ordonnancement statiques	83
Tableau 6.1	Durée moyenne des projets dans le cas déterministe	97
Tableau 6.2	Nombre d'obtention de la durée minimale dans le cas déterministe	98
Tableau 6.3	Durée moyenne des projets dans le cas stochastique.....	100
Tableau 6.4	Nombre d'obtention de la durée minimale dans le cas stochastique.....	102
Tableau 6.5	Durée moyenne calculée du projet réel	107

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Méthodologie de planification proposée	47
Figure 4.1 Simulation de la séquence des activités.....	60
Figure 4.2 Diagramme d'influence	63
Figure 5.1 Algorithme d'affectation des ressources	73
Figure 6.1 Structure du programme OVERPLAN.....	95
Figure 6.2 Écart moyen par rapport à la durée minimum obtenue	101
Figure 6.3 Réseau d'activités du projet	104
Figure 6.4 Schéma des zones de travail	106
Figure 6.5 Influence de la probabilité de blocage sur la durée moyenne du projet.....	111
Figure 7.1 Méthodologie d'ordonnancement multi-projet.....	117
Figure 7.2 Relation entre le niveau de disponibilité et la durée moyenne	123
Figure 7.3 Relation entre la capacité utilisée et la durée moyenne des projets.....	124
Figure 7.4 Durée moyenne en fonction du nombre de projets concomitants	128
Figure 7.5 Utilisation des ressources en fonction du nombre de projets concomitants ..	129
Figure 8.1 Intégration du système de gestion de la production.....	133

LISTE DES SIGLES ET SYMBOLES

a : estimation optimiste de la durée d'une activité

a_{ij} : variable binaire indiquant si l'activité i fait partie du chemin j

b : estimation pessimiste de la durée d'une activité

c_{ik} : variable binaire indiquant si l'activité i est réalisée dans la zone k

CPM : Critical Path Method

EF_i : date de terminaison au plus tôt de l'activité i

ES_i : date de départ au plus tôt de l'activité i

$F(t)$: distribution de la durée du projet

GAN : General Activity Network

GERT : Graphical Evaluation and Review Technique

H : dimension du vecteur des périodes en progrès V

J : nombre de chemins dans le réseau d'activités

LF_i : date de terminaison au plus tard de l'activité i

LS_i : date de départ au plus tard de l'activité i

m : durée la plus probable d'une activité

M : vecteur unitaire de disponibilité des zones de travail

NRB : Narrow Reliability Bounds

Q-GERT : Queuing - Graphical Evaluation and Review Technique

PERT : Program Evaluation and Review Technique

P-GERT : Precedence - Graphical Evaluation and Review Technique

PNET : Probabilistic Network Evaluation Technique

$P(i)$: ensemble des activités précédant immédiatement l'activité i

$S(i)$: ensemble des activités qui succèdent immédiatement l'activité i

V : vecteur des périodes j où l'activité i est en progrès

t : temps de résolution

T : durée du projet

V_p : ensemble d'activités d'un projet p

y_i : durée réelle de l'activité i

Y_i : durée planifiée de l'activité i

Z : ensemble des zones de travail

$\alpha(i)$: niveau critique de l'activité i

$\alpha(\pi_j)$: niveau critique du chemin j

ε_i : période requise pour compléter tous les prédécesseurs de l'activité i

Ω_i : longueur du chemin le plus long des activités succédant à l'activité i

π_j : durée du chemin j du réseau d'activités

τ : durée minimum du projet

ξ : ensemble des activités admissibles

ψ : ensemble des activités non débutées et non admissibles

LISTE DES ANNEXES

Annexe I: Programme OVERPLAN.....	157
Annexe II: Expérimentation - cas déterministe	185
Annexe III: Expérimentation - cas stochastique.....	195
Annexe IV: Description du cas pratique.....	205

AVANT-PROPOS

Cette thèse s'adresse à la planification des projets de réfection. Le choix du sujet fut initialement proposé par le Major Yves Turgeon des Forces canadiennes. Agissant comme officier des opérations au 202e Dépôt d'ateliers de la Garnison de Longue-Pointe, le Major Turgeon m'a fait prendre connaissance des difficultés de planification rencontrées lors des projets de réfection de l'usine. La problématique me parut des plus intéressantes d'autant plus que la littérature scientifique n'a jamais exploré en profondeur le sujet. Étant moi aussi appelé à travailler au 202e Dépôt d'ateliers à la suite de mes études, cette proposition de sujet de recherche fut rapidement acceptée.

Avec les conseils de mon directeur de recherche, Monsieur Laurent Villeneuve, et en considérant les implications sur mon travail futur, il fut rapidement décidé d'orienter la recherche sur le côté pratique. La thèse ici présentée vise ainsi à proposer un modèle applicable à des projets réels de réfection. J'espère que le modèle proposé dans cet ouvrage servira d'outil pour les entreprises de réfection canadiennes.

INTRODUCTION

Un projet de réfection consiste à remettre en état un équipement en réparant et en remplaçant une grande partie de ces composants. On retrouve dans la littérature de nombreux modèles pour assister le gestionnaire d'équipements à définir le moment d'exécution et l'envergure des travaux de maintenance à réaliser lors d'un tel projet. Cependant, peu de recherches assume la perspective de l'entreprise responsable d'effectuer les travaux de réfection (Gorgone 1992). Conséquemment, la majorité des entreprises de réfection n'utilise aucune procédure pour évaluer l'impact des risques associés aux projets de réfection. En pratique, il en résulte de fréquents retards de livraison.

Cette recherche s'attaque à cette problématique en proposant une méthode de planification spécifique aux projets de réfection. La méthode proposée vise ainsi à établir un échéancier de manière plus précise que les techniques de planification de projets actuels.

Étant donné la diversité des projets de réfection, cette recherche se restreint à la planification de réfection d'équipements en mode de gestion de projets. Ce type de réfection nécessite une charge de travail relativement importante et se réalise sur une période de plusieurs semaines. L'entreprise responsable d'effectuer les opérations de réfection entreprend ainsi un nombre peu élevé de réfections annuellement. La réfection d'avions militaires et commerciaux, de locomotives, de véhicules blindés sont des exemples de projets visés par cette recherche.

La démarche utilisée au cours de cette recherche se divise en quatre étapes distinctes. La recherche a d'abord débuté par l'exploration et la définition de la problématique. Pour ce

faire, plusieurs entreprises oeuvrant dans le domaine de la réfection ont été approchées afin d'identifier les facteurs responsables des difficultés de planification. La définition de la problématique fut finalisée avec une recherche bibliographique du sujet. À ce propos, il faut noter que la littérature sur la planification de projets de réfection est très limitée en raison du développement récent de cette industrie.

Par la suite, la recherche s'est concentrée sur la revue et l'analyse des modèles de planification de projets. Les lacunes des modèles actuels dans un environnement de réfection ont ainsi été soulignées.

La troisième étape de la démarche représente le coeur de la recherche. Elle consiste à construire un modèle de planification adapté aux besoins d'un projet de réfection. Elle comprend d'abord la modélisation d'un projet de réfection sous la forme d'un réseau d'activités. Puis, cette étape s'est poursuivie avec le développement d'un algorithme d'affectation dynamique des ressources et d'une procédure de simulation pour l'évaluation de la durée d'un projet. Le modèle développé fut par la suite testé avec une série de 300 projets de réfection générés de façon aléatoire ainsi qu'avec un cas pratique. La qualité des résultats obtenus lors de la phase d'expérimentation a encouragé la généralisation du modèle à un environnement multi-projet.

CHAPITRE I

INTRODUCTION À LA RÉFECTION D'ÉQUIPEMENTS

1.1 Introduction

La réfection est une action de maintenance qui vise à remettre en état un équipement dont la condition s'est détériorée avec l'âge. En général, la réfection est effectuée sur des pièces d'équipements de grande valeur. Ainsi, l'industrie de la réfection se retrouve en majorité dans le domaine du transport. Cette industrie est solidement implantée au Canada, notamment dans le secteur aérospatial où plusieurs entreprises effectuent la réfection d'avions ou de moteurs d'avion dans la région métropolitaine de Montréal (Québec). Aux États-Unis seulement, le marché de la réfection et de la maintenance dans le domaine du transport aérien était évalué à quelques 4.2 milliards de dollars américains en 1988. Cette industrie y génère plus de 66 000 emplois (Heany et al. 1988).

Ce premier chapitre introduit d'abord les caractéristiques d'un programme de maintenance. Une description plus détaillée du processus de réfection est par la suite présentée afin d'en préciser le rôle dans un programme de maintenance. Ce chapitre se termine par la description de la problématique étudiée.

1.2 Description d'un programme de maintenance

La maintenance comprend *"l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé"* (AFNOR NF

X 60-010). Un programme de maintenance comprend ainsi un ensemble d'actions de nature corrective ou préventive (Lyonnet 1988). La maintenance corrective s'applique à la suite d'une défaillance. À l'opposé, la maintenance préventive ne requiert pas l'apparition d'une panne. Elle vise plutôt à diminuer la probabilité d'occurrence d'une panne en effectuant des actions planifiées. Elle s'appuie sur la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle. La maintenance systématique consiste à remplacer des éléments jugés trop usagés selon un échéancier déterminé. La maintenance conditionnelle demande d'effectuer un diagnostic avant de changer l'élément étudié.

En plus de la nature des interventions, les actions de maintenance sont classées en plusieurs niveaux selon l'envergure des travaux.

1.2.1 Les niveaux de maintenance

Les actions de maintenance se regroupent en cinq niveaux distincts (AFNOR X 60 011):

- 1^{er} niveau: Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage d'équipement, ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité;
- 2^e niveau: Dépannages par échange-standard d'éléments prévus à cet effet, ou d'opérations mineures de maintenance préventive;
- 3^e niveau: Identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures;
- 4^e niveau: Travaux importants de maintenance corrective ou préventive; et

5^e niveau: Travaux de rénovation, de reconstruction, ou réparations importantes confiées à un atelier central.

La réfection d'équipements est définie par le cinquième niveau de maintenance. Monchy (1987) fait remarquer que ce niveau est le seul à exiger une équipe complète et polyvalente pour effectuer l'ensemble des tâches requises. Le nombre et la diversité de ces tâches s'accomplissent d'ailleurs par des moyens proches de la fabrication originale de l'équipement. La réfection représente, dans la majorité des cas, la seule activité d'un programme de maintenance qui est réalisée à l'extérieur de l'entreprise. Le moment de son exécution dépend de la détérioration de l'équipement et est spécifié par des études de fiabilité. Les modèles consacrés à la détermination du moment d'exécution de la réfection tentent soit de minimiser les coûts totaux de l'équipement, incluant les coûts de maintenance et d'acquisition, ou de maximiser la durée de vie utile de l'équipement (Hariga 1994; Hasting 1970; Jardine 1973; Sule et Harmon 1979).

1.2.2 Le rôle de la réfection au sein d'un programme de maintenance

De façon générale, la réfection d'équipements consiste à remettre à neuf l'ensemble des composants d'un équipement. Les termes *remise à neuf* et *reconstruction* sont utilisés de façon équivalente. Afin d'éviter les écarts d'interprétation, nous considérons la réfection comme *l'action de remettre à neuf l'ensemble d'une pièce d'équipement en améliorant sa condition générale et ainsi prolonger sa vie utile*. L'expression *pièce d'équipement* est ici utilisée sans restriction et peut désigner une machine, un moteur d'avion, un véhicule blindé, etc.

La majorité des travaux de réfection est exécutée de manière préventive pour améliorer la condition d'un équipement et ainsi éviter une panne imminente ou prévisible (Blanks 1992). Ce type de réfection est appelé *révision générale* (Jabot 1969). Une proportion moins importante des travaux de réfection consiste à remettre en état l'ensemble d'un équipement endommagé à la suite d'une panne majeure. En général, moins de 10 % des travaux de réfection sont réalisés dans un but strictement correctif.

La réfection peut également être réalisée pour des besoins de modernisation. La *modernisation* implique un changement par rapport au design courant de l'équipement. Elle consiste à remplacer des composants désuets par des composants d'une génération technologique nouvelle. Cette mise à jour ne s'applique habituellement que sur un nombre limité de composants. Bien que la modernisation exige une gamme de tâches différente des travaux normaux de réfection, elle est souvent reliée ou comprise à l'intérieur d'une réfection planifiée. Des travaux de réfection sont rarement entrepris dans le seul but de moderniser l'équipement (Monchy 1987).

La réfection se distingue des activités courantes de maintenance préventive et corrective au niveau de la charge de travail. La réparation se concentre uniquement sur les composants ou les modules de l'équipement responsables du bris ou de la panne. De la même façon, les activités de maintenance préventive sont effectuées sur un nombre limité de composants. À l'opposé, la réfection comprend la remise à neuf de l'ensemble de l'équipement et s'effectue généralement en réparant ou en remplaçant les composants jugés désuets, non opérationnels ou sur le point de l'être. La remise à neuf nécessite donc une inspection complète de l'équipement. Les objectifs de la réfection sont nombreux.

1.2.3 Les objectifs de la réfection

La réfection d'équipement est d'abord souhaitable pour améliorer la condition générale d'un équipement. Elle cherche à:

- prévenir des pannes éventuelles;
- améliorer la performance de l'équipement;
- réduire les coûts subséquents de maintenance; et
- rendre le fonctionnement de l'équipement plus sécuritaire pour les opérateurs.

La réfection d'un équipement permet d'atteindre sensiblement les mêmes objectifs que ceux visés par le remplacement d'un équipement. La réfection offre cependant de nombreux avantages.

Confrontée à l'option de remplacement, la réfection d'équipements représente une solution viable à cause de l'importance moindre de son investissement initial. Les propos de Monchy (1987) témoignent de cette réalité:

" Une machine reconstruite revient de 40 à 70 % de son prix de remplacement à neuf. Cette technique se développe dans la conjoncture économique actuelle: "faire du neuf avec du vieux" ne correspond pas forcément à une attitude dépassée, ou à du "bricolage", mais à une adaptation réaliste à des contraintes économiques sévères."

À titre d'exemple, l'usine de réfection de Northwest Airline (Atlanta, États-Unis) remet à neuf un moteur d'avion pour la somme de 425 000 \$ (dollars américains). Un tel moteur en coûterait approximativement 1.4 \$ million s'il était acheté aujourd'hui (Plating and Surface Finishing 1990).

En plus d'une réduction des investissements, la réfection d'équipements permet de garder du matériel qui fût largement testé au sein même de l'entreprise. De cette façon, elle évite aux opérateurs et aux techniciens de maintenance d'entreprendre des programmes de formation souvent coûteux et de longue durée. Il n'est donc pas surprenant de constater un intérêt croissant pour la remise à neuf d'équipement.

1.3 Description du processus de réfection

Malgré la diversité des types d'équipements assujettis à la réfection, les processus caractérisant les opérations de réfection sont d'une grande similarité. Le cheminement de la remise à neuf comprend généralement l'inspection, le démontage, la réparation des pièces ou des modules défectueux, l'exécution des tests fonctionnels pour se terminer avec l'assemblage (Marson et Poulin 1993; Ouellet 1988; Plating and Surface Finishing 1990). Des opérations de peinture et de décapage peuvent aussi être incluses à l'intérieur d'un projet de réfection. Les différences entre les projets apparaissent dans la façon d'exécuter les travaux de réparation et de remplacement.

1.3.1 Les modes de réfection

Comme pour les actions de maintenance préventive, les procédés de réfection se divisent en deux modes de remise à neuf:

1. La réfection *systématique*; et
2. La réfection *au besoin*.

La *réfection systématique* ou *réfection complète* consiste à remplacer et à réparer un ensemble prescrit de pièces et de modules pour l'ensemble des équipements touchés par la réfection. Ce mode de réfection oblige l'exécution d'un ensemble identique d'opérations pour chacun des équipements remis à neuf. L'équipement et ses modules sont d'abord démontés, puis les composants usés sont remis à neuf ou remplacés par des nouveaux composants. Les caractéristiques de l'équipement ainsi reconstruit se rapprochent des caractéristiques d'un équipement neuf.

Comme on procède au remplacement de pièces ou de modules sur chacun des équipements, il n'est pas nécessaire de procéder à des réparations pour les pièces défectueuses. Il est ainsi possible d'estimer de façon relativement précise le temps nécessaire pour exécuter chaque opération. Cette technique de réfection est habituellement employée pour des équipements relativement peu dispendieux et peu complexes.

La *réfection au besoin* tient compte de l'état spécifique de chacun des composants de l'équipement remis à neuf. La réfection au besoin est aussi désignée par les acronymes

IRAB (Inspection et Réparation Au Besoin) et IROAN (Inspect and Repair Only As Necessary) au sein des Forces armées. Comme le nom l'indique, les opérations de remplacement ou de réparation sont effectuées selon les besoins de l'équipement concerné. Le nombre d'opérations exécutées varie donc d'un équipement à l'autre. Ce mode de remise à neuf comprend, à la fois, des actions systématiques et conditionnelles de maintenance.

Aujourd'hui, l'emploi du terme *réfection* signifie d'emblée la réfection au besoin. Ce mode de réfection est utilisé pour plusieurs raisons.

1.3.2 Les avantages de la réfection au besoin

La forte utilisation de la réfection au besoin s'explique par les avantages qu'elle procure comparativement à la réfection par remplacement et ce, tout en atteignant les mêmes résultats. La réfection au besoin est principalement utilisée pour réduire les coûts de réfection. Jim Rigby, de la compagnie Aviall, mentionne que l'augmentation du pourcentage de pièces réparées est la principale responsable de la baisse des coûts de réfection au cours des dernières années (Aviation Week & Space Technology 1987). Les résultats du projet de réfection des transporteurs de troupe blindés canadiens M113, entrepris au 202 Dépôt d'Atelier (Montréal, Québec), abondent dans ce sens. Une réduction des coûts de l'ordre de 30% fut réalisée avec l'utilisation du mode de réfection IRAB (Marleau 1989).

En plus de la réduction des coûts de réfection, il semble que certains assemblages ont tendance à mieux fonctionner lorsque les pièces originales reconstruites sont réutilisées.

Ces dernières se sont usées ensembles et ont déjà prouvé qu'elles formaient un ensemble fonctionnel (Aviation Week & Space Technologie 1987).

Finalement, la réparation des pièces usées diminue grandement les besoins en inventaire. La disponibilité des nouvelles pièces est d'ailleurs problématique pour les organismes militaires. Les véhicules militaires sont généralement utilisés pour des périodes supérieures à 20 ans. Il devient donc difficile d'obtenir des pièces neuves lors du moment de la réfection; les fabricants ayant auparavant annulé la production de pièces incompatibles avec leurs nouveaux modèles. À moins de fabriquer elle-même ces pièces, l'entreprise de réfection se voit dans l'obligation d'utiliser les pièces originales. La réfection au besoin devient donc une alternative souhaitable et nettement plus économique que la fabrication de pièces neuves à l'interne. Le coût unitaire de fabrication de ces pièces s'élève rapidement car la demande sporadique de celles-ci écarte la possibilité de produire par lots.

Malgré les nombreux avantages de la réfection au besoin, la réalisation de celle-ci entraîne de nombreux problèmes au niveau de la planification des activités. La problématique entourant la planification des activités de réfection est introduite à la prochaine section.

1.4 Description de la problématique

La problématique entourant la réfection au besoin d'équipements est directement reliée à la nature stochastique des opérations. Contrairement aux travaux de remplacement, la durée des activités de réparation varie d'un projet à l'autre en raison de la condition unique de chaque équipement. Le niveau d'expertise des techniciens affectés aux travaux de

réparation influence aussi la durée des travaux. Toutes ces variations compliquent inévitablement l'établissement d'un échéancier.

1.4.1 La nature stochastique des opérations de réfection

La réalisation d'une opération de remise à neuf est sujette à de nombreuses fluctuations. La charge de travail dépend directement de la condition de l'équipement et varie donc d'un équipement à l'autre (Ouellet 1988). Gorgone (1992) divise la charge de travail d'une réfection en trois composantes: les réparations initialement autorisées par le propriétaire de l'équipement, les travaux supplémentaires causés par un changement d'envergure de ces mêmes réparations et les travaux non planifiés occasionnés par des imprévus. La première composante est clairement définie avant de démarrer le projet. Le contenu des deux autres composantes est cependant aléatoire. En pratique, une enveloppe budgétaire est simplement allouée pour permettre d'effectuer ce surplus de travail. Cette façon de faire comporte de nombreux risques.

Premièrement, il n'est pas possible d'inclure directement les travaux supplémentaires dans le calcul de l'échéancier. Les responsables de la planification doivent augmenter la durée des activités autorisées initialement pour s'assurer qu'un changement d'envergure des travaux ne compromette pas l'échéancier du projet. Cette procédure de planification repose uniquement sur l'expérience du planificateur et ne permet pas assurément d'obtenir un échéancier réalisable.

Également, l'apparition d'imprévus sur des composants exclus du projet de réfection bouleverse le processus de réfection. Ces travaux ne sont pas définis à l'intérieur du projet

par des activités indépendantes. L'unité de production doit généralement demander l'autorisation du propriétaire de l'équipement pour effectuer les travaux nécessaires non planifiés. Lorsqu'ils sont autorisés, ces travaux dérangent le déroulement normal du projet en augmentant la charge de travail et en modifiant la séquence de l'ensemble des opérations (Smith 1989). L'impact d'un imprévu sur le déroulement d'un projet dépend principalement de l'information existante sur ce dernier.

1.4.2 Description des imprévus

Un imprévu représente une défectuosité non-planifiée de l'équipement remis à neuf. Il n'existe donc aucun travail planifié a priori pour remédier à cette défectuosité. Les imprévus peuvent faire l'objet ou non d'une méthodologie de travail existante. Les imprévus avec méthodologie correspondent à des défectuosités connues par l'unité de production ayant déjà été étudiées et où des solutions techniques ont été élaborées. À l'opposé, un imprévu sans méthodologie constitue un bris jusqu'alors inconnu par les responsables de la réfection. Un tel imprévu nécessite une analyse de la part du personnel de l'ingénierie afin de déterminer des mesures correctives (Beaulieu et al. 1994).

Chaque imprévu engendre ainsi une charge de travail supplémentaire. Les entreprises de réfection reconnaissent habituellement cette situation en planifiant dès le lancement d'un projet une charge de travail additionnelle mais non-définie (Gorgone 1992). Celle-ci est évaluée à partir des données historiques de l'entreprise. La planification a priori d'une charge de travail non-définie mais quantifiée permet ainsi d'élaborer un budget plus réaliste.

Bien que cet ajout semble adéquat, il ne permet pas de représenter efficacement le déroulement du projet. La charge de travail est habituellement représentée par une activité supplémentaire commençant par le début des travaux et se terminant avec la fin du projet. L'affectation des ressources, pour cette activité, se fait donc de façon uniforme sur toute la durée des travaux. En réalité, la demande en ressource pour les travaux non planifiés varie tout au long du projet. L'apparition aléatoire des imprévus force à revoir constamment l'ordonnancement des tâches en cours de projet.

De plus, les imprévus sans méthodologie peuvent nécessiter l'intervention des départements de l'ingénierie, de la planification et de la fabrication (atelier d'usinage) pour les résoudre (Beaulieu et al. 1994). Turgeon (1992) décrit en détail la procédure suivie pour l'usinage d'une pièce dans un environnement de réfection. L'ingénierie doit d'abord étudier le problème puis recommander une procédure pour la fabrication d'une nouvelle pièce. Après l'acceptation de la procédure, la planification doit procéder à l'ordonnancement des tâches et à la commande des matériaux choisis. La période allouée pour la fabrication d'une pièce doit comprendre du temps pour la préparation des outils et des machines nécessaires, le transport, la fabrication et le contrôle de la qualité. Le temps de fabrication est habituellement long en raison du caractère unique de chaque pièce. Pendant cette période, les travaux effectués à l'endroit où est apparue la défaillance non-planifiée peuvent être interrompus. Les ateliers de support ont ainsi un impact direct sur le déroulement des travaux de réfection. Plourde et Bissonnette (1987) et Turgeon (1992) ont d'ailleurs identifié l'atelier d'usinage comme un goulot d'étranglement pour l'usine de réfection du 202 Dépôt d'Atelier des Forces canadiennes, Montréal (Qué.). Ceci semble être le cas pour d'autres usines de remise à neuf.

1.4.3 Limitations des méthodes de planification actuelles

À cause de la nature stochastique des activités et de l'apparition d'imprévus au cours d'un projet de réfection, l'établissement d'un échéancier réalisable est une tâche particulièrement difficile. La littérature suggère couramment l'utilisation des techniques de gestion de projets comme le CPM et le PERT pour planifier l'ensemble des tâches d'une remise à neuf (Casillo 1990; Mann 1976; Price 1989). Cette approche semble adéquate pour des projets où le contenu des tâches est connu avec précision. Le CPM fut d'ailleurs proposé à l'origine par la compagnie Dupont pour planifier la révision générale de ses usines chimiques. Ces techniques sont cependant déficientes dans le cas de projets plus complexes. Elles ne tiennent pas compte de tous les éléments de risque compris lors de tels projets. Elles ne considèrent pas non plus les activités exécutées par les unités de support. Les techniques CPM et PERT tendent ainsi à sous-estimer la durée nécessaire pour exécuter l'ensemble des travaux. Des entrevues menées auprès de firmes québécoises¹ montrent que les délais de livraison pour les projets de réfection d'équipement complexes sont respectés dans moins de 40 % des cas.

De plus, l'affectation des ressources est basée sur le chemin critique préalablement déterminé par les méthodes de planification. Cette affectation est faite de façon déterministe et représente une utilisation non optimale. En effet, les imprévus entraînent constamment des changements du chemin critique. La priorité accordée aux activités jugées initialement critiques force l'affectation de ressources au mauvais endroit (Pellerin et al. 1994). Les activités réellement critiques sont alors reléguées au second plan. Le

¹ Des représentants des firmes Air Canada (Dorval), Canadair (Mirabel) et le 202 DA des Forces canadiennes (Montréal) ont participé à des entrevues ouvertes.

projet enregistre ainsi un retard immédiat et irrécupérable.

Les conséquences de l'apparition d'imprévus au cours de la réfection affectent à la fois l'échéancier d'un projet unique et l'échéancier maître. Ne pouvant déterminer avec précision la durée des travaux et les besoins en ressources pour un projet unique, il devient difficile d'évaluer les besoins réels pour l'ensemble des projets. La planification stratégique des opérations est évidemment difficile. Cette dernière est cependant essentielle pour déterminer les meilleures conditions d'opération de l'unité de production (capacité de production, capacité des unités de soutien telles l'ingénierie, la planification et la fabrication).

1.5 Conclusion

La réfection d'un équipement comporte un niveau de complexité et un investissement plus élevés que tout autre activité de maintenance. Il est donc normal de consacrer un effort important à sa planification. La réalisation d'activités de réfection est marquée de nombreux imprévus ce qui complique considérablement la planification d'un tel projet. Une évaluation précise des besoins de réfection est cependant nécessaire pour éviter d'entraîner des coûts additionnels et de prolonger inutilement la durée d'un projet. Les méthodes actuelles de planification de projets ne permettent pas d'établir un échéancier réalisable pour des projets complexes de réfection. La recherche suivante vise à proposer une alternative adaptée spécialement à ce genre de projet. Avant de décrire l'approche développée, une revue des modèles de planification de projet est présentée au chapitre suivant.

CHAPITRE II

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Les systèmes de gestion de production utilisés se distinguent par la complexité des items produits et la nature répétitive de la production. Vollman et al. (1988) reconnaissent cinq approches de gestion de production, soit la gestion de la production de type continu (flow-oriented process), la production en ligne ou à répétition, les approches de types JIT (Just-in-Time) et MRP (Material Requirements Planning) et finalement, la gestion de projets. Cette dernière approche est dédiée à la planification de projet unique comportant des niveaux de complexité et d'envergure plus importants que la production manufacturière moyenne. Cette recherche se concentre sur ce type d'environnement.

Le terme *projet* désigne ici un travail, un ouvrage de génie plus ou moins complexe, composé de plusieurs tâches en corrélation, accompli par un ou plusieurs spécialistes, et possédant un objectif précis, un échéancier défini et un budget déterminé (Lebeau, 1992). La réfection représente, comme pour toute activité majeure de maintenance, "une réalisation importante, non répétitive, limitée dans le temps, ayant un objectif déterminé et nécessitant l'engagement de ressources variées" (AFITEP, 1991). Le caractère unique et la complexité des travaux rendent donc l'utilisation des techniques de gestion de projets propice à la gestion d'un nombre important de projets de réfection.

Ce deuxième chapitre présente une revue des méthodes de planification de projets. Les modèles déterministes, stochastiques, généraux et d'ordonnancement sont décrits. Mais

avant d'exposer ces modèles, la modélisation d'un projet de réfection sous la forme d'un réseau d'activités est présentée.

2.2 Modélisation d'un projet de remise à neuf

La planification est une fonction intégrante de la gestion de projets où elle permet de définir une ligne de conduite pour atteindre ces objectifs. Elle sert ainsi à la coordination et au contrôle de l'ensemble d'un projet en déterminant un échéancier et un estimé budgétaire (Lebeau 1992). Les modèles de planification nécessitent d'abord la représentation des contraintes d'un projet sous forme d'un réseau d'activités.

2.2.1 Définition du réseau d'activités

Un projet comprend un ensemble A d'activités ordonnées par des relations d'antériorité et de succession. La relation d'antériorité $i < j$, appelée *contrainte potentielle* ou *conjonctive*, indique que l'activité j ne peut débiter avant que l'activité i ne soit complétée. Le réseau d'activités permet de représenter ces contraintes par un graphe acyclique dirigé et connecté, $G(V,A)$, où $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ est l'ensemble des événements du réseau et $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ est l'ensemble des activités. On suppose généralement qu'il est possible d'associer à chacune des activités $a_i \in A$ une durée fixe y_i . La durée doit être évaluée en assumant une disponibilité illimitée des ressources. On suppose aussi qu'une activité ne peut être interrompue lorsque démarrée. Les activités du réseau sont donc non morcelables et la fin de l'activité i , soit f_i , est donnée par:

$$f_i = t_i + y_i \quad (2.1)$$

où t_i représente le début de l'activité i .

Les contraintes d'un projet de remise à neuf consistent essentiellement en des contraintes d'antériorité, de zones et de ressources.

2.2.1.1 Contraintes d'antériorité

Les contraintes d'antériorité sont généralement définies en utilisant des variables binaires (0 ou 1) pour indiquer les activités en progression. Notons donc par la variable binaire x_{ij} le début de l'activité i à la période j . Par définition, la variable x_{ij} prend les valeurs suivantes:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= 1, & \text{si l'activité } i \text{ débute à la période } j; \\ x_{ij} &= 0, & \text{autrement.} \end{aligned}$$

En considérant seulement l'ensemble des activités qui succèdent immédiatement l'activité i , $P(i)$, les contraintes d'antériorité sont représentées par:

$$\sum_j x_{ij} = 1 ; \quad (2.2)$$

$$\text{et} \quad \sum_j j \cdot x_{ij} - \sum_j j \cdot x_{vj} \geq t_v ; \quad \text{pour tout } i \in A \text{ et pour tout } v \in P(i) \quad (2.3)$$

Comme chaque activité n'est débutée qu'une seule fois, la contrainte (2.3) indique simplement qu'une activité k succédant immédiatement à i ne peut débuter avant la fin de i , soit $x_k \geq x_i + t_i$.

2.2.1.2 Contraintes de zones

En plus de leur séquence, les activités doivent donc être coordonnées en tenant compte de leur localisation physique sur l'équipement (Moen 1985; Sterns 1989). L'entreprise de réfection doit effectivement composer avec un équipement existant. Une grande proportion des travaux est exécutée sur la structure principale de l'appareil remis à neuf. Les contraintes d'espaces de travail, appelées *contraintes de zones*, limitent ainsi le nombre d'opérations et le nombre de ressources employées simultanément.

L'espace de travail occupé par les travailleurs lors de la réalisation d'une activité influence l'exécution d'activités simultanées à différents degrés. La dépendance des activités en terme des espaces de travail peut être décrite en définissant un ensemble de zones de travail $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$. Ainsi, lorsqu'une activité débute à la période j , l'activité occupe la zone r pour les périodes $j, j+1, j+2, \dots, j+t-1$. Pour chaque activité i , il est possible de former le vecteur V_{ij} de dimension H pour représenter les périodes où l'activité est en progrès. Le vecteur V_{ij} prend la valeur 1 aux positions $j, j+1, j+2, \dots, j+t-1$ et 0 ailleurs. Le vecteur de disponibilité des zones est donné par le vecteur unitaire M . Les contraintes de zones sont alors données par:

$$\sum_{i \in A} \sum_j x_{ij} V_{ij} \leq M \quad (2.4)$$

2.2.1.3 Contraintes de ressources

Les contraintes de ressources jouent également un rôle prédominant lors de l'exécution d'une remise à neuf. La modélisation de ces contraintes se rapproche de celle des contraintes des zones. Notons le nombre d'employés requis pour compléter l'activité i par r_i et le vecteur de disponibilité des ressources par $R = (r_1, r_2, \dots, r_I)$. En supposant qu'une activité i requiert r_i employés pour toute sa durée, les contraintes de ressources sont alors données par:

$$\sum_{i \in A} \sum_j x_{ij} r_i V_{ij} \leq R \quad (2.5)$$

2.2.2 Construction du réseau d'activités d'un projet de réfection

Traditionnellement, les composants d'un équipement sont installés par système. Ainsi, le réseau d'activités est construit en déterminant l'ensemble des systèmes touchés par la remise à neuf. Afin de ne pas encombrer la structure principale de l'appareil, le planificateur doit, en plus, ajouter des relations de succession fictives entre les activités pour imposer une séquence quelconque. La séquence des activités sur la structure principale, ainsi imposée par le planificateur, représente dans la majorité des cas, le chemin critique d'un projet de réfection (Ouellet 1988).

L'approche ZORO (Zone Outfitting in Repair and Overhaul) cherche à éliminer la dépendance entre les systèmes de l'équipement et la disponibilité de la structure principale. L'approche consiste essentiellement à définir un projet en terme des zones de travail plutôt qu'en fonction des systèmes de l'équipement. La construction du réseau d'activités doit ainsi débiter par la définition des zones de travail. Ceci permet, dans un deuxième temps, d'orienter l'énumération des tâches en fonction des aires de travail plutôt qu'en fonction des systèmes ou des modules d'un équipement (Moen 1985).

L'énumération des tâches en fonction des zones réduit le contenu des activités d'un projet et tient compte des interférences réelles entre les différentes tâches au niveau des espaces de travail. Les travaux de réparation d'un système occupant une grande surface (i.e. les systèmes hydrauliques, les conduites de carburant, ...) sont ainsi décomposés plus en détail en fonction des zones de travail choisies. La réduction du contenu des activités et du nombre de relations artificielles d'antériorité permet de réduire la durée du chemin critique. En pratique, Moen (1985) rapporte une baisse moyenne de la durée des projets de 30 %.

2.2.3 Programmation du réseau

L'élaboration du réseau permet de saisir a priori les relations entre les activités et de rassembler toutes les données pertinentes au projet. À partir de ces informations, la production d'un échéancier est réalisée par la programmation du réseau. Il existe de nombreuses méthodes pour établir un échéancier. Les modèles de planification dépendent de la nature des activités et des types de contraintes associées au projet. Elmaghraby (1977) classe les modèles de planification de projets en quatre catégories: le modèle

déterministe (DAN: Deterministic Activity Networks), les modèles stochastiques (PAN: Probabilistic Activity Networks), les modèles généraux (GAN: General Activity Networks) et les modèles d'ordonnancement. Ces modèles sont décrits dans les sections suivantes.

2.3 Le modèle déterministe

Le modèle déterministe classique est connu par l'appellation CPM (Critical Path Method). Le CPM ou la méthode du chemin critique représente la méthode de planification de projets la plus répandue. Le CPM fut originalement développé pendant les années 1958 et 1959 par la compagnie Dupont pour la planification de ces projets majeurs de remise à neuf des usines chimiques. Le CPM suppose des durées fixes pour chacune des activités et se veut donc un modèle déterministe.

La planification par le CPM, comme pour les autres méthodes de planification de projets, comprend deux phases distinctes: l'élaboration du réseau et la programmation. La programmation ajoute la dimension temps au réseau en assignant une date de début et une date de fin à chacune des activités. Le calcul de l'échéancier par le CPM ne tient pas compte du nombre de ressources disponibles. En pratique, le nombre de ressources affectées à un projet est limité. Il est donc nécessaire de procéder à l'affectation des ressources à la suite du calcul du CPM.

2.3.1 L'algorithme du CPM

L'algorithme de calcul établit l'échéancier en calculant d'abord les dates de réalisation au plus tôt (passe avant) puis les dates de réalisation au plus tard (passe arrière) pour toutes les activités. Le CPM identifie quatre dates pour chaque activité, soit:

ES_i : date de départ au plus tôt de l'activité i ;

EF_i : date de terminaison au plus tôt de l'activité i ;

LS_i : date de départ au plus tard de l'activité i ; et

LF_i : date de terminaison au plus tard de l'activité i .

Notons $P(j)$ comme l'ensemble des activités précédant immédiatement l'activité j et $S(j)$ comme l'ensemble des activités qui la succède immédiatement. La durée de l'activité i , y_i , est une constante. Les dates de départ et de fin au plus tôt de l'activité j sont données par:

$$ES_j = \max_{i \in P(j)} \{ES_i + y_i\} ; \quad ES_1 \equiv 0 ; \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (2.6)$$

$$EF_j = ES_j + y_j ; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.7)$$

Une manière efficace de calculer les dates au plus tôt consiste à numéroté d'abord les activités de sorte que chaque activité ait un numéro plus grand que tous ces prédécesseurs. Après la numérotation, les dates au plus tôt sont calculées successivement pour $j = 2, 3, \dots, n$ avec les équations (2.6) et (2.7). La date de terminaison au plus tôt de l'activité n , τ , correspond à la durée du projet. De façon similaire, les dates au plus tard sont obtenues par:

$$LF_j = \min_{i \in S(j)} \{LF_i - y_i\} \quad ; \quad LF_n = \tau \quad ; \quad j = n-1, n-2, \dots, 1 \quad (2.8)$$

$$LS_j = LF_j - y_j \quad ; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.9)$$

2.3.2 Définition des marges et des activités critiques

Les dates au plus tôt et au plus tard permettent de calculer l'excédent de temps entre le temps alloué pour débiter et terminer une activité et sa durée. Cet excédent est défini selon trois types de marges: la marge totale, la marge libre et la marge d'interférence.

La marge totale indique le temps qu'une activité peut être retardée ou prolongée sans retarder la date prévue de terminaison du projet. Une activité possédant une marge totale nulle est appelée activité critique. L'ensemble des activités critiques d'un réseau forme le chemin critique et est directement responsable de la durée totale du projet. Comme un retard dans l'une de ces activités entraîne automatiquement un retard identique pour l'ensemble du projet, les activités critiques doivent être surveillées de près lors de la réalisation du projet. La marge libre indique le temps qu'une activité peut être retardée ou prolongée sans retarder le départ au plus tôt de l'activité qui suit. La marge d'interférence représente la différence entre la marge totale et la marge libre.

2.3.4 Limitations du CPM pour un projet de réfection

Le CPM suppose des durées fixes. Dans un projet de réfection, le temps de réalisation d'une activité dépend de la condition de l'équipement remis à neuf ainsi que de l'expertise du personnel affecté à cette tâche. De plus, la charge de travail pour l'ensemble d'un projet de réfection est constamment modifiée à mesure que le projet progresse. Les suppositions du CPM ne permettent pas de représenter la nature stochastique des activités de réfection et tendent à sous-estimer la durée totale du projet comme indiquée dans la description de la problématique au chapitre précédent. La planification d'activités aléatoires comme celles de réfection nécessite plutôt l'utilisation d'une approche stochastique.

2.4 Les modèles stochastiques

Les modèles stochastiques supposent des durées variables pour les activités d'un projet. Contrairement au modèle déterministe, ces modèles ne cherchent pas à définir un échéancier fixe. Ils tentent plutôt d'évaluer la distribution de la durée du projet. Cette évaluation se fait généralement en identifiant la durée de l'ensemble des chemins compris à l'intérieur du réseau d'activités. Tous les chemins du réseau, $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_J$ débutent avec l'activité de départ et se terminent avec l'activité de terminaison du projet. La durée d'un chemin est calculée en additionnant la durée de l'ensemble des activités faisant partie de ce chemin. La durée du chemin j , π_j , est alors donnée par

$$\pi_j = \sum_i a_{ij} y_i \quad (2.10)$$

où $a_{ij} = 1$ lorsque l'activité i fait partie du chemin j et $a_{ij} = 0$ autrement.

La durée du projet, T , correspond au chemin possédant la durée la plus longue, soit:

$$T = \max_{1 \leq j \leq J} \left\{ \pi_j \right\} \quad (2.11)$$

La distribution de la durée du projet est définie à partir de l'équation suivante:

$$P\{T \leq t\} = P\left\{ \max_{1 \leq j \leq J} \left\{ \pi_j \right\} \leq t \right\} \quad (2.12)$$

L'évaluation de la distribution de la durée du projet plutôt que le calcul d'une durée déterministe augmente considérablement la complexité du calcul. L'évaluation de cette probabilité est un problème NP-complet même dans le cas simple où les durées des activités sont des variables indépendantes et identiquement distribuées, IID (0,1).

En plus de la distribution de la durée d'un projet, il est utile de connaître la probabilité qu'un chemin et qu'une activité soit critique. Le niveau critique du chemin j , $\alpha(\pi_j)$, et celui d'une activité i , $\alpha(i)$, sont définis respectivement par les équations suivantes:

$$\alpha(\pi_j) = P\left\{ \pi_j \geq \pi_c; \forall c = 1, 2, \dots, J \right\} \quad (2.13)$$

$$\alpha(i) = \sum_j a_{ij} \alpha(\pi_j) \quad (2.14)$$

Les niveaux critiques sont des données particulièrement utiles dans un projet où il existe de nombreuses sources d'incertitude. Ils permettent aux gestionnaires de projets d'identifier les activités les plus susceptibles de devenir critique avant de démarrer les travaux. Ces activités doivent donc être surveillées de proche afin d'identifier le plus rapidement possible des écarts par rapport à l'échéancier visé.

Bien qu'ils ne visent pas directement la planification de projets de réfection, plusieurs travaux de recherche se sont concentrés sur l'analyse de réseaux stochastiques. Ces modèles se distinguent dans leur façon d'évaluer la distribution de la durée d'un projet et le niveau critique des activités. Adlakha et Kulkarni (1989) présentent une revue de la littérature sur ce sujet. Les modèles stochastiques se classent habituellement dans l'une de ces catégories: les problèmes classiques PERT, les analyses exactes, les méthodes d'approximation et de bornes et finalement les modèles de simulation.

2.4.1 La méthode PERT

Le modèle PERT (Program Evaluation and Review Technique) représente le modèle probabiliste de base. Cette technique de planification fut développée par la marine américaine en même temps que le CPM (PERT, 1958). La notion de durée variable utilisée par le PERT nécessite trois estimations de temps pour la durée d'une activité (Weist et Levy 1977):

- a: la durée optimiste qui correspond au temps le plus court pour réaliser l'activité;
- b: la durée pessimiste qui correspond au temps le plus long pour compléter l'activité;

m : la durée la plus probable qui correspond à la durée normale de l'activité.

La méthode PERT assume que chacune des activités est représentée par une distribution Bêta où la durée moyenne T_e , et la variance $\sigma_{T_e}^2$ sont données par:

$$T_e = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (2.15)$$

$$\sigma_{T_e}^2 = \left[\frac{1}{6}(b - a) \right]^2 \quad (2.16)$$

Le chemin critique est déterminé de manière déterministe (CPM) à partir des durées moyennes des activités. En supposant que la durée totale du projet varie selon une distribution normale, la méthode PERT permet d'établir la probabilité de compléter les activités du chemin critique à l'intérieur d'un délai fixé. Ainsi, l'espérance mathématique de la durée du projet est simplement la sommation des durées moyennes des activités critiques.

Le calcul de la durée d'un projet par cette approche fut largement contesté. La considération d'un seul chemin critique est sûrement la lacune la plus importante du modèle classique PERT (Soroush 1994). MacCrimmon et Ryavec (1964) ont démontré que la méthode PERT est toujours biaisée de façon optimiste. Plusieurs auteurs ont proposé différentes possibilités pour remédier à ce problème (par exemple Gallagher 1987; Littlefield et Randolph 1987; Sasieni 1986). Cependant, le modèle PERT sans contraintes de ressources et de zones n'est toujours pas applicable à des projets de réfection. Un modèle stochastique plus souple est nécessaire.

2.4.2 Les méthodes d'analyse exacte

L'approche utilisée par les méthodes exactes consiste habituellement à déterminer la fonction de la durée d'un projet en simplifiant le réseau d'activités de base ou en sélectionnant des distributions adéquates pour les manipulations mathématiques (Fisher et al. 1985; Kulkarni et Adlakha 1986). Ces méthodes sont généralement complexes et se limitent à l'étude de réseaux possédant soit une géométrie particulière ou des distributions de durées précises. De plus, ces modèles ne peuvent pas tenir compte des contraintes de ressources et doivent se limiter à des réseaux d'activités de petite taille. L'application de ces modèles à des projets de réfection avec contraintes de ressources n'est donc pas souhaitable.

2.4.3 Les méthodes d'approximation et de bornes

Les nombreuses limitations des méthodes exactes et de la méthode classique PERT ont dirigé la recherche sur le développement de méthodes d'approximation et de bornes (Ragsdale, 1989). Ces méthodes tentent soit de borner la distribution de la durée d'un réseau stochastique ou d'en faire une approximation (Anklesaria et Dvezner 1986; Dodin 1985a; Dodin 1985b; Dodin et Elmaghraby 1985; Kamburowski 1985; Weiss 1986). De façon similaire, Soroush (1994) et Dodin (1984) ont proposé des méthodes approximatives pour déterminer les chemins critiques les plus probables.

Bien que ces approches soient plus rapides et moins complexes que les méthodes exactes, leur applicabilité pour des projets réels demeure très restreinte. En plus d'exiger plus de connaissances de la part des planificateurs de projets, ces méthodes ne tiennent toujours

pas compte des contraintes de ressources. Dans le cas de projets de réfection, l'utilisation de ces méthodes est donc impraticable, car les contraintes de ressources sont inévitables.

2.4.4 La simulation Monte Carlo

Les méthodes présentées précédemment déterminent la durée d'un projet par résolution mathématique. Les résultats de ces méthodes sont donc considérés comme des solutions *analytiques*. Certains projets sont toutefois trop complexes pour être résolus de cette façon. Ces projets peuvent cependant être étudiés numériquement par l'intermédiaire de la simulation Monte Carlo.

La simulation Monte Carlo est définie par la simulation impliquant l'utilisation de nombres aléatoires générés de façon uniforme, $U(0,1)$, pour résoudre des problèmes déterministes ou stochastiques où l'effet du passage du temps n'est pas considéré (Law et Kelton 1991). Elle fut initialement proposée comme technique de planification de projets par Van Slyke (1963). La nature de la simulation Monte Carlo est statique mais ne pose aucune limitation sur le réseau d'activités étudié. L'utilisation d'activités probabilistes est donc possible et suppose que le réseau d'activités n'est pas unique. Dans ce cas particulier, une probabilité d'occurrence est associée à chaque activité.

Pour un réseau unique, l'approche classique consiste d'abord à fixer une durée pour chaque activité en générant des variables aléatoires provenant des distributions statistiques voulues. Le problème devient alors déterministe et la durée du projet est calculée par le CPM. Cette procédure est répétée à plusieurs reprises. L'ensemble des répliques

permet alors de former une distribution de la durée du projet et d'évaluer la probabilité qu'une activité devienne critique.

La procédure de simulation normalement utilisée pour des projets comportant des éléments de risque diffère quelque peu de l'approche proposée par Van Slyke. Les recherches de Campbell (1972), Crandall (1977 et 1976), Woolery et Crandall (1983) suggèrent l'ajout d'une période tampon à certaines activités d'un projet. Une période tampon représente la conséquence d'un risque (bris, climat difficile, grève, etc.) et a pour effet de prolonger la durée des activités et celle du projet. Le calcul de la durée totale d'une activité se fait en additionnant la durée normale de l'activité et le temps supplémentaire associé aux différentes sources de risque. Toutes ces durées sont générées de manière pseudo-aléatoire.

L'utilisation de cette approche ou de celle de Van Slyke n'est pas adéquate pour l'analyse d'un projet de réfection. Les activités touchées par un bris non prévu peuvent être interrompues pour permettre à l'ingénierie de résoudre le problème. Pendant la période d'arrêt ou de blocage, les ressources peuvent être déplacées vers d'autres activités. Les deux approches proposées ne permettent pas de réaffecter ces ressources dans cette situation mais présument plutôt que les ressources sont utilisées pour toute la durée de l'activité en question. En plus de se concentrer uniquement sur la période de travail nécessaire pour compléter une activité sans considérer l'utilisation des ressources pendant cette même période, les modèles stochastiques de simulation requièrent l'établissement d'un réseau fixe d'activités. La séquence des activités d'un projet de réfection est cependant variable et n'est connue qu'à la fin du projet. Les modèles généraux, qui

reposent eux aussi sur la simulation, offrent plus de flexibilité en permettant d'inclure des activités probabilistes.

2.5 Les modèles généraux

Toutes les méthodes analytiques utilisent la même représentation logique. La séquence des activités est fixe et chaque activité est essentielle à la réalisation du projet. Il existe cependant des projets contenant des incertitudes au niveau de la séquence des activités. Le déroulement de ces projets peut prendre des chemins différents et dépend des résultats obtenus à la suite de certaines activités. Cette situation se présente notamment dans l'exécution de certains projets de recherche. Un réseau fixe ou unique ne peut représenter la vraie nature d'un tel projet. La modélisation d'un réseau probabiliste est donc essentielle à la planification de ces projets.

2.5.1 Représentation d'un réseau stochastique général

Une des premières alternatives de modèle stochastique fut présentée par Freeman (1960) et proposait d'analyser individuellement l'ensemble des réseaux possibles d'un projet. Eisner (1962) simplifia cette méthode en proposant un noeud probabiliste pour représenter graphiquement l'ensemble des alternatives sur le même réseau d'activités. Les différentes alternatives sont modélisées par des arcs débutant au noeud probabiliste et possédant une probabilité d'occurrence comprise entre 0 et 1. Elmaghraby (1964) généralisa le concept de réseau probabiliste en incorporant trois types de noeuds additionnels: les noeuds AND, EXCLUSIVE-OR et INCLUSIVE-OR. La définition de ces noeuds constitue la base du

développement de la méthode GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) à la Rand Corporation par le professeur A.Alan B.Pritsker (Pritsker et Happ (1966) et Pritsker et Whitehouse (1966)).

La méthode GERT utilise à la fois des noeuds déterministes et probabilistes et permet d'assigner des durées aléatoires. Pour chaque noeud probabiliste, il existe quatre possibilités de réalisation:

- succès et continuation;
- abandon du projet;
- rétroaction au noeud; et
- retour en arrière à un autre noeud.

2.5.2 Résolution des modèles GERT

L'analyse d'un modèle aussi flexible que GERT est évidemment problématique. Des solutions exactes existent pour le cas des réseaux n'incluant que des noeuds de type EXCLUSIVE-OR sans contraintes de ressources (Whitehouse 1983). Pour les cas plus généraux, il est nécessaire de se tourner vers la simulation. Plusieurs programmes spécialisés de simulation ont d'ailleurs été introduits à la suite du programme GERTS (voir Pritsker 1977). Entre autres, GERTS IIIR permet d'inclure des contraintes de ressources (Pritsker et Burgess 1970). Hebert (1975) y ajouta une procédure pour le calcul des dates de départ et de fin au plus tôt et au plus tard.

2.5.3 Limitations des modèles généraux

Malgré leur grande flexibilité, ces modèles ne permettent pas de modéliser facilement tous les éléments de risque présents dans un projet de réfection. Tout comme les autres approches d'analyse par réseau, les méthodes GAN obligent la représentation d'un projet par un ensemble ordonné d'activités. Même si une activité est probabiliste, il est nécessaire de l'indiquer à l'intérieur du réseau en respectant la séquence des événements. Bien qu'il soit possible d'établir un réseau comprenant uniquement les activités planifiées et autorisées avant de démarrer un projet de réfection, il est cependant impossible d'inclure les activités reliées aux imprévus car leur apparition se fait de façon aléatoire. Ainsi, la séquence réelle de l'ensemble des travaux d'un projet de réfection n'est jamais connue a priori et la représentation utilisée par les méthodes GAN est inadéquate.

2.6 Ordonnancement

La dernière approche de planification se distingue des approches précédentes au niveau des contraintes considérées. En effet, les modèles d'ordonnancement déterminent la séquence des activités, et conséquemment la durée totale d'un projet, en allouant les ressources limitées à chacune des activités. La problématique entourant les contraintes de ressources est d'ailleurs difficile à résoudre car ces contraintes éliminent le caractère d'indépendance entre les activités d'un réseau (Elmaghraby 1977).

Les modèles d'optimisation et les méthodes heuristiques sont les deux approches de résolution employées.

2.6.1 Modèles d'optimisation

Dans le cas déterministe (lorsque les durées des activités sont fixes), il est possible de formuler le problème d'affectation des ressources pour un réseau d'activités par un programme linéaire en nombres entiers (voir Elmaghraby 1977). La fonction objective cherche soit à minimiser la durée du projet ou à minimiser le coût total du projet. Les solutions proposées ont habituellement recours à la programmation linéaire mixte en nombres entiers et aux méthodes d'énumération implicite (Elsayed 1982; Patterson 1984). L'affectation des ressources se veut donc un problème NP-complet et les modèles proposés ne sont pas applicables pour des réseaux de grande taille (Boctor 1990). Il n'existe donc pas d'algorithme efficace, c'est-à-dire un algorithme à complexité polynomiale², pour résoudre le problème d'ordonnancement des tâches avec contraintes de ressources.

Dans le cas de durées variables, la complexité du problème est encore plus grande. Les derniers développements aboutissent encore sur des résultats incalculables mathématiquement (Elmaghraby 1993). Il n'existe donc pas de solutions mathématiquement acceptables pour l'affectation des ressources dans un réseau stochastique. Les limitations des méthodes d'optimisation ont encouragé le développement de nombreuses méthodes heuristiques d'ordonnancement de projet.

² Un algorithme à complexité polynomiale requiert un nombre total d'opérations élémentaires informatiques qui est borné par un polynôme décrit par les paramètres du problème.

2.6.2 Méthodes heuristiques

Dans la mesure où le critère retenu est susceptible de recevoir une formulation analytique acceptable, le planificateur doit rechercher une solution optimale. Cependant, lorsque le critère et la formulation des contraintes sont trop complexes, on se heurte à un dilemme (Carré 1964). D'abord, pour permettre de conduire les calculs jusqu'au bout, l'expression analytique doit être assez simple et, par suite, trop grossière pour être réaliste. De l'autre côté, pour traduire tous les subtilités du critère et des contraintes, l'expression analytique est si complexe qu'elle en devient inutilisable. Il semble raisonnable, dans ces conditions, de chercher plutôt à explorer de façon rapide plusieurs ordonnancements admissibles par méthodes heuristiques.

Une méthode heuristique d'affectation de ressource correspond simplement à une règle déterminée qui sert à calculer la priorité de chacune des activités. Lorsque des ressources sont disponibles, elles sont simplement allouées à l'activité ayant la plus grande priorité. Plusieurs articles ont présenté des études comparatives d'heuristiques (Badiru 1988; Dumond 1992; Kurtulus et Davis 1982; Holloway et al. 1979; Russel 1986; Whitehouse 1983). Des tests menés par Davis et Patterson (1975) ont conclu que les meilleures méthodes heuristiques forment des échéanciers avec des durées supérieures de seulement 5 à 10 % par rapport aux échéanciers optimaux.

Les heuristiques d'affectation de ressources utilisent généralement les informations obtenues à partir du calcul du CPM. Ces heuristiques sont donc de nature déterministe. Parmi les heuristiques présentées dans la littérature, seule la méthode CAF (Composite

Allocation Factor) de Badiru (1988) tient compte implicitement de la variabilité des activités.

2.6.3 Limitations des modèles d'ordonnancement

Comme l'objectif des modèles d'ordonnancement est de fixer les dates de début et de fin des activités, il est nécessaire de connaître la durée exacte de chacune d'elles; ce qui est évidemment impossible lors d'un projet de réfection. Cette limitation importante a d'ailleurs restreint la très grande majorité des modèles d'ordonnancement à se concentrer exclusivement sur les problèmes déterministes. D'autre part, les modèles stochastiques d'ordonnancement reposent sur la simulation d'un réseau d'activités fixes. Tout comme les modèles généraux, cette nécessité empêche leur utilisation pour l'analyse de projets de réfection.

2.7 Conclusion

La planification des tâches repose sur l'établissement d'un réseau d'activités. Pour un projet de réfection, il est cependant difficile de représenter l'ensemble des travaux par des relations d'antériorité. L'apparition de bris imprévus et l'intervention des unités auxiliaires de production ne peuvent être reproduites à l'intérieur du réseau. La séquence réelle des activités et la durée exacte de celles-ci ne sont connues qu'à la fin du projet. En conséquence, les modèles actuels de planification et d'ordonnancement ne peuvent supporter de telles contraintes.

Dans le prochain chapitre, une approche dédiée spécifiquement à la planification de projets de réfection est proposée. Cette approche suppose un réseau d'activités variables et tient compte des contraintes propres à la réfection. Cette nouvelle approche permettra ainsi d'évaluer avec précision la distribution de la durée de projets réels de réfection ce qui n'est pas possible avec les modèles connus.

CHAPITRE III

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE PLANIFICATION

3.1 Introduction

La planification d'un projet diffère de celle de la production en raison de la durée et du caractère unique d'un projet. Le processus traditionnel de planification se limite à la construction d'un réseau d'activités du projet à partir de la demande du client puis à procéder directement à l'évaluation de la durée du projet. Dans le cas déterministe, cette évaluation peut s'effectuer en déterminant la séquence de chacune des activités compte tenu des contraintes de ressources; on parle alors d'ordonnancement. Dans le cas stochastique, l'évaluation de la durée d'un projet ignore habituellement les contraintes de ressources et se limite à borner ou à donner une approximation de la distribution de la durée du projet.

Dans un contexte de réfection, chacune de ces approches aboutit sur des écarts de planification importants en raison des simplifications utilisées au niveau des contraintes ou des caractéristiques aléatoires des activités. Ces limitations nous poussent à proposer une approche de résolution différente qui cherche à la fois à imiter le comportement réel d'un projet de réfection et à recourir à un processus d'ordonnancement des activités. Ce modèle de planification est d'abord présenté dans son ensemble à la section suivante. L'orientation de ce modèle nous amène à définir une approche de résolution spécifique

pour l'ordonnancement des activités. La description de celle-ci vient compléter ce chapitre.

3.2 Description du modèle de planification proposé

Les modèles stochastiques proposés dans la littérature se concentrent essentiellement sur l'évaluation de la durée d'un projet sans chercher à établir un échéancier de réalisation pour chacune des activités. Dans le processus de planification, la séquence de réalisation représente une information aussi importante que l'évaluation de la durée du projet, car elle permet de guider le lancement et le suivi de production des activités. Ceci explique la raison pour laquelle les entreprises oeuvrant dans un environnement aléatoire comme la réfection d'équipements n'ont jamais eu recours aux modèles stochastiques. Ces dernières préfèrent, malgré ces limitations sévères, recourir au modèle traditionnel d'ordonnancement déterministe de projet.

Le choix d'une nouvelle approche de planification doit permettre d'améliorer l'estimation de l'échéancier de travail et du coût du projet, et ce, avant même de connaître le contenu exact du projet. Bien que prévisionnelle, cette estimation demeure essentielle car elle détermine les termes du contrat négocié avec le client. Il est donc nécessaire de tenter de considérer la répercussion d'un maximum de contraintes lors de cette évaluation afin

d'éviter de sous-estimer la durée et le budget requis pour compléter la remise à neuf d'un équipement.

3.2.1 Choix d'une approche de résolution

Comme indiqué antérieurement, les modèles stochastiques se divisent en deux classes principales, soit les méthodes analytiques et les modèles de simulation. Les méthodes analytiques offrent l'avantage de résoudre mathématiquement le problème de planification. En général, leur utilisation permet de développer un échéancier plus rapidement que les modèles de simulation. Malgré tout, ces modèles nécessitent de nombreuses suppositions et/ou se limitent à l'étude de réseaux possédant une géométrie simple (Sullivan et al. 1982). Cette limitation restreint l'utilisation des modèles analytiques à des problèmes théoriques précis ou à des cas réels simples. Diaz et Hadipriono (1993) ont démontré que l'utilisation des modèles analytiques tels PERT, PNET et NRB pour la planification de projets réels résulte sur des échéanciers plus optimistes que ceux obtenus de manière plus précise par la simulation Monte Carlo même lorsque les contraintes de ressources ne sont pas présentes.

Pour des projets réels de réfection, la limitation la plus importante de ces modèles se situe au niveau de la modélisation des contraintes d'un projet. L'analyse de la durée du projet ignore les conflits potentiels d'utilisation des ressources et se limite à respecter les

contraintes d'antériorité et de succession. La représentation des activités par un réseau d'activités fixes ne permet pas non plus l'intrusion d'événements probabilistes comme les bris imprévus. En contre partie, l'approche de la simulation offre une alternative d'analyse plus flexible.

3.2.2 Utilisation de la simulation

Les derniers développements en planification de projets sont principalement basés sur l'utilisation de la simulation (Ragsdale 1989). La grande flexibilité de la simulation permet d'éliminer les restrictions imposées par les modèles plus simples tout en utilisant leur rigueur analytique. La simulation permet ainsi de combiner les avantages des modèles d'ordonnancement basés sur le calcul CPM et du PERT (Badiru 1991a); c'est-à-dire inclure à la fois des règles d'ordonnancement pour l'affectation des ressources et des durées aléatoires.

Dans le cas de projets de réfection, la simulation donne la possibilité de représenter les caractéristiques aléatoires des opérations, notamment les fluctuations au niveau des durées et de l'apparition d'imprévus, tout en évaluant la durée d'un projet par l'intermédiaire d'un algorithme d'ordonnancement. La simulation d'événements aléatoires ne requiert cependant pas l'utilisation de réseaux stochastiques spécialisés tels que GERT, P-GERT,

Q-QUERT, etc. La simulation Monte Carlo fournit les outils nécessaires pour représenter adéquatement un projet de réfection d'équipement.

3.2.3 Simulation de l'environnement de réfection

La simulation a déjà permis de reproduire avec précision le déroulement de projets réels de remise à neuf (Beaulieu et al. 1994; Ouellet 1988). Ces deux modèles de simulation ont été créés à partir d'un langage spécialisé de simulation, SLAM®. Ouellet (1988) a d'abord proposé un modèle pour l'évaluation des besoins en ressources pour les remises à neuf des chars d'assaut Léopard A2 au 202e Dépôt d'ateliers. Ces projets de réfection étaient relativement peu complexes et utilisaient majoritairement le remplacement des pièces et modules défectueux.

Beaulieu et al. (1994) ont proposé un modèle plus complet qui tient compte des imprévus et de l'intervention des unités de support comme l'ingénierie, la planification et la fabrication. Le modèle fut utilisé avec succès pour la planification stratégique des projets de remise à neuf des aéronefs militaires à l'usine de Canadair à Mirabel (Qc, Canada).

Bien que supérieurs au modèle déterministe de planification (Gharbi et al. 1995), ces deux modèles de simulation s'avèrent des modèles d'analyse plutôt que d'ordonnancement. En effet, ces modèles utilisent les échéanciers déterministes calculés par des logiciels

d'ordonnancement commerciaux à capacité finie (CAPOSS® et OpenPlan®) pour déterminer la séquence des activités lors du processus de simulation. La simulation sert ainsi à modifier un ordonnancement préalablement établi en modifiant simplement la durée des activités. Les priorités accordées aux activités ne changent donc pas en cours de simulation et l'affectation des ressources se veut statique. L'utilisation pratique de ces modèles se limite ainsi à la planification stratégique de projets plutôt qu'à l'établissement d'une stratégie d'ordonnancement des activités en temps réel (Girard et al. 1995).

Considérant les limitations importantes de ces modèles, le modèle de planification proposé fait un pont entre les techniques d'ordonnancement et l'utilisation de la simulation par événements discrets.

3.2.4 Description de la méthodologie de planification

Rappelons que Gorgone (1992) divise la charge de travail d'une réfection en trois composantes: les réparations initialement autorisées par le propriétaire de l'équipement, les travaux supplémentaires causés par un changement d'envergure de ces mêmes réparations et les travaux non planifiés occasionnés par des imprévus. Dans le processus de planification actuel, seule la première composante est considérée. Les deux autres composantes sont simplement mises de côté en raison de leur nature aléatoire. En pratique, ces changements aléatoires de la charge de travail peuvent représenter entre 5 et

25 % de la charge totale. Il n'est pas possible de modéliser tous ces éléments dans un réseau déterministe d'activités en raison de l'aspect aléatoire de leur séquence.

L'approche préconisée consiste, dans un premier temps, à élaborer un mécanisme qui permet d'imiter le déroulement réel d'un projet de remise à neuf. Puis, dans un deuxième temps, recourir à un algorithme de résolution pour l'ordonnancement des activités en fonction des contraintes de zones et de ressources. Le résultat final de cette approche est l'établissement d'un échéancier de base pour le suivi de la production ainsi qu'une stratégie d'affectation des ressources et des zones de travail lors de l'ordonnancement des activités en temps réel.

La méthodologie proposée pour intégrer les éléments aléatoires dans le processus de planification est résumée à la figure 3.1. Le modèle proposé repose sur la construction d'un réseau d'activités de base qui représente la séquence des opérations connues pour l'ensemble des composants touchés par la réfection de l'équipement. L'énumération des activités est orientée vers les composants de l'équipement plutôt que vers les procédés de production afin de relier la probabilité d'occurrence et la durée d'une activité avec la fiabilité des composants. La localisation des activités est aussi considérée en définissant des zones de travail.

À partir du réseau d'activités de base, la séquence réelle des activités du projet est modifiée par simulation afin d'inclure les changements d'envergure des opérations prévues

ainsi que les imprévus. Contrairement aux méthodes proposées dans la littérature, la simulation du projet avec ses éléments de risque n'utilise pas un réseau d'activités fixes. À chaque réplication, le réseau de base est modifié en ajoutant des activités supplémentaires correspondant au traitement des bris non prévus. Une activité de base peut d'ailleurs être subdivisée en plusieurs segments séparés par des activités liées à des imprévus. Il est ainsi possible de représenter à l'intérieur d'un réseau d'activités tous les travaux exécutés par les unités de support.

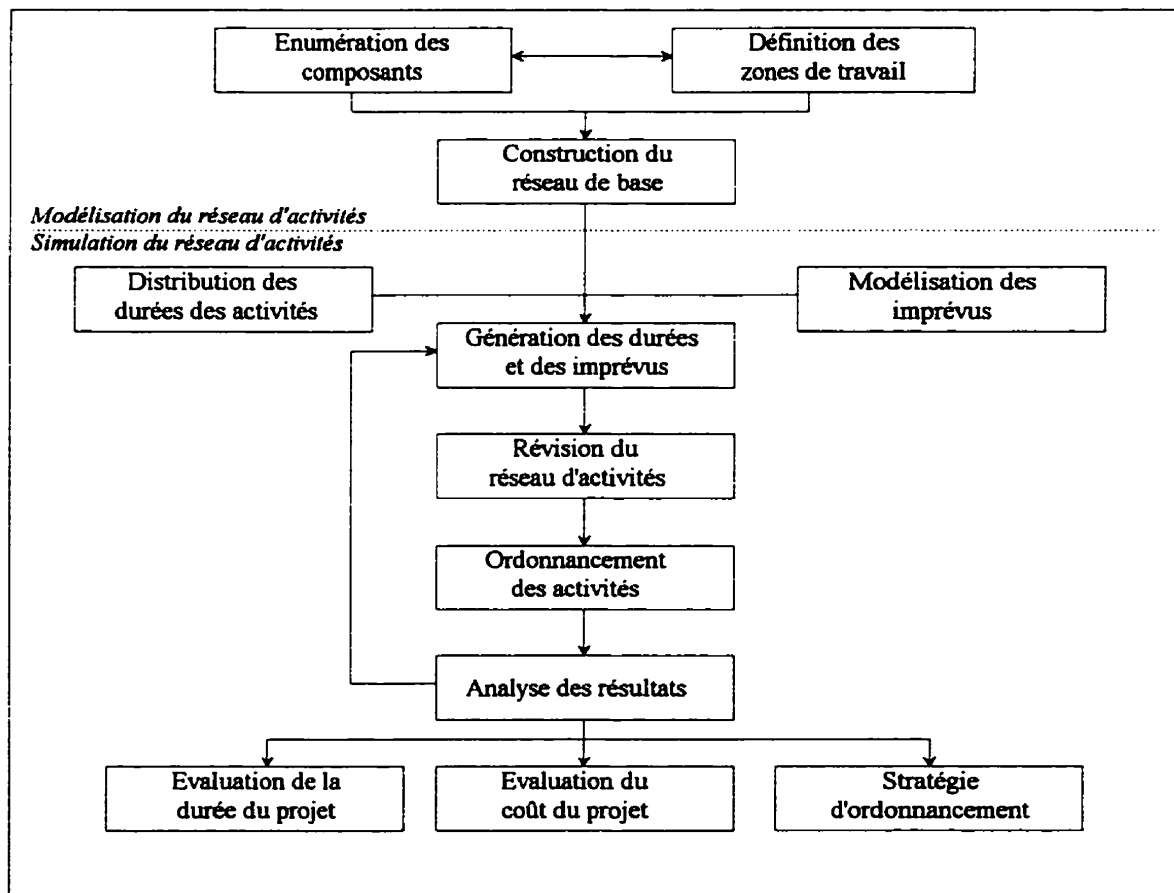


Figure 3.1 Méthodologie de planification proposée

Lorsque le réseau d'activités est construit, toutes les contraintes d'antériorité et de succession sont connues et il devient possible de recourir à un algorithme d'ordonnancement pour construire un échéancier de projet. La procédure utilisée pour l'ordonnancement est décrite à la section suivante.

3.3 Procédure d'ordonnancement des activités

Lors de l'ordonnancement, toutes les informations concernant les événements aléatoires ne peuvent être utilisées dans l'analyse des conflits de ressources pour ne pas biaiser la priorité relative accordée aux activités. En effet, bien que la séquence des activités et la durée de celles-ci soient fixées par simulation, ces informations ne sont pas connues en temps réel par les responsables de la production. Les décisions reliées aux conflits des ressources ne peuvent être basées que sur les données planifiées avant l'exécution de chacune des tâches considérées. Cette façon de modéliser les événements aléatoires et la progression d'un projet limite ainsi le choix d'une méthode de résolution.

3.3.1 Méthode de résolution

Les méthodes de résolution de problèmes d'ordonnancement, qu'elles soient des méthodes exactes ou approchées, déterministes ou stochastiques, se classent dans l'une des cinq approches suivantes (GOTHA 1993): les méthodes par construction progressive, par

voisinage, par décomposition, par relaxation de contraintes et les méthodes reliées à l'intelligence artificielle.

À l'exception des approches de construction progressive, ces méthodes travaillent généralement avec des solutions d'ordonnancement complètes; c'est-à-dire que l'ensemble des activités sont considérées dans la construction d'un ordonnancement admissible. Cette approche souffre d'une lacune importante lors de l'analyse d'un réseau stochastique. Ne connaissant pas la durée des activités, l'algorithme de résolution est limité à ne déterminer que la date de début des premières activités sans pouvoir indiquer leur fin et conséquemment, les activités successives ne peuvent être ordonnancées. La nature aléatoire de la durée des activités limite donc la résolution d'un ordonnancement admissible à se concentrer sur une solution partielle et à progresser de manière itérative à mesure que les variables aléatoires deviennent connues. Bien que les décisions d'ordonnancement doivent reposer sur les seules informations connues, ces dernières peuvent être utilisées pour actualiser la priorité relative de chacune des activités. Une telle approche d'actualisation des priorités rend le processus d'ordonnancement dynamique.

3.3.2 Ordonnancement dynamique

La résolution d'un projet stochastique se limite à fournir un échéancier estimatif. Dans le cas de travaux de maintenance, il n'est pas possible de connaître les répercussions de

l'apparition de tâches nouvelles qui n'avaient pas été prévues lors de la planification. L'enchaînement des tâches se modifie sous la pression d'événements imprévisibles a priori et l'observation du déroulement réel du projet fera nécessairement apparaître des écarts qui vont généralement en s'aggravant au fur et à mesure que le temps passe (Carré 1964). Une révision de l'ordonnancement en tenant compte des informations connues en temps réel devient donc essentielle en permettant de réduire les conséquences des imprévus en terme de la durée totale du projet.

Comme l'évaluation de la durée d'un projet passe ici par la simulation de l'avancement des activités, il est aussi possible d'imiter le caractère réactif et dynamique des décisions d'ordonnancement en temps réel d'autant plus que la construction d'un ordonnancement admissible s'effectue progressivement d'une manière similaire au déroulement chronologique du projet. Les décisions reliées à l'affectation initiale des ressources peuvent ainsi être prises à chaque itération compte tenu de l'avancement simulé dans le temps des différentes activités. Une telle approche de résolution repose donc sur un algorithme d'ordonnancement dynamique à flux poussé (*forward dynamic scheduling algorithm*) où l'actualisation des priorités s'effectue à chaque événement simulé.

3.4 Conclusion

Certaines recherches ont clairement démontré que la simulation d'un projet de réfection,

plutôt que son évaluation analytique, permet de construire une distribution statistique valable pour la durée et le coût du projet. La grande flexibilité de cette approche permet notamment de modéliser et d'imiter de façon précise le déroulement stochastique d'un projet de réfection. De plus, la simulation offre un moyen propice à l'expérimentation et permet de déterminer une stratégie de gestion pour l'affectation des ressources en temps réel.

Ces résultats nous ont ainsi poussés à construire un modèle de planification qui repose sur la simulation par événements discrets et sur un algorithme de résolution dynamique. La description détaillée du mécanisme de simulation, incluant l'algorithme d'ordonnancement des activités, est présentée aux chapitres 4 et 5.

CHAPITRE IV

SIMULATION D'UN PROJET DE RÉFECTION

4.1 Introduction

Dans le modèle de planification proposé, la fonction de simulation permet de reproduire les événements aléatoires qui surviennent au cours d'un projet de réfection. Pour ce faire, les bris potentiels doivent être identifiés et modélisés afin de procéder à l'évaluation de leur impact sur l'échéancier du projet. Comme l'évaluation de la durée du projet se fait en ordonnant les activités, la reproduction des événements aléatoires doit nécessairement s'intégrer au réseau d'activités de manière à influencer l'algorithme de résolution utilisé.

Dans ce chapitre, le processus de construction d'un réseau d'activités simulé à partir du réseau déterministe de base est d'abord traité. Ce processus permet de modéliser l'apparition d'événements probabilistes sous la forme d'activités au même titre que les activités de réparation et de remplacement. Le modèle de simulation est par la suite décrit dans son ensemble en fonction des relations entre les variables utilisées et les contraintes d'un projet de remise à neuf. Finalement, la dernière section de ce chapitre propose une approche pour réduire le temps d'exécution du processus de simulation.

4.2 Simulation du réseau d'activités

Le réseau de base du projet correspond au point de départ du modèle de simulation. Les activités de réparation sont reliées à des composants donnés sans préciser la nature des réparations. Ainsi pour chaque composant, il n'est pas nécessaire de déterminer a priori si le composant sera remplacé, réparé ou simplement inspecté. La durée et la nature des travaux dépendent ainsi de la condition du composant.

Ce réseau d'activités de base permet de saisir les relations entre les activités de remise à neuf des composants par un graphe acyclique orienté et connecté $G_b(V_b, A_b)$, où $V_b = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ est l'ensemble des événements du réseau et $A_b = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ est l'ensemble des activités de base. Une durée planifiée Y_i , normalement différente de la durée réelle y_i , est associée à chacune des activités $a_i \in A$.

En pratique, l'avancement réel du projet fera apparaître un ensemble d'activités supplémentaires, A_s , correspondant aux traitements des défauts non prévus. Le modèle de simulation doit ainsi modifier sur une base statistique le réseau d'activités de base en un réseau $G^*(V^*, A^*)$, où $A^* = \{A_b \cup A_s\}$ et où V^* déterminent les contraintes réelles d'antériorité et de succession. La construction d'un réseau simulé nécessite ainsi la modélisation des événements aléatoires en terme de durée et de séquence. La modélisation proposée fut utilisée lors d'une analyse de projets réels de réfection. Les

résultats obtenus nous témoignent clairement de la validité du modèle (voir Gharbi et al. 1995; Girard et al. 1995).

4.2.1 Modélisation de la durée des activités de base

La durée de certaines activités est connue avec précision et peut être représentée par une valeur déterministe. La condition des composants n'a ainsi aucun impact sur la durée de ces activités. Dans le cas des activités de remise à neuf, la durée d'une activité de réfection dépend des types de travaux exécutés et de la fiabilité des composants touchés par une réparation donnée. La modélisation d'une activité de réfection, en fonction de ces éléments, dépend directement de la disponibilité et du format des données historiques.

4.2.1.1 Modèle générique pour le calcul de la durée d'une activité de réfection

De façon générale, une activité de réfection comprend des travaux systématiques et des actions de maintenance conditionnelle. Les travaux systématiques sont principalement des remplacements de pièces déterminées à l'avance et sont communs à tous les équipements remis à neuf. La durée des travaux systématiques, S_i , est simplement donnée par la somme des tâches systématiques comprises dans l'activité i . Contrairement aux travaux systématiques, les actions de maintenance conditionnelle sont nécessaires seulement lorsque les composants sont défectueux ou sur le point de l'être. La durée des actions de

maintenance conditionnelle, C_i , dépend ainsi directement de la fiabilité des composants visés dans l'activité. Étant donné qu'une activité de réfection peut comprendre plusieurs actions systématiques et conditionnelles de maintenance, la durée de l'ensemble de l'activité i est donnée par:

$$y_i = \sum_k S_k + \sum_l C_l \quad (4.1)$$

Comme la durée d'une ou de plusieurs tâches incluses dans l'activité i est une variable aléatoire, la durée y_i est aussi une variable aléatoire. Ainsi, la fonction de probabilité de la durée d'une activité i au moment de la réfection T , $f_i(t|T)$, comportant M tâches systématiques et N actions conditionnelles est donnée par:

$$f_{y_i}(t|T) = \sum_{k=1}^M s_{ik}(t) * \sum_{l=1}^N (1 - R_{il}(T)) \times c_{il}(t) \quad (4.2)$$

où $R_{il}(T) = 0$, si le composant est opérationnel; et

$R_{il}(T) = 1$, si le composant est défectueux.

$R_{il}(T)$ désigne ainsi la fiabilité du composant l compris dans l'activité i au moment de la réfection, T . On suppose ici que la fiabilité d'un composant est indépendante de celles de

autres composants. La durée d'une activité de réfection est donc une somme de variables aléatoires et dépend directement du moment de réfection.

4.2.1.2 Calcul de la durée en fonction des données historiques

En pratique, il peut exister une forte corrélation entre la fiabilité des composants d'un même système. Il est alors plus facile et plus juste de définir la distribution d'une activité à partir des durées enregistrées lors des projets antérieurs. Le format des données historiques doit dicter la façon de générer la durée des activités.

Le format des données historiques dépend évidemment du système de collecte de données et de suivi de la production de l'entreprise. Les entreprises ont habituellement recours à un bon de travail pour chacune des activités en cours. Dans ce cas précis, les données historiques pour une activité donnée comprennent implicitement le temps dépensé pour les actions systématiques et conditionnelles de maintenance. Ces données permettent alors de construire directement et sans biais la fonction de probabilité de la durée d'une activité au moment de la réfection.

Le bon de travail d'une activité peut également être utilisé pour rapporter l'ensemble du temps de production déployé sur une activité y compris le temps pour des opérations non planifiées. La fonction de probabilité de la durée d'une activité définie à partir de telles données historiques comprend alors la charge de travail globale générée par cette activité.

La modélisation des défauts non prévus doit donc s'adapter à la façon de générer la durée d'une activité pour ne pas biaiser l'analyse de projet.

4.2.2 Description des défauts non prévus

La durée d'une activité correspond généralement au temps de travail déployé directement sur l'activité. En raison de l'apparition de bris ou de pannes non prévus, certaines activités non comprises dans le réseau de base peuvent modifier le déroulement et la durée des activités. L'impact d'un imprévu sur le déroulement du projet dépend en pratique de l'information existante sur ce dernier, car il peut faire l'objet ou non d'une procédure de travail existante.

4.2.2.1 Bris avec procédure connue

Les imprévus avec méthodologie correspondent à des défauts connus par l'unité de production ayant déjà été étudiés et où des solutions techniques ont été élaborées. Ce type d'imprévu entraîne une charge de travail supplémentaire O_{il} sur l'activité i où elle fut découverte. La durée totale D_i de l'activité i est alors donnée par:

$$D_i = y_i + \sum_l O_{il} \quad (4.3)$$

où le nombre de bris l est déterminé statistiquement à partir des données historiques sur les bris non prévus. Évidemment, lorsque les données historiques comprennent implicitement la charge de travail générée par des défauts non prévues, il n'est pas nécessaire de considérer l'équation (4.3).

4.2.2.2 Bris sans procédure de travail

À l'opposé, un bris sans procédure de travail constitue un bris jusqu'alors inconnu par les responsables de la réfection. Un tel imprévu nécessite une analyse de la part du personnel de l'ingénierie afin de déterminer les actions et les procédures à entreprendre (Beaulieu et al. 1994). L'impact de ce type de bris sur la durée d'une activité est identique à celui des bris avec procédure de travail et se calcule à partir de l'équation (4.3).

Les imprévus sans méthodologie de travail ont toutefois un impact autre sur la séquence des activités. Selon l'importance et la nature du bris, l'activité en cours peut être bloquée pour des raisons de sécurité ou simplement pour permettre la conduite d'une étude d'ingénierie. Aussi, la procédure de réparation produite par cette étude peut nécessiter la fabrication d'une pièce spécialisée. En raison des périodes de blocage B_{iq} , le temps de réalisation d'une activité i peut être différent de son temps de réparation totale donné par l'équation 4.3. Le temps de réalisation minimum d'une activité touchée par des bris sans procédure, comprenant la période entre le début de l'activité t_i et sa date de fin f_i , est plutôt donné par:

$$T_i = \text{Max} \left[(D_i + \sum_q b_{iq} B_{iq}), \text{Max}_q (s_{iq} + B_{iq} - t_i) \right] \quad (4.4)$$

où $b_{iq} = 0$ si le bris non prévu n'oblige pas de bloquer l'activité i ; et

$b_{iq} = 1$ si le bris non prévu oblige l'arrêt de l'activité i .

4.2.3 Modification du réseau d'activités de base

Comme mentionné auparavant, les historiques des durées des activités peuvent inclure les durées ou travaux supplémentaires associés aux imprévus. Il est ainsi possible de simuler directement la durée de réparation D_i sans passer par l'évaluation de la durée de l'activité i , y_i . Les activités reliées à la résolution des bris sans procédure de travail doivent cependant être reproduites dans la séquence des activités.

Comme l'objectif est d'évaluer quantitativement la durée d'un projet, l'impact de ces activités probabilistes doit être quantifié de la même façon que les autres activités du projet (durée, ressources et zones). En connaissant la probabilité d'apparition de bris sans procédure de travail pour chaque activité incluse dans la remise à neuf, P_{IMP} , il est possible de simuler ces activités supplémentaires en générant statistiquement un nombre donné de bris et une séquence correspondante.

Lorsqu'une activité est interrompue à cause d'un bris, l'activité est subdivisée en deux phases: une première partie avant le bris et une deuxième après la résolution du bris. Dans le cas le plus général, le déroulement d'une activité, comportant un nombre de blocage b donné, est subdivisé en $(b+1)$ périodes de travail. La figure 4.1 montre un exemple de la simulation d'une activité de base. Dans cet exemple, deux bris sans procédure de travail furent simulés dont l'un a causé l'arrêt des travaux et la fabrication d'une pièce.

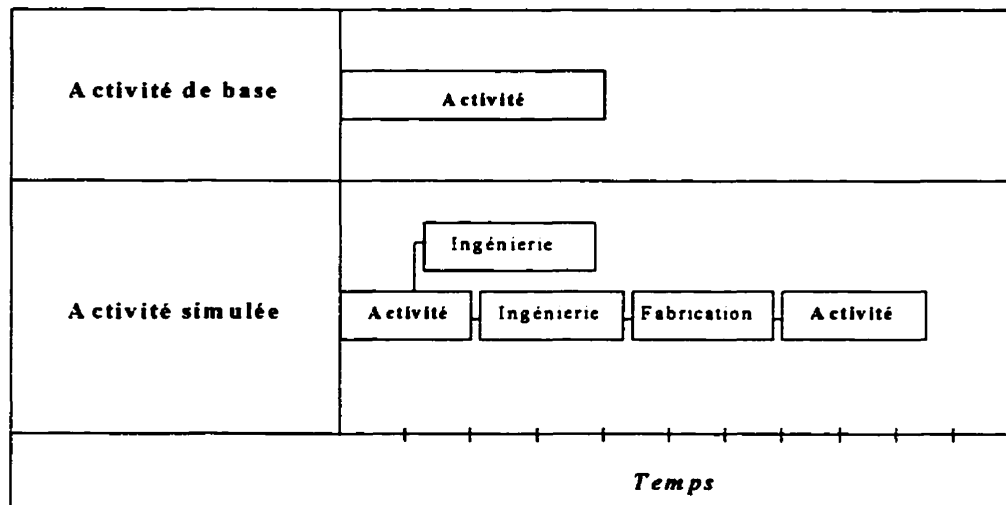


Figure 4.1 Simulation de la séquence des activités

Comme le démontre cet exemple, la simulation du déroulement de chacune des activités de base modifie le réseau initial en forçant de nouvelles contraintes d'antériorité et en ajoutant de nouvelles activités. La génération des durées et des activités probabilistes influence ainsi l'ordonnancement des activités. Connaissant maintenant les

caractéristiques de la modélisation des événements stochastiques, il est maintenant possible de procéder à la description du modèle complet de simulation.

4.3 Description du modèle de simulation

Le modèle de simulation comprend l'ensemble des fonctions nécessaires pour reproduire le déroulement d'un projet de réfection, ordonnancer les tâches et évaluer statistiquement les résultats d'un ensemble de répliques. Il cherche à imiter le comportement réel d'un projet de réfection reproduisant l'ensemble de ses activités et de ses contraintes. Le modèle de simulation peut être représenté par un ensemble dépendant de variables d'état, de variables décisionnelles et de variables résultantes.

4.3.1 Diagramme d'influence

En respectant la nomenclature utilisée par Padilla et Carr (1991), il est possible de résumer les relations entre les variables du modèle par un diagramme d'influence, comme présenté à la figure 4.2. Les variables d'état, représentées par des formes ovales, modélisent les facteurs aléatoires hors de contrôle du gérant de projet. À l'opposé, les variables décisionnelles sont fixées par les gestionnaires. Ces dernières sont représentées par des formes rectangulaires. Finalement, les variables résultantes, représentées par des

rectangles arrondis, sont issues des relations existant entre les variables décisionnelles et d'état.

Dans le modèle de simulation, on ne reconnaît qu'une seule variable d'état, soit la condition de l'équipement. Celle-ci est directement responsable de l'envergure des travaux de réparation à réaliser. Elle influence directement la durée des activités ainsi que la quantité et la durée des travaux reliés aux activités non prévues. Elle influence donc les deux variables d'intérêt, soit la durée et le coût total du projet. Parmi les variables de décision, on note principalement celles requises pour la description des contraintes (précédences, ressources, zones) et celle représentant la stratégie de gestion. Les autres variables du modèle résultent des variations aléatoires et/ou des décisions des gestionnaires.

L'interaction des variables du modèle de simulation est assurée par quatre fonctions ou modules principaux: un module de génération des variables aléatoires, un deuxième pour la construction du réseau d'activités, un module d'ordonnancement et finalement, le module d'analyse des résultats.

4.3.2 Description des fonctions du modèle de simulation

Le module de construction du réseau d'activités sert à décrire les activités du projet, les

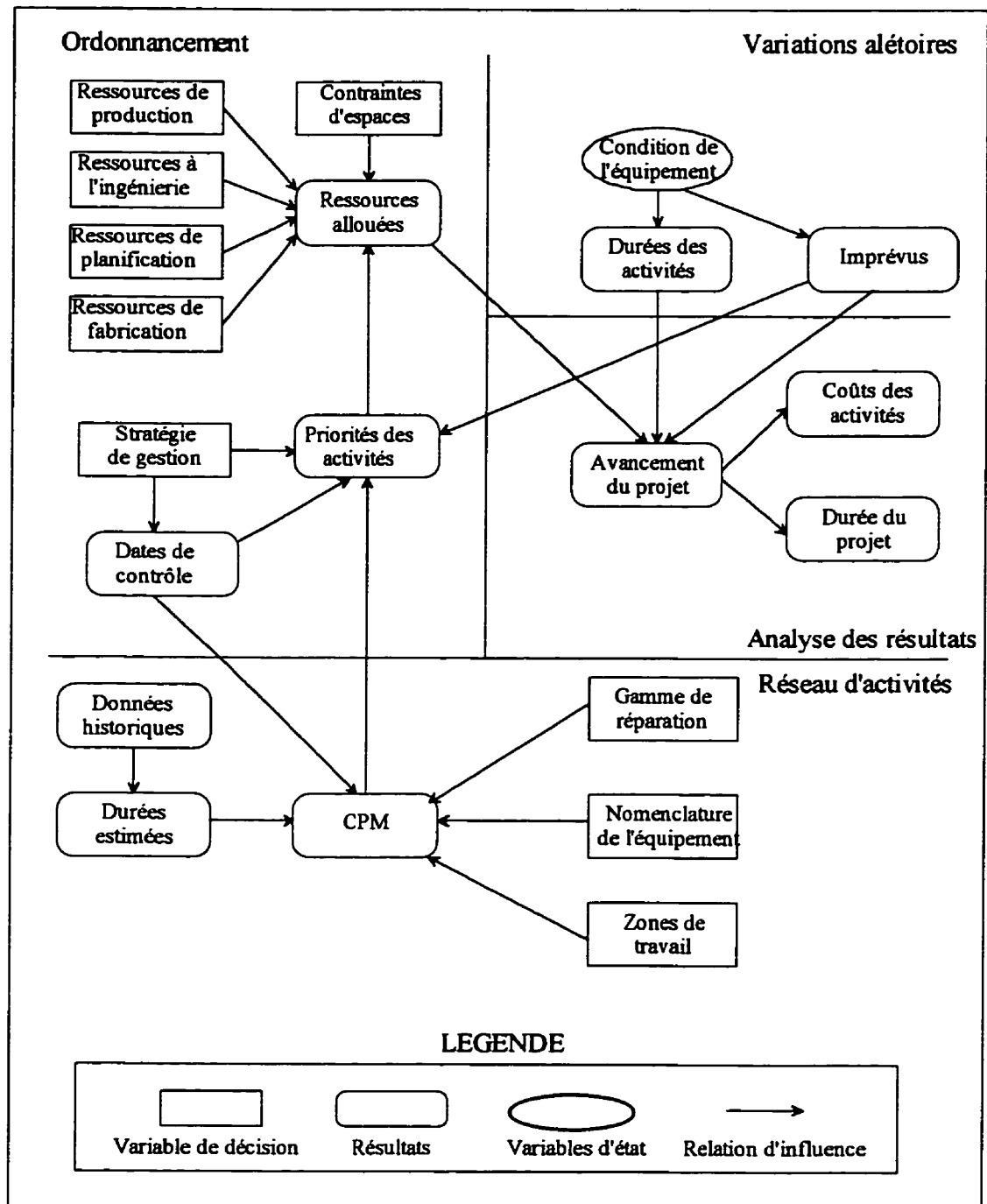


Figure 4.2 Diagramme d'influence

ressources de production requises, les processus de remise à neuf et l'ensemble des contraintes d'ordonnancement qui en découle. Cette base de données techniques permet à l'utilisateur de définir les données d'un projet et ses contraintes d'une manière complètement transparente par rapport à la construction et la résolution du réseau d'activités. Ce module inclut aussi le calcul du CPM qui est effectué à partir des durées estimées des activités connues au début du projet. Les données prévisionnelles tirées de ce calcul servent à identifier la priorité relative des activités au temps initial.

L'algorithme de résolution, représenté par le module d'ordonnancement, utilise par la suite les informations disponibles pour ordonnancer les premières activités. L'avancement du projet progresse par événements discrets où chaque événement constitue la fin d'une activité. La date de fin des activités dépend ainsi de la durée réelle des activités et est fixée de façon pseudo-aléatoire par le module de génération des variables aléatoires. À partir du moment où ces fluctuations aléatoires sont générées, l'algorithme d'ordonnancement est en mesure de progresser de manière similaire à celle d'un ordonnancement de projet déterministe. En raison de son importance, l'algorithme d'ordonnancement fait l'objet du prochain chapitre.

Contrairement aux deux premiers modules, les fonctions de génération des variables aléatoires et d'analyse des résultats sont de nature probabiliste. Le module de génération des variables aléatoires sert d'abord à imiter la condition de l'équipement en générant la

durée et le coût des activités ainsi que le nombre et le moment d'apparition des activités non prévues à l'intérieur du réseau d'activités initial.

Finalement, le module d'analyse des résultats permet d'archiver les résultats de simulation obtenus à chaque réplication. Ces données servent par la suite à bâtir la distribution de la durée du projet et celle du coût total. Ce module peut également être utilisé pour contenir des informations nécessaires à l'analyse du projet. Certaines données peuvent être particulièrement utiles lors du recours à des techniques de réduction du temps de simulation requis. La structure du modèle de simulation est particulièrement propice à l'utilisation de techniques de réduction de variance.

4.4 Techniques de réduction de variance

L'utilisation de la simulation Monte Carlo pour analyser un projet nécessite l'exécution d'un nombre considérable de répliques. Bien que ce nombre dépend directement du modèle étudié, la littérature avance régulièrement la nécessité d'effectuer entre 1000 et 10000 répliques pour obtenir des résultats précis (Breipohl et al. 1990). Moder et al. (1983) indiquent que 1000 répliques permettent normalement d'obtenir des résultats fiables lors de l'étude de projets de construction et ce, à un coût raisonnable. En général, le nombre choisi de répliques doit correspondre au niveau de précision recherché.

Ainsi, Padilla et Carr (1991) mentionnent que 30 répliques sont habituellement suffisantes pour comparer différentes stratégies d'affectation de ressources.

4.4.1 Fonctionnement des techniques de réduction de variance

La précision des résultats dépend directement de l'intervalle de confiance obtenue pour l'estimation de la mesure de performance désirée. À l'étape de la planification, l'objectif principal est d'évaluer la durée nécessaire pour compléter le projet. L'intervalle de confiance de la durée moyenne d'un projet, $\bar{T}$, est donné par

$$\bar{T} \pm \chi \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.5)$$

où χ = une constante de précision;

σ = écart type; et

n = nombre de répliques.

L'étendue de l'intervalle de confiance dépend ainsi de l'écart type de la moyenne et du nombre de répliques exécutées. Les techniques de réductions de variance se concentrent uniquement sur la réduction de l'écart type de la durée moyenne pour diminuer l'intervalle de confiance. L'application de ces techniques est préférable à

l'augmentation du nombre de réplifications dans la mesure où elles réduisent le temps d'ordinateur requis. Les techniques de réduction de variance les plus utilisées pour l'analyse de réseaux sont les variables antithétiques et l'échantillonnage conditionnelle.

4.4.2 Techniques traditionnelles utilisées en planification de projet

L'utilisation de variables antithétiques, ou AV (Antithetic Variates), fut initialement présentée par Hammersley et Morton (1956). L'approche consiste à jumeler deux réplifications successives en introduisant une corrélation négative. L'objectif est de compenser l'impact d'une observation supérieure à la moyenne par une observation inférieure à celle-ci et vice versa. La variable retenue est alors la moyenne des deux observations. Dans certains cas, la structure du modèle étudié peut entraîner une corrélation positive (Saliby 1980). Cette méthode doit donc être utilisée avec précaution. Il semble cependant que l'emploi de variables antithétiques donne de bons résultats lorsque les distributions caractérisant les variables d'un modèle sont symétriques (Grant 1983). Cette technique de réduction de variance permet aussi d'obtenir une corrélation négative avec des distributions asymétriques comme la distribution exponentielle (Burt et al. 1970; Sullivan et al. 1982). En réfection, la distribution de la durée d'une activité de réparation est rarement symétrique.

Burt et Garman (1971) ont introduit une méthode d'échantillonnage conditionnelle en utilisant les arcs uniques d'un réseau. Un arc unique ne fait partie que d'un seul chemin du réseau d'activités. D'autres recherches ont raffiné cette approche en réduisant la taille du réseau original par simplifications successives (Adlakha 1987; Garman 1972; Sigal et al. 1979). Bien que ces techniques ont permis de réduire considérablement l'effort de simulation, il n'est pas possible de les utiliser avec le modèle de simulation proposé. Premièrement, cette approche ne permet pas d'inclure les contraintes de ressources. La simplification d'un réseau oblige nécessairement à considérer les activités comme des entités indépendantes; ce qui n'est pas le cas lorsque la séquence de chacune d'elles dépend du nombre de ressources disponibles. Deuxièmement, cette approche se concentre sur la structure du réseau. Le modèle de simulation proposé n'utilise pas un réseau fixe et sa structure change à chaque réplication.

4.4.3 Technique de réduction de variance proposée

À l'exception des techniques des variables antithétiques et d'échantillonnage par conditionnement, il existe peu d'articles sur l'utilisation des méthodes de réduction de variance lors d'analyse des réseaux d'activités. L'utilisation d'une variable de contrôle, proposée par Burt et Garman (1971), est une technique intéressante dans le contexte d'un projet de réfection. L'utilisation d'une variable de contrôle prend avantage de la

corrélation existant entre une variable de contrôle C choisie et la variable d'intérêt X (Law et Kelton 1991).

La variable d'intérêt pour cette recherche est évidemment la durée du projet. La procédure de simulation proposée repose sur l'introduction des imprévus à l'intérieur du réseau. Une corrélation positive apparaît naturellement entre le nombre d'imprévus et la durée du projet. Le nombre d'imprévus est donc un choix logique pour la variable de contrôle C . Connaissant l'espérance mathématique du nombre d'imprévus, $\nu = E(C)$, la relation suivante permet d'obtenir une évaluation non biaisée de la durée moyenne du projet, appelée X_C , en fonction d'une variable de corrélation α :

$$X_C = \bar{X} - \alpha(C - \nu) \quad (4.6)$$

La variance de cet estimateur est alors donnée par:

$$Var(X_C) = Var(\bar{X}) + \alpha^2 Var(C) - 2\alpha Cov(\bar{X}, C) \quad (4.7)$$

En dérivant cette équation par rapport à la variable α , la minimisation de la variance de l'estimateur apparaît lorsque:

$$\alpha^* = Cov(\bar{X}, C) / Var(C) \quad (4.8)$$

La variance minimum est alors égale à:

$$Var(X_c^*) = (1 - \rho_{\bar{X}c}^2)Var(\bar{X}) \quad (4.9)$$

où $\rho_{\bar{X}c}^2$ représente le facteur de corrélation entre la variable d'intérêt et la variable de contrôle. La réduction de variance est donc importante lorsque cette corrélation est forte.

4.5 Conclusion

Le processus de simulation permet de reproduire le comportement réel d'un projet de réfection. L'actualisation du réseau de base modifie les contraintes du projet et influence directement la résolution des conflits de ressources à mesure que de nouveaux événements apparaissent. L'ordonnancement des activités demeure complexe car elle doit chercher à minimiser la durée du projet en ne connaissant qu'une fraction des activités et des contraintes réelles. La résolution de l'échéancier doit conséquemment s'adapter à mesure que de nouvelles informations sur ces contraintes apparaissent dans le temps. Le modèle d'ordonnancement s'inscrit donc à l'intérieur du processus de simulation et fait l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE V

ORDONNANCEMENT DYNAMIQUE DES ACTIVITÉS

5.1 Introduction

Les recherches traditionnelles en ordonnancement se sont principalement concentrées sur l'affectation de ressources multiples pour des projets statiques et l'ordonnancement d'ateliers dynamiques à ressources uniques. L'ordonnancement dynamique et multi-ressources demeure un secteur de recherche peu traité en raison de la complexité de la problématique et des difficultés toujours présentes à résoudre les problèmes de base plus simples de façon optimale et dans un temps raisonnable (Dumond 1992). L'algorithme proposé dans ce chapitre s'adresse à ce type d'environnement.

La procédure d'ordonnancement proposée tient compte des particularités de la réfection en s'intégrant au modèle de planification présenté au chapitre 3. Elle permet ainsi d'évaluer de façon plus réaliste la durée d'un projet en considérant les contraintes de zones et la variabilité des activités de réparation. La structure de l'algorithme et son processus d'actualisation des priorités, qui le rend dynamique, sont décrits à la prochaine section. La section suivante tire profit du caractère dynamique de l'algorithme proposé pour présenter une règle d'affectation adaptée aux caractéristiques uniques d'un projet de réfection. Cette règle s'appuie sur la structure dominante des contraintes de zones pour compléter la procédure d'ordonnancement et de simulation des activités de réfection.

5.2 Méthodologie d'affectation dynamique des ressources

La présentation du modèle de planification a soulevé la nécessité de recourir, dans un contexte d'ordonnancement stochastique, à un algorithme dynamique à flux poussé. La détermination des dates de début des activités compte tenu des événements aléatoires connus à chaque moment de résolution offre ainsi la possibilité de réagir aux écarts de planification en cours de projet. La structure de l'algorithme puis sa procédure d'actualisation des priorités sont ici présentées successivement.

5.2.1 Description de l'algorithme d'ordonnancement dynamique

Contrairement aux modèles stochastiques traditionnels, l'approche proposée doit considérer à la fois la nature stochastique des activités d'un projet et les contraintes d'antériorité, de ressources et de zones. En se basant sur une approche d'ordonnancement à flux poussé, nous proposons un algorithme générique pour l'ordonnancement des tâches d'un projet de réfection, présenté à la figure 5.1. Ce modèle n'est pas limité à utiliser une règle d'affectation unique; ce qui permet d'évaluer statistiquement l'influence de plusieurs règles d'affectation sur la durée du projet et de déterminer la meilleure stratégie d'affectation en cours de projet.

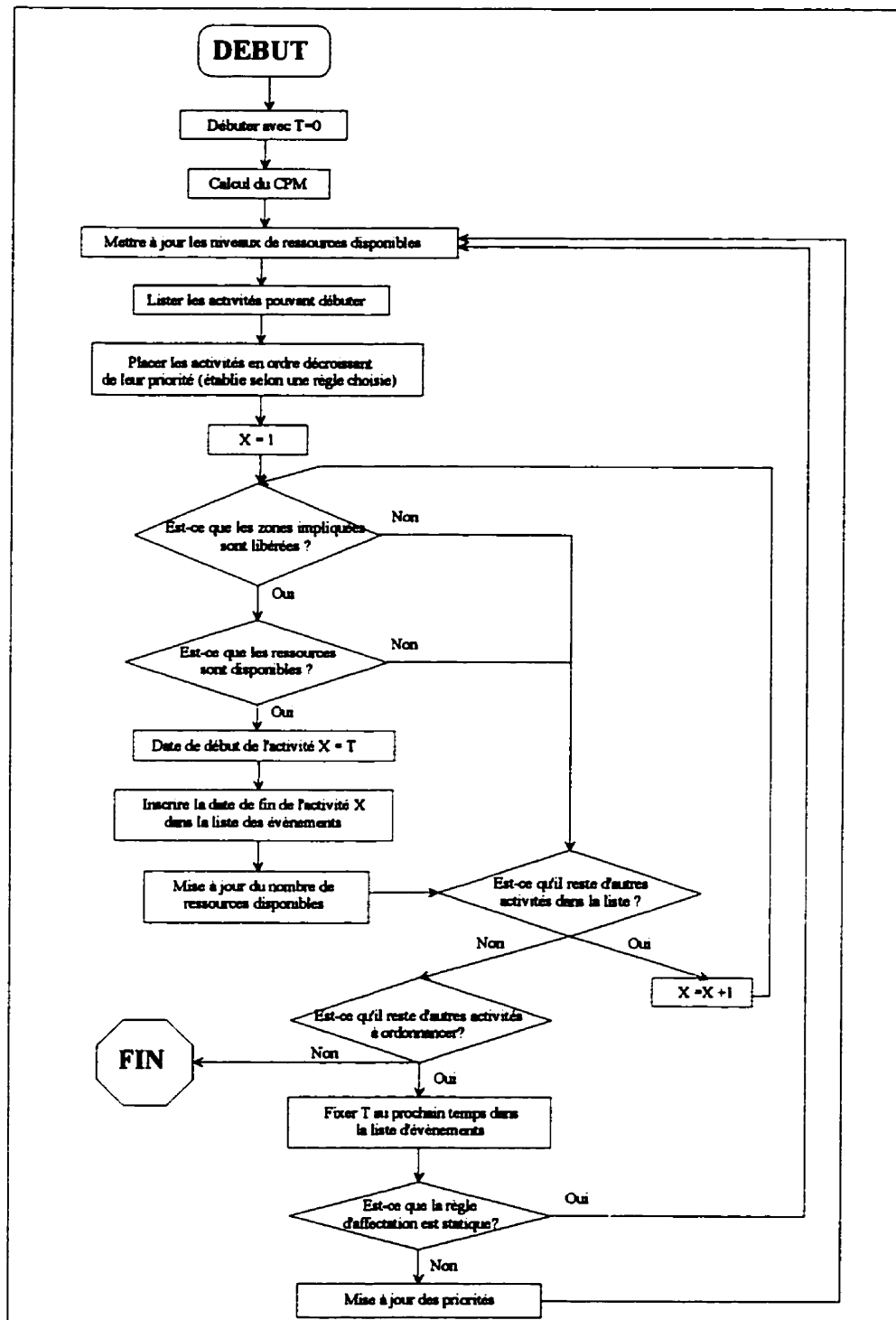


Figure 5.1 Algorithme d'affectation dynamique des ressources et des zones de travail

L'algorithme nécessite que chaque activité soit décrite en terme des contraintes de zones et de ressources. La procédure débute par le calcul du CPM en utilisant les durées prévues pour toutes les activités. Ce calcul ne tient pas compte des contraintes de zones et de ressources. Il permet cependant d'identifier les dates de départ au plus tôt et au plus tard ainsi que les marges pour chaque activité. Ces informations peuvent éventuellement être utilisées pour définir la priorité de chaque activité lors de l'affectation des ressources. La pertinence de ces informations sera traitée à la section suivante.

Lorsque la règle d'affectation est déterminée, les activités pouvant débiter sont listées. En commençant par celle possédant la priorité la plus élevée, l'algorithme alloue des zones et des ressources à l'activité si la zone de travail et les ressources nécessaires sont disponibles. Ainsi, l'activité débute et la disponibilité des zones de travail et des ressources est automatiquement modifiée. La vérification des contraintes se fait pour l'ensemble des activités listées. Par la suite, la procédure de vérification s'exécute de manière répétitive après avoir simulé la fin d'une activité initialement déclenchée. La liste des activités pouvant démarrer est modifiée à la fin de chaque activité afin d'inclure les successeurs de celle-ci.

La procédure de vérification des contraintes est arrêtée au début de chaque événement pour réviser les données du CPM. Ainsi, l'affectation des ressources à un moment précis tient compte de la durée simulée des activités déjà complétées. Ceci permet d'élever la priorité des activités dont les activités précédentes ont exigé plus de temps que prévu.

Dans le cas où la règle d'affectation est statique, aucune mise à jour n'est apportée. Finalement, la simulation de l'avancement du projet se termine lorsque toutes les activités ont été complétées.

L'évaluation statistique de la durée du projet nécessite évidemment plusieurs réplications. Le nombre de réplications doit être choisi en fonction de la précision recherchée. La stratégie d'affectation des ressources qui assure une durée moyenne minimale du projet doit être utilisée en temps réel pour l'affectation des ressources. La durée moyenne ainsi calculée peut servir d'échéancier visé pour faire le suivi du projet.

5.2.2 Mise à jour des données du CPM

L'algorithme proposé procède à la mise à jour des priorités à chaque période d'ordonnancement ce qui nécessite la révision du CPM à chaque événement. Au lieu de recourir au calcul complet du CPM, comme l'algorithme de Padilla et Carr (1991), une procédure de révision rapide des données du CPM sans la considération complète des activités est proposée.

Cette procédure reconnaît d'abord que la révision des données du CPM n'est utile au moment de résolution $t = x$ qu'aux activités admissibles à l'ordonnancement à ce moment. Il faut donc chercher à déterminer les dates de début et de fin au plus tôt et au plus tard

des activités $\in \xi^{t=x}$, où $\xi^{t=x}$ est l'ensemble des activités admissibles, c'est-à-dire les activités non débutées et pour lesquelles tous les prédécesseurs ont été complétés. L'élimination du processus de propagation des données du CPM pour l'ensemble des activités permet ainsi d'accélérer le calcul d'actualisation des priorités. Le calcul des dates au plus tôt et surtout au plus tard pour chacune des activités admissibles à l'ordonnancement doit donc reposer sur une approche différente de celle du CPM traditionnel.

5.2.2.1 Dates de départ et de fin au plus tôt

Par définition, toute activité $i \in \xi^{t=x}$ est admissible à démarrer au moment $t = x$. La date de départ au plus tôt actualisée de l'activité i est donc égale au moment $t = x$. De même, la date de fin au plus tôt planifiée de l'activité i est donnée simplement en ajoutant la durée planifiée de l'activité i , y_i , au temps $t = x$. Les dates de départ et de fin au plus tôt, notées respectivement ES_i et EF_i , d'une activité admissible i au moment $t = x$ sont données par:

$$ES_i^{t=x} = x \quad (5.1)$$

$$EF_i^{t=x} = x + y_i \quad (5.2)$$

5.2.4.2 Dates de départ et de fin au plus tard

La révision des dates au plus tard prend avantage du calcul initial du CPM qui identifie la

durée minimale entre le début d'une activité et la fin du projet. La proposition suivante donne une façon rapide de calculer les dates de début au plus tard.

Proposition:

Pour toute activité $i \in \xi^{t=x}$, la date de début au plus tard actualisée est donnée par:

$$LS_i^{t=x} = (\max_{j \in \xi} \Omega_j) - \Omega_i + \varepsilon \quad (5.3)$$

où $\Omega_i = \tau^{t=0} - LS_i$; et

$\tau^{t=0}$ = durée minimale du projet donné par le calcul initial du CPM.

Preuve:

La durée d'un projet correspond, comme l'indique l'équation (2.11), au chemin du réseau π possédant la durée la plus longue. De la même façon, la durée restante d'un projet au temps $t = x$, noté $\tau^{t=x}$, correspond au chemin le plus long du réseau formé des activités non complétées, $G^{t=x}(V^{t=x}, A^{t=x})$; c'est-à-dire $\tau^{t=x} = \max_{\forall l} \pi_l$.

Par définition, $LS_i^{t=0}$ correspond à la date de départ au plus tard de l'activité i pour ne pas retarder la durée minimale du projet $\tau^{t=0}$. Ainsi, le chemin le plus long suivant une activité i est toujours donné par:

$$\Omega_i = \tau^{t=0} - LS_i^{t=0} \quad (5.4)$$

Au moment $t = x$, l'ensemble des chemins du réseau passe soit par une activité admissible à ordonnancer, ou par une activité dont un ou plusieurs prédécesseurs sont en progrès. Dans le premier cas, le chemin le plus long passant par une activité j correspond au temps minimal nécessaire pour compléter toutes les activités qui succèdent j . Dans le deuxième cas, le chemin le plus long passant par une activité non admissible ne peut être connu avec certitude car un ou plusieurs prédécesseurs sont en progrès. Le chemin le plus long passant par une activité i non démarrée au moment $t = x$ est donné par l'une des équations suivantes:

$$\max_{j \in \xi} \pi_l = \Omega_j \quad , \quad \forall j \in \xi \quad (5.5)$$

$$\max_{j \in \psi} \pi_l = \Omega_j + \varepsilon_j \quad , \quad \forall j \in \psi \quad (5.6)$$

où ξ = ensemble des activités admissibles;

ψ = ensemble des activités non démarrées et non admissibles; et

ε_j = période requise pour compléter tous les prédécesseurs de l'activité j

La durée minimal restante du projet au temps $t = x$ est donc donnée par:

$$\tau^{t=x} = \text{Max} \left[\text{Max}_{i \in \xi} \Omega_i, \text{Max}_{j \in \psi} (\Omega_j + \varepsilon_j) \right] \quad (5.7)$$

En considérant uniquement les activités admissibles, l'équation (5.7) peut s'écrire de façon équivalente par:

$$\tau^{t=x} = \text{Max}_{i \in \xi} \Omega_i + \varepsilon \quad (5.8)$$

$$\text{où } \varepsilon = \text{Max} \left[(\text{Max}_{j \in \psi} (\Omega_j + \varepsilon_j) - \text{Max}_{i \in \xi} \Omega_i), 0 \right].$$

En connaissant la durée restante, la date de départ au plus tard de l'activité i au moment $t = x$ est donnée par:

$$LS_i^{t=x} = \tau^{t=x} - \Omega_i \quad (5.9)$$

Finalement, en substituant la durée restante par l'équation (5.4), on obtient:

$$LS_i^{t=x} = (\text{Max}_{j \in \xi} \Omega_j) - \Omega_i + \varepsilon, \quad \forall i \in \xi \quad (5.10)$$

ce qui prouve le théorème proposé.

L'équation (5.6) est particulièrement utile en limitant le calcul des dates de départ au plus tard aux seules activités admissibles. De plus, la comparaison des priorités des activités admissibles ne requiert aucune évaluation de la valeur de ε . L'équation (5.6) peut ainsi s'approximer par:

$$LS_i^{t=x} \approx (\max_{j \in \xi} \Omega_j) - \Omega_i \quad , \quad \forall i \in \xi \quad (5.11)$$

L'équation (5.7) permet une évaluation non biaisée des dates de début au plus tard minimales ou maximales de l'ensemble des activités admissibles. De façon similaire, les dates de fin au plus tard des activités admissibles et leurs approximations sont données respectivement par:

$$LS_i^{t=x} = (\max_{j \in \xi} \Omega_j) - \Omega_i + y_i + \varepsilon \quad , \quad \forall i \in \xi \quad (5.12)$$

$$LF_i^{t=x} \approx (\max_{j \in \xi} \Omega_j) - \Omega_i + y_i \quad , \quad \forall i \in \xi \quad (5.13)$$

Le calcul des dates de départ et de fin actualisées permet la révision rapide des données du CPM et des priorités accordées aux activités pour l'affectation des ressources. Cette révision n'est cependant pas nécessaire pour l'ensemble des règles d'affectation. La

prochaine section donne une description des règles d'affectation retenues pour l'ordonnancement des projets.

5.3 Sélection des règles d'affectation de ressources

L'algorithme d'ordonnancement se veut générique et ne spécifie pas l'emploi d'une règle d'affectation unique. Le choix des règles d'affectation de ressources forcera évidemment la séquence des activités en se concentrant sur certaines caractéristiques des activités ou de la structure du réseau du projet pour déterminer la priorité relative des activités. La performance d'une règle d'affectation dépend ainsi directement des caractéristiques d'un projet. Les recherches de Patterson (1976) et Ulsusoy et Özdamar (1989) ont cependant conclu qu'il n'est pas possible de présélectionner une règle d'affectation performante à partir des paramètres d'un projet.

En acceptant ce fait, il devient avantageux de chercher à évaluer, pour chaque projet, la performance d'un ensemble restreint de règles d'affectation plutôt qu'une règle unique. Dans le cas déterministe, Boctor (1990) a construit des ensembles restreints de règles d'affectation qui permettent d'aboutir sur une solution optimale dans des pourcentages élevés. Dans le cas stochastique, la construction d'un ensemble restreint de règles d'affectation est encore plus utile en limitant le nombre de répliques dans le processus de simulation. Avant de chercher à identifier un nombre limité de règles

d'ordonnancement qui performant bien dans un contexte de réfection, nous présentons une brève revue des règles d'affectation couramment utilisées en planification de projet.

5.3.1 Règles d'affectation statiques

La plupart des règles d'ordonnancement s'appuie sur le calcul du CPM ou des caractéristiques des activités pour déterminer la priorité relative de chacune des activités. Le calcul du CPM permet notamment de classer les activités en deux classes: les activités critiques et les activités flottantes. Les activités critiques doivent absolument débiter à une date donnée pour compléter le projet avec la durée totale minimale. A l'opposé, les dates de début des activités flottantes peuvent varier sans avoir de conséquences sur la durée des travaux.

Les autres règles d'affectation s'appuient uniquement sur les caractéristiques des activités sans considération de leur impact sur le calcul de la durée minimale du projet. Ces règles, incluant celles qui reposent sur le CPM, sont généralement statiques car les priorités relatives des activités ne changent pas au cours du processus d'ordonnancement. Les règles les plus connues sont répertoriées dans le tableau 5.1. La variable R_i indique ici le nombre de ressources nécessaires pour réaliser l'activité i . Il faut aussi noter que ces règles d'ordonnancement ont été établies pour des réseaux d'activités déterministes. Dans

le cas stochastique, la durée planifiée d'une activité Y_i doit être utilisée plutôt que la durée réelle y_i en raison du caractère inconnu de cette dernière.

Tableau 5.1 Description des règles d'ordonnancement statiques

NOM	DESCRIPTION	EQUATION
<i>MINES</i>	Date de départ au plus tôt minimale	$\min_{i \in \mathcal{E}} \{ES_i\}$
<i>MINLS</i>	Date de départ au plus tard minimale	$\min_{i \in \mathcal{E}} \{LS_i\}$
<i>MINSLK</i>	Marge totale minimale	$\min_{i \in \mathcal{E}} \{LF_i - EF_i\}$
<i>MINDUR</i>	Durée minimale	$\min_{i \in \mathcal{E}} \{y_i\}$
<i>ACTRES</i>	Consommation de ressource maximale	$\max_{i \in \mathcal{E}} \{y_i \times R_i\}$
<i>GRD</i>	Utilisation du nombre maximal de ressources	$\max_{i \in \mathcal{E}} \{R_i\}$
<i>MAXDUR</i>	Durée maximale	$\max_{i \in \mathcal{E}} \{y_i\}$
<i>SRD</i>	Utilisation du nombre minimal de ressources	$\min_{i \in \mathcal{E}} \{R_i\}$

L'utilisation de ces règles d'affectation statiques dans un contexte de réfection ne prend pas avantage du caractère dynamique de l'algorithme d'ordonnancement proposé. La pleine utilisation des capacités de cet algorithme nécessite nécessairement le développement de règles d'affectation dynamiques.

5.3.2 Règles d'affectation dynamiques

Comme l'algorithme d'ordonnancement proposé permet de mettre à jour les données du CPM à chaque événement, les règles d'affectation basées sur ce calcul peuvent être facilement utilisées dans un cadre dynamique. La règle *MINSLK* (marge totale minimale) prend ainsi une forme dynamique en redéfinissant la marge totale d'une activité en fonction du moment de résolution, c'est-à-dire:

$$MINSLK \text{ (dynamique): } \quad MIN_{i \in \mathcal{E}} \left\{ LF_i^t = x - EF_i^t = x \right\} \quad (5.14)$$

Bien que faisable, il n'est pas intéressant de changer le caractère statique de la règle *MINLS* (départ au plus tard minimale). En effet, les définitions statiques et dynamiques du concept de départ au plus tard d'une activité aboutissent sur les mêmes décisions d'ordonnancement. Cette similarité apparaît plus clairement lorsque l'on décrit la date de départ au plus tard en fonction du temps minimal pour compléter les activités succédant une activité i donnée, Ω_i :

$$MIN_{i \in \mathcal{E}} \left\{ \tau^{t=0} - \Omega_i \right\} = MIN_{i \in \mathcal{E}} \left\{ \tau^{t=x} - \Omega_i \right\} \quad (5.15)$$

Il faut aussi noter que la règle *MINES* (date de départ au plus tôt) n'est pas utilisable dans un contexte dynamique car elle ne permet pas de différencier la priorité des activités admissibles (i.e. $ES_i^{t^x} = 0$ pour $\forall i \in \xi$).

En plus de la règle de marge totale minimale dynamique, nous proposons une nouvelle règle d'affectation développée spécifiquement pour des projets de réfection. Cette dernière concentre l'affectation des ressources aux activités dominantes en terme de leur impact sur la durée totale du projet.

5.3.3 Recherche de dominance

Une activité est considérée comme dominante pour l'ordonnancement lorsqu'elle influence directement la durée totale du projet. Les activités critiques, telles que définies par le CPM, n'indiquent pas nécessairement les activités du chemin le plus long lorsque des contraintes de ressources sont présentes. La détermination des activités critiques ou dominantes passe plutôt par l'analyse des limitations instantanées de la quantité de ressources disponibles, appelées contraintes cumulatives.

5.3.3.1 Analyse des contraintes cumulatives

L'analyse des contraintes cumulatives est facilitée par le concept d'ensemble critique qui

correspond à un ensemble minimal d'activités I_c dont la réalisation simultanée requiert une quantité de ressource supérieure à la quantité disponible (Bell 1982). Lorsqu'un ensemble critique comprend exactement deux activités, on parle d'une contrainte disjonctive. En supposant que la durée minimale d'un projet soit connue, les conflits de ressources causés par un ensemble de disjonctions peuvent être résolus en partie par l'utilisation des règles de séquençement (voir Ulusoy et Özdamar 1994). La priorité d'une activité est alors basée sur la répercussion de retarder celle-ci sur le chemin critique. Ces règles visent une optimisation locale d'ordonnancement en considérant l'impact des conflits de ressources des activités admissibles au temps $t = x$ sur la durée minimale du projet.

Bien que supérieures aux règles d'affectation heuristiques dans le cas de projets standards (Ulusoy et Özdamar 1994), ces règles d'optimisation locale souffrent de lacunes importantes lorsque des contraintes disjonctives demeurent permanentes sur une grande portion de l'ordonnancement. Ce type de contrainte est particulièrement fort et représente dans la majorité des cas des contraintes encore plus fortes ou structurantes que celles d'antériorité. Ces règles de séquençement s'appuient ici uniquement sur les contraintes d'antériorité (par l'intermédiaire des données du CPM) pour déterminer le chemin critique et déterminent la séquence des activités en accord avec ce calcul.

Dans le cas où des contraintes disjonctives et cumulatives, GOTHIA (1993) fait remarquer qu'il est avantageux de traiter en priorité les contraintes disjonctives qui sont généralement plus structurantes pour l'ordonnancement. Lorsque des contraintes de zones,

particulièrement importantes dans un projet de réfection, introduisent des contraintes disjonctives permanentes, le chemin critique donné par le CPM donne une fausse indication des activités structurantes sur l'ordonnancement. Il devient nécessaire dans ce cas de redéfinir le concept de dominance d'une activité par rapport à la durée minimale d'un projet.

5.3.3.2 Affectation par contraintes dominantes

Comme discuté au chapitre 3, l'espace accordé à une zone est restreint de sorte qu'une seule activité est réalisée dans une zone de travail à n'importe quel moment. La durée requise pour compléter l'ensemble des activités dans une zone k , Z_k , donne ainsi une borne inférieure pour la durée totale du projet, soit:

$$Z_k \geq \sum_{i=1}^n c_{ik} y_i \quad (5.16)$$

où $c_{ik} = 1$ lorsque l'activité i fait partie de la zone k et $c_{ik} = 0$ autrement.

Au niveau des activités, la durée de la séquence d'activités la plus longue à la suite d'une activité i doit comprendre, en plus du temps nécessaire pour compléter les activités subséquentes $\in S(i)$, le temps nécessaire pour compléter toutes les activités comprises dans la même zone qui n'ont pas encore été complétées. Notons ainsi Z_k^{ix} comme la

durée restante minimale planifiée de la zone k au temps $t = x$. La durée minimale restante suivant le début d'une activité est alors donnée par:

$$\phi_i^{t=x} = \text{Max}[\Omega_i, Z_k^{t=x}] \quad , \forall i \in \text{zone } k \quad (5.17)$$

Cette évaluation dynamique de la durée minimale restante à la suite d'une activité mesure l'influence des contraintes disjonctives et d'antériorité sur la réalisation de ces successeurs. La règle d'affectation proposée, $\text{Max } \phi_i^{t=x}$, tente ainsi d'ordonnancer en premier lieu les activités générant la séquence immédiate la plus longue. En raison de son objectif, nous utiliserons dorénavant le terme *MAXCON* (Maximum Constrained Activity) pour identifier cette règle.

5.4 Conclusion

La procédure d'ordonnancement proposée tient compte des particularités de la réfection. Elle permet premièrement d'évaluer de façon plus réaliste la durée d'un projet en considérant les contraintes de zones et la variabilité des activités de réparation. De plus, elle permet d'identifier la stratégie d'ordonnancement des tâches qui minimise l'espérance mathématique de la durée du projet. Le caractère dynamique de l'algorithme proposé contribue à améliorer de façon rapide la prise de décision d'ordonnancement en cours de projet sans limiter le choix des règles d'affectation.

La règle d'affectation proposée, *MAXCON*, et celles présentées dans les sections précédentes seront testées à partir d'un ensemble de réseaux d'activités dans le prochain chapitre. Ce chapitre démontre également la mise en application réelle de l'algorithme et du modèle d'ordonnancement en présentant l'étude d'un cas pratique.

CHAPITRE VI

EXPÉRIMENTATION

6.1 Introduction

La démonstration de la validité du modèle d'ordonnancement dynamique proposé requiert la définition d'un cadre expérimental rigoureux. La détermination du nombre de projets, la définition d'une structure représentative des réseaux d'activités de réfection et la construction d'un outil d'analyse propice à la simulation y représentent des étapes cruciales. Ainsi, avant de présenter les résultats obtenus dans la phase expérimentale, ce chapitre débute par la présentation de la méthodologie d'expérimentation. Cette dernière repose sur la construction d'un programme informatique, appelé OVERPLAN. La structure du programme est d'ailleurs présentée à la section 6.2.

Les sections subséquentes couvrent une série de tests menés à différents niveaux. Le cas déterministe est d'abord traité à partir d'un ensemble de réseaux d'activités générés de façon aléatoire. Ces premiers tests visent à démontrer le caractère dominant des contraintes disjonctives de zones et à évaluer par le fait même la performance de la règle d'affectation proposée à la section 5.3. Puis, dans un deuxième temps, le modèle complet, incluant la simulation du réseau d'activités, est testé en utilisant le même ensemble de réseaux d'activités. L'objectif est de démontrer les avantages du modèle proposé par rapport aux approches traditionnelles de planification de projet. Finalement, la dernière

série d'expériences est effectuée à partir d'un cas pratique afin d'illustrer la mise en application réelle du modèle d'ordonnancement dynamique.

6.2 Cadre expérimental

Malgré l'importance du nombre de recherches en ordonnancement de projet, il n'existe pas à ce jour de procédure établie pour guider l'évaluation et la comparaison de nouveaux modèles. La provenance des projets étudiés lors des tests est souvent inconnue et les analyses expérimentales se limitent habituellement à un nombre restreint de réseaux d'activités. Même les plus récentes études comparatives recourent généralement à moins de 70 projets tests (voir Alvarez-Valdez et Tamarit (1989), Badiru (1988), Boctor (1990), Christofides et al. (1987) et Khatab et Choobineh (1994). L'analyse de 111 projets tests par Özdamar et Ulusoy (1994) demeure une des recherches les plus exhaustives dans le domaine.

La généralisation des conclusions tirées de ces études doit donc se faire de façon prudente. Pour éviter de biaiser toutes conclusions, nous fixerons le nombre de projets tests à 300. En plus du nombre de projets, la structure des réseaux et leur provenance doivent aussi garantir la représentativité des tests. L'utilisation d'un générateur de projets permet d'atteindre cet objectif.

6.2.1 Génération des réseaux d'activités

Le recours aux projets couramment utilisés dans la littérature pour l'analyse et la comparaison de modèle d'ordonnancement (voir Boctor 1990; Badiru 1988) n'est pas pertinent en raison de la structure particulière des réseaux d'activités de réfection. Tous les projets de réfection se décrivent par un réseau divergent à son départ et convergent à sa fin. Les chemins sortant de l'extrémité divergente du réseau, c'est-à-dire à la suite de l'activité de démontage, sont indépendants (ou dépendance très faible) ce qui entraîne un nombre élevé de chemins parallèles.

La série de réseaux d'activités utilisée pour cette phase d'expérimentation doit nécessairement tenir compte de cette particularité des projets de réfection. La construction d'un générateur de réseaux d'activités nous donne la possibilité de forcer cette structure tout en demeurant neutre dans la construction des projets. L'approche utilisée consiste à générer d'abord un nombre de composants de façon aléatoire, puis à générer une séquence d'activités de réparation et des zones de travail pour chacun d'eux. Cette méthodologie force inévitablement l'apparition de chemins parallèles dans la structure du réseau. 300 projets tests, comprenant entre 10 et 30 activités, furent ainsi générés.

Le recours à la simulation et à la génération de réseaux d'activités requiert obligatoirement

l'utilisation d'un outil informatique. Le programme développé dans le cadre de cette recherche est présenté à la section suivante.

6.2.2 Programme de simulation

La programmation du modèle de simulation, incluant la procédure de simulation du réseau de base d'un projet et l'algorithme d'ordonnancement dynamique, permet d'accélérer le processus d'analyse en plus de relier ces fonctions directement à une application conventionnelle d'ordonnancement de projet. Ce lien électronique évite ainsi la duplication de données en utilisant les fichiers de projets déjà contenus dans un système d'information existant.

Connaissant la structure et le format standards des logiciels commerciaux de planification de projets, il fut décidé de programmer l'application de simulation et d'ordonnancement en recourant à un système de gestion de base de données relationnelle (RDMS) répandu, Microsoft FoxPro® (version 2.6 pour Windows™). L'application, appelé OVERPLAN, s'appuie sur une structure de fichiers identique aux applications commerciales en utilisant des fichiers de données distincts pour la description des activités, la définition des relations entre activités et la disponibilité des ressources. Bien qu'il ralentisse en partie le processus d'analyse, un fichier de calcul distinct pour la simulation est utilisé afin d'éviter de corrompre les données déterministes utilisées par d'autres applications. La structure du

programme OVERPLAN est présentée à la figure 6.1. Le code de programmation est quand à lui présenté de façon intégrale à l'annexe I.

Il faut aussi noter que l'application de simulation utilise sa propre fonction de génération de nombres pseudo-aléatoires afin de garantir la validité des tests. Le générateur utilisé, décrit par les équations (6.1), correspond à une approche à congruence robuste et non biaisée pour la simulation Monte Carlo (Ripley 1987).

$$X_i = (69069 * X_{i-1} + 1) \bmod 2^{32}, U_i = 2^{-32} X_i \quad (6.1)$$

6.3 Expérimentation

Comme indiqué antérieurement, le modèle proposé est testé en utilisant un ensemble de 300 réseaux d'activités construits de façon aléatoire. La phase d'expérimentation est divisée en deux étapes. La première série de tests considère le cas déterministe. Ces tests permettent d'évaluer la performance et le comportement des règles heuristiques d'affectation lorsque les activités d'un projet sont soumises à des contraintes de zones en plus des contraintes de ressources.

Le deuxième groupe de tests se concentre sur le cas stochastique, plus général et plus

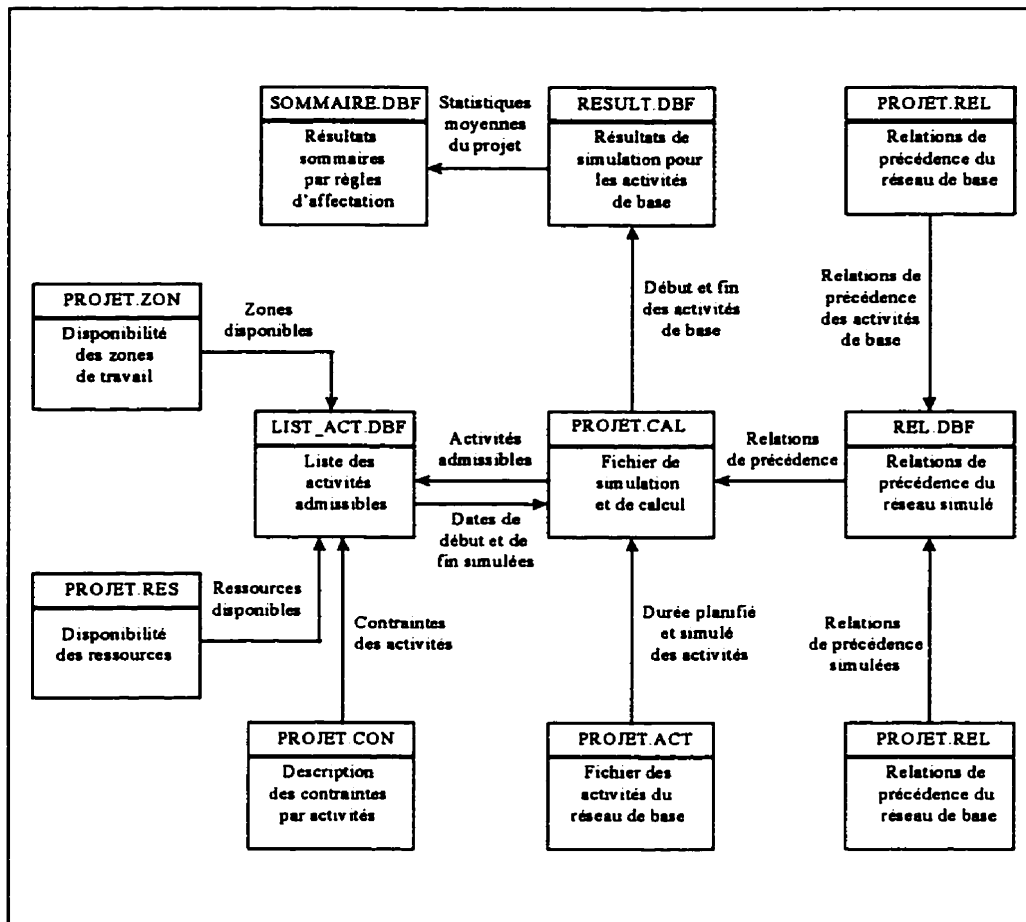


Figure 6.1 Structure du programme OVERPLAN

proche de l'environnement de réfection. Dans ce contexte, l'évaluation et la comparaison des règles d'ordonnancement requièrent plusieurs répliques pour chacun des projets étudiés. Le nombre de répliques doit ainsi permettre de comparer différentes règles d'affectation et d'identifier celles aboutissant sur des durées moyennes minimales. En

accord avec Padilla et Carr (1991), un nombre de 30 répliques est généralement suffisant et sera utilisé pour cette deuxième série de tests. Lors de l'étude du cas pratique, ce nombre sera augmenté afin de permettre la construction d'un intervalle de confiance acceptable pour la durée du projet. Dans ce cas, Moder et al. (1983) rapporte qu'un nombre de 1000 répliques permettent d'obtenir des résultats fiables.

6.3.1 Expérimentation dans le cas déterministe

L'ordonnancement de chacun des réseaux fut réalisé en utilisant systématiquement chacune des 10 règles heuristiques décrites au chapitre précédent et en supposant des durées fixes et en ignorant l'impact des bris imprévus au cours d'un projet de réfection. Pour chacun des réseaux, le tableau des résultats, présenté à l'annexe II, indique la durée calculée du projet avec chacune des règles d'affectation et la durée minimale obtenue pour l'ensemble des règles d'affectation. Comme mentionné par Boctor (1991), le comportement de ces règles d'affectation varie d'un réseau à l'autre et il est impossible d'en prédire le comportement pour un projet donné. Les résultats obtenus sont résumés au tableau 6.1.

Ces résultats préliminaires démontrent que la règle d'affectation proposée, *MAXCON*, permet d'obtenir un ordonnancement de durée moyenne minimale pour l'ensemble des réseaux étudiés. La durée moyenne obtenue est inférieure de 1,5 % à celle obtenue par la

Tableau 6.1 Durée moyenne des projets dans le cas déterministe

RÈGLES D'ORDONNANCEMENT	Durée moyenne (jours)	Rang
<i>Statique</i>		
MINES	249.75	6
MINSLK	243.16	2
MINDUR	243.47	3
ACTRES	257.01	9
GRD	251.27	7
MAXDUR	257.79	10
SRD	256.78	8
<i>Dynamique</i>		
MINLS	246.61	4
MINSLK-DYN	246.77	5
MAXCON	239.42	1

deuxième meilleure règle, soit *MINSLK*. Cette règle a permis d'obtenir une durée minimale dans 40.3 % des cas comparativement à 31.3 % pour la deuxième meilleure règle d'affectation. Le tableau 6.2 montre une comparaison des pourcentages d'obtention d'une durée calculée minimale pour l'ensemble des règles d'affectation.

Il faut aussi souligner que le caractère dynamique de la règle d'affectation *MINSLK* (marge totale minimale) n'améliore pas la performance de celle-ci dans un environnement déterministe. Cette particularité apparaît de façon marquée en comparant les résultats obtenus par cette règle dans le contexte statique et dans celui dynamique. En

Tableau 6.2 Nombre d'obtention de la durée minimale dans le cas déterministe

RÈGLES D'ORDONNANCEMENT	Nombre de durée minimale calculée	% durée minimale obtenue	Rang
<i>Statique</i>			
MINES	39	13.0 %	9
MINSLK	94	31.3 %	2
MINDUR	92	30.7 %	3
ACTRES	39	13.0 %	9
GRD	38	12.7 %	10
MAXDUR	45	15.0 %	6
SRD	43	14.3 %	7
<i>Dynamique</i>			
MINLS	60	20.0 %	4
MINSLK-DYN	56	18.7 %	5
MAXCON	121	40.3 %	1

plus d'obtenir une durée minimale dans 94 des 300 cas étudiés comparativement à 56, la règle *MINSLK* statique aboutit sur des échéanciers inférieurs en durée de l'ordre de 1,5 % en comparaison avec ceux du cas dynamique.

Ces résultats préliminaires, menés dans un contexte différent de celui des projets typiques de réfection, démontrent l'importance des contraintes de zones sur la durée totale d'un projet. La considération de ces contraintes disjonctives dans le processus d'ordonnancement permet d'augmenter la priorité relative des activités touchées par les contraintes dominantes. La valeur de la règle d'affectation proposée ne se limite donc pas

à la planification de projets de réfection mais à l'ensemble des projets contraints par des espaces de travail limités et conflictuels entre activités.

6.3.2 Expérimentation dans le cas stochastique

Les réseaux déterministes sont maintenant généralisés pour se rapprocher du contexte plus réaliste d'un projet de réfection en ajoutant la dimension stochastique de la séquence des événements et de la durée des activités. Des distributions de probabilité pour les durées des activités et pour les périodes de blocage lors de l'apparition de bris non prévisibles furent ainsi attribuées aux activités de façon aléatoire par le générateur de réseaux présenté à la section 6.2.1.

Cette série de tests comprend l'exécution de 30 répliques pour chacune des règles d'ordonnancement et ce pour chacun des réseaux générés lors de la première phase d'expérimentation. La même séquence de nombres pseudo-aléatoires est utilisée afin de ne pas biaiser les résultats. Ainsi, la durée simulée et le nombre de bris imprévisibles sont identiques pour toutes les règles d'affectation d'une réplique à l'autre. Les résultats ainsi obtenus sont donnés au tableau 6.3.

Dans le cas stochastique, les règles d'ordonnancement dynamiques apparaissent nettement

Tableau 6.3 Durée moyenne des projets dans le cas stochastique

RÈGLES D'ORDONNANCEMENT	Durée moyenne (jours)	Rang
<i>Statique</i>		
MINES	264.90	4
MINSLK	266.68	6
MINDUR	266.35	5
ACTRES	272.27	8
GRD	267.41	7
MAXDUR	274.46	9
SRD	276.70	10
<i>Dynamique</i>		
MINLS	261.68	1
MINSLK-DYN	261.88	2
MAXCON	262.65	3

supérieures à celles statiques comme l'illustre la figure 6.2. Ces résultats démontrent clairement la supériorité de l'algorithme d'ordonnancement dynamique proposé comparativement aux algorithmes statiques. L'actualisation des priorités en cours de projet, dans un contexte stochastique, permet ainsi de résoudre les conflits de ressources instantanés en tenant compte des décisions d'ordonnancement antérieures.

Le comportement des règles d'affectation semble cependant plus imprévisible que dans le cas déterministe. Ainsi, chacune des règles aboutit sur un échéancier minimal dans une proportion moindre que lors des tests précédents, comme le démontre le tableau 6.4. Les

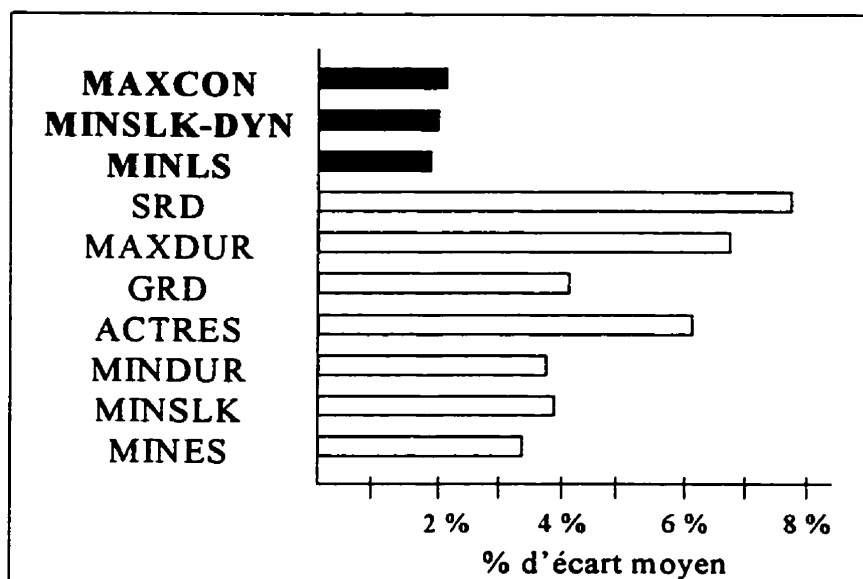


Figure 6.2 Écart moyen par rapport à la durée minimum obtenue

règles d'affectation dynamiques sont néanmoins supérieures aux autres tant au niveau du pourcentage d'obtention d'un échéancier minimal qu'en terme de la durée moyenne minimale pour l'ensemble des réseaux. Contrairement au cas déterministe, la règle *MINSLK* statique est nettement inférieure à son équivalent dynamique.

En plus de démontrer la validité de l'algorithme d'ordonnancement dynamique, l'évaluation statistique de la durée moyenne d'un projet, par l'intermédiaire du modèle de simulation, démontre l'écart entre l'approche proposée et les modèles traditionnels d'ordonnancement. L'évaluation déterministe de la durée des projets de réfection étudiés

Tableau 6.4 Nombre d'obtention de la durée minimale dans le cas stochastique

RÈGLES D'ORDONNANCEMENT	Nombre de durée minimale calculée	% durée minimale obtenue	Rang
<i>Statique</i>			
MINES	22	7.3 %	7
MINSLK	45	15.0 %	4
MINDUR	51	17.0 %	3
ACTRES	17	5.7 %	8
GRD	30	10.0 %	6
MAXDUR	15	5.0 %	9
SRD	8	2.7 %	10
<i>Dynamique</i>			
MINLS	64	21.3 %	1
MINSLK-DYN	39	13.0 %	5
MAXCON	62	20.7 %	2

sous-estime la durée espérée de ces derniers de 6.8 %. En pratique, cet écart d'évaluation se traduirait directement par le non-respect des dates planifiées.

Les premiers tests n'ont pas traité de la problématique concernant l'établissement d'un intervalle de confiance lors de l'analyse de réseaux stochastiques. Les règles d'affectation ont été simplement comparées sur la base de la durée moyenne des échéanciers qu'elles produisent. La construction d'un intervalle de confiance lors de l'analyse d'un projet est cependant essentielle et sera traitée à la section suivante avec un projet réel de réfection.

6.4 Analyse d'un projet réel de réfection

Le projet étudié correspond à la remise à neuf d'un aéronef militaire réalisée au cours de l'année 1994. Bien qu'étant un cas pratique, les durées des activités du projet furent modifiées en partie afin de conserver la confidentialité des données. La structure du réseau et l'ordre de grandeur des différentes données ont cependant été conservés afin de préserver l'aspect pratique de l'analyse. Les données historiques pour ce type de projet contiennent implicitement la durée associée aux imprévus. Le modèle de simulation doit donc se limiter à générer la durée des activités et les périodes de blocage.

6.4.1 Description du projet

La structure du réseau est présentée à la figure 6.3. Ce réseau illustre la structure divergente puis convergente d'un réseau d'activités de réfection. Les premières activités d'inspection et de démontage sont suivies par des séquences d'activités de réparation et représentées par des chemins parallèles indépendants. Les caractéristiques des activités sont décrites à l'annexe IV.

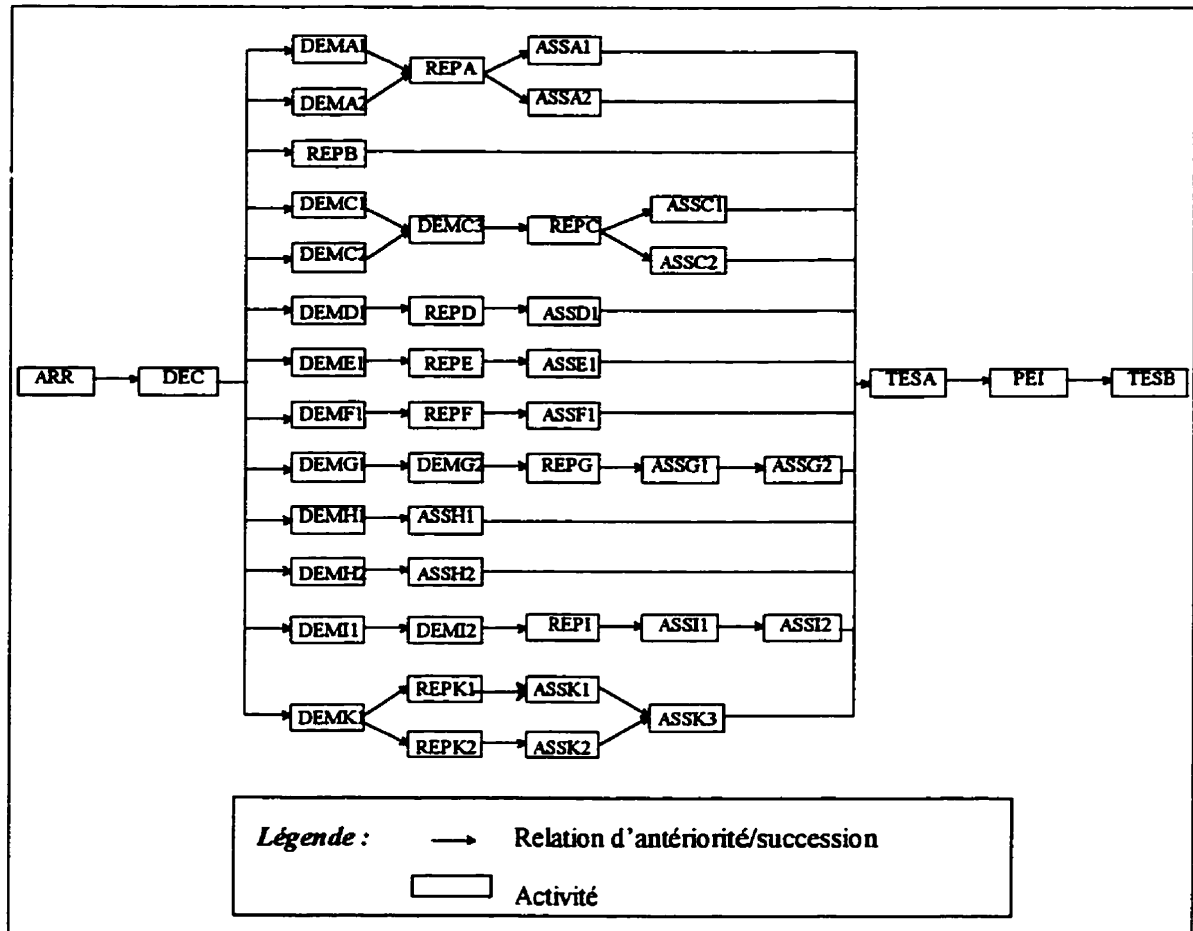


Figure 6.3 Réseau d'activités du projet

6.4.2 Description des zones de travail

La construction du réseau d'activités doit d'abord débiter par la définition des zones de travail où chaque zone correspond à un emplacement précis sur l'équipement même ou à un lieu de travail déterminé. Cette étape est nécessaire afin d'orienter l'énumération des tâches en fonction des aires de travail plutôt qu'en fonction des systèmes ou des modules d'un équipement (Moen 1985). Ainsi, les différents travaux de réparation d'un système

occupant une grande surface (i.e. les systèmes hydrauliques, les conduites de carburant, etc.) doivent être décortiqués en fonction des zones de travail lorsque possible. Une telle définition des zones de travail permet de limiter le nombre d'activités simultanées à un endroit donné.

En tenant compte des composants visés par la remise à neuf et des équipements utilisés pour supporter l'appareil (tétraux et vérins), quatre zones de travail ont été identifiées dans l'analyse du cas pratique. Ces zones sont illustrées à la figure 6.4.

6.4.3 Détermination d'une stratégie d'ordonnancement

Les tests nécessaires pour cette étude de cas ont été réalisés dans des conditions se rapprochant le plus possible de celles d'un planificateur de projets. Un ordinateur personnel de type Pentium 100Mhz (PC compatible IBM), comprenant 16 Meg de mémoire vive, fut ainsi choisi pour conduire ces tests, et ce, en raison de la grande popularité commerciale des réseaux clients-serveur.

6.4.3.1 Analyse préliminaire

Tout comme la première phase d'expérimentation, chacune des règles d'ordonnancement fut testée dans un contexte déterministe puis stochastique en utilisant le même ensemble de

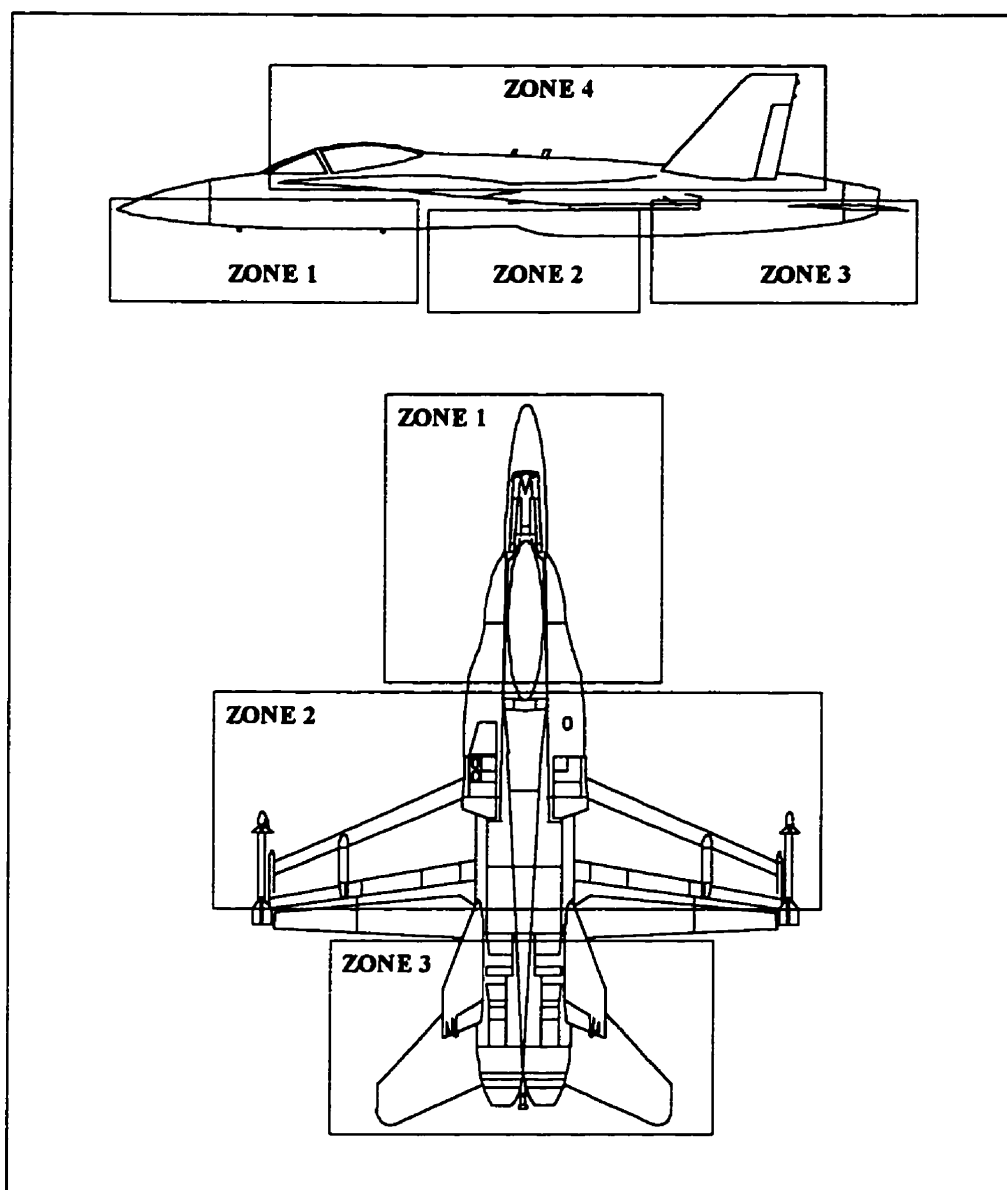


Figure 6.4 Schéma des zones de travail

nombres pseudo-aléatoires. Bien qu'insuffisant pour établir un intervalle de confiance statistiquement valable, le nombre de répliques fut fixé à 30 dans le cas stochastique. Cette première série de répliques permet ainsi d'identifier rapidement les meilleures

stratégies d'affectation (Padilla et Carr 1990). Les résultats obtenus sont résumés au tableau 6.5.

Tableau 6.5 Durée moyenne calculée du projet réel

RÈGLES D'ORDONNANCEMENT	Calcul déterministe		Calcul stochastique	
	Durée moyenne	Rang	Durée moyenne	Rang
<i>Statique</i>				
MINES	457	5	519	6
MINSLK	450	4	517	3
MINDUR	514	6	544	10
ACTRES	457	5	523	7
GRD	521	7	526	9
MAXDUR	457	5	523	7
SRD	552	8	517	3
<i>Dynamique</i>				
MINLS	448	2	517	3
MINSLK-DYN	448	2	515	2
MAXCON	446	1	510	1

Bien que la performance des règles heuristiques diffère lors des calculs déterministes et stochastiques, le calcul déterministe permet d'identifier rapidement et de façon fiable un ensemble de règles d'ordonnancement supérieures aux autres. Les résultats présentés au tableau 6.5 démontrent d'ailleurs que l'ensemble des trois meilleures règles d'affectation demeure identique dans les deux contextes d'analyse. La généralisation de ce résultat est évidemment souhaitable en pratique pour limiter les expériences de simulation aux règles identifiées comme supérieures par le calcul déterministe. Le calcul stochastique par

simulation demeure toujours essentiel pour évaluer adéquatement la durée du projet. Pour le cas étudié, le calcul déterministe tend à sous-estimer la durée moyenne espérée de l'ordre de 10 %.

Tout comme les tests précédents, les règles d'ordonnancement à caractère dynamique aboutissent sur des durées moyennes inférieures à celles obtenues par les règles statiques. Leur temps d'exécution est cependant plus long pour ces règles à l'exception de la règle *MINLS* qui ne requiert pas de mise à jour des priorités. La durée moyenne espérée minimale est obtenue avec la règle *MAXCON*. Il n'est cependant pas possible de différencier statistiquement à partir d'un intervalle de confiance à 90% les résultats obtenus par les règles *MAXCON* et *MINSLK* en utilisant seulement 30 réplifications. Il est alors nécessaire de procéder à d'autres réplifications afin de limiter l'étendue des intervalles de confiance, comme le démontre la prochaine section.

6.4.3.2 Sélection d'une règle d'affectation

Les premières expériences nous permettent de construire un ensemble restreint de règles d'ordonnancement supérieures. Étant donné la différence de performance entre la règle *MAXCON* et les autres, nous limiterons ces réplifications supplémentaires aux seules règles *MAXCON* et *MINSLK* dynamique. La réalisation de 1000 réplifications permet de construire les intervalles de confiance des durées moyennes à un niveau de 90 %:

MAXCON: 510.48 ± 2.91

MINSLK: 516.46 ± 2.98

Ces résultats démontrent clairement la supériorité de la règle *MAXCON* en terme de la moyenne espérée pour la durée de ce projet. La distribution de la durée du projet, avec l'utilisation de cette règle d'ordonnancement, est caractérisée par une distribution de type normal avec moyenne 510.48 et variance 56.10.

6.4.3.3 Réduction de variance

La construction des intervalles de confiance pour la moyenne espérée et la distribution de la durée du projet s'est fait sans chercher à utiliser l'approche de réduction de variance proposée au chapitre 4. Lors de l'expérimentation, l'utilisation d'une variable de contrôle pour réduire la variance de l'estimateur de la durée moyenne n'atteint que partiellement son objectif. La plus grande réduction de variance fut obtenue avec la règle *GRD* en atteignant une réduction de variance de l'ordre de 6 %.

La faible corrélation entre la durée totale du projet et le nombre de périodes de blocage, suite à l'apparition de bris non planifiés et sans méthodologie de travail existante, explique ce résultat. En effet, le nombre de périodes de blocage a peu d'impact sur la durée de ce projet en occupant moins de 5 % de la charge de travail totale moyenne. Les périodes de

blocage ont toutefois une influence marquée sur la performance des règles d'ordonnancement. La figure 6.5 démontre l'impact d'une variation de la probabilité de blocage lors de l'apparition d'imprévus sur la durée moyenne du projet.

Ces résultats démontrent encore plus clairement le peu de corrélation entre le nombre de périodes de blocage et la durée moyenne du projet étudié. La charge de travail générée par les périodes de blocage est tellement faible par rapport à la charge de travail totale, qu'une augmentation du nombre de blocage peut même occasionner une baisse de la durée moyenne (corrélation négative). Seule l'apparition de bris imprévus sur les activités critiques ont un impact réel sur la durée du projet. L'utilisation du nombre de blocages comme variable de contrôle n'est donc pas propice pour le projet choisi.

Il faut toutefois s'attendre à obtenir de meilleurs résultats lorsque les données historiques d'un projet ne contiennent pas de façon implicite la durée des imprévus. Le nombre total d'imprévus, évidemment supérieure au nombre de blocage créé seulement par les imprévus sans méthodologie de travail, devrait influencer la durée totale d'un projet de façon plus marquée et conséquemment représenter une meilleure variable de contrôle. À titre d'exemple, la simulation des imprévus dans l'analyse de projet étudié, en ignorant donc le fait que les données historiques comprennent déjà ces informations, conclut sur une corrélation plus forte entre la variable de contrôle et la durée moyenne du projet. Une réduction moyenne de 15% de la variance est ainsi obtenue sans exécuter des réplifications

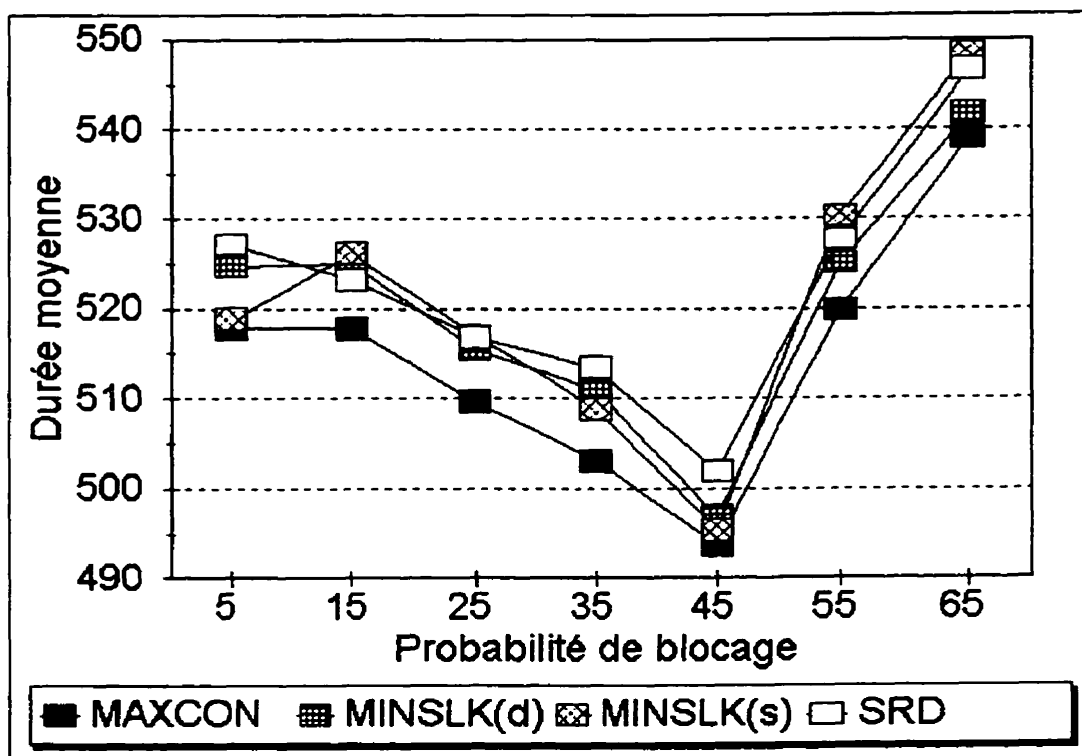


Figure 6.5 Influence de la probabilité de blocage sur la durée moyenne du projet

supplémentaires. Ces résultats ne sont cependant pas assez appréciables pour recommander l'utilisation de cette technique de réduction de variance dans le contexte étudié.

6.5 Conclusion

Les expériences conduites à partir de projets fictifs et d'un cas réel ont démontré

l'avantage de recourir à un algorithme de résolution dynamique pour l'ordonnancement des activités. Bien que l'algorithme proposé fut introduit dans un contexte d'analyse de projets stochastiques, il semble que celui-ci réagit tout aussi bien pour l'ordonnancement de projets déterministes avec contraintes de zones. La reconnaissance des activités dominantes, par l'intermédiaire de la règle d'affectation *MAXCON*, apparaît comme une approche supérieure aux règles d'ordonnancement connues pour minimiser la durée espérée d'un projet. Dans le cas où les contraintes disjonctives permanentes de zones sont structurantes pour l'ordonnancement, cette règle dynamique performe mieux que les règles reposant uniquement sur les informations du CPM.

En plus de la validité de l'algorithme d'ordonnancement, ces expériences ont clairement démontré les avantages qu'apporte l'utilisation du modèle de planification proposé. La simulation d'événements aléatoires et la considération de ceux-ci lors de l'ordonnancement des activités permet d'évaluer avec une plus grande précision la distribution de la durée d'un projet de réfection. L'augmentation de la précision du processus de planification permet de réduire considérablement les risques de non-respect des délais de livraison fixés avec le client. Bien que ces bénéfices apparaissent lors de l'analyse de projets de réfection uniques et indépendants, la structure générique du modèle de planification permet d'en généraliser l'utilisation pour la planification multi-projet. Le prochain chapitre en présente les grandes lignes en s'appuyant sur des données réelles.

CHAPITRE VII

GÉNÉRALISATION DU MODÈLE

7.1 Introduction

La méthodologie de planification proposée vise à améliorer l'évaluation de la durée d'un projet et à minimiser celle-ci lors de l'exécution d'une remise à neuf. Jusqu'à présent, nous avons considéré l'ordonnancement d'un projet unique où un ensemble de ressources est affecté entièrement à ce dernier. En pratique, les ressources peuvent être partagées entre plusieurs projets concomitants. La planification en mode multi-projet diffère de la planification de projet unique par le plus grand nombre d'activités à ordonnancer et aussi en raison de l'horizon de planification plus étendu. La planification multi-projet se rapproche ainsi de la gestion de production d'ateliers.

Tout comme ce type de gestion, la gestion multi-projet comprend deux niveaux de planification distincts: la planification stratégique des opérations et l'ordonnancement des tâches. La planification stratégique vise à déterminer les dates de livraison pour un nombre déterminé de projets ainsi que de partager l'ensemble des ressources disponibles entre ces derniers (Speranza et Vercellis 1993). Les décisions prises à ce niveau influencent directement l'ordonnancement des tâches en fixant des objectifs pour la réalisation de chacun des projets et en imposant des contraintes de ressources. De l'autre

côté, l'ordonnancement se limite à un horizon de planification beaucoup plus court en fixant les dates de début pour chacune des activités (GOTHA 1993).

La flexibilité du modèle de planification proposé en permet l'utilisation à chacun de ses niveaux. Ce chapitre traite d'abord le cas de l'ordonnancement multi-projet. Par la suite, une méthodologie de planification stratégique est présentée. L'utilisation de cette approche a d'ailleurs permis de réduire les délais de livraison de projets réels de 25 %.

7.2 Ordonnancement en mode multi-projet

Dans un environnement multi-projet, un certain nombre de projets sont entrepris en même temps. À l'intérieur d'une usine de réfection, ce nombre de projets concomitants est limité par l'espace disponible lequel est défini comme la capacité. L'ensemble de la main-d'oeuvre est ici partagé entre les projets de deux façons. Premièrement, un certain nombre de ressources est dédié spécifiquement à chaque projet. Les ressources résiduelles forment un bassin de main-d'oeuvre mobile et sont affectées à des activités données selon l'avancement et la priorité accordée à chacun des projets. Cette flexibilité permet notamment de déplacer des ressources à la suite d'un imprévu pour récupérer un retard accumulé dans un projet. L'avancement d'un projet particulier n'est donc pas indépendant de l'avancement des autres projets.

7.2.1 Méthodologie d'ordonnancement multi-projet

Dans un environnement statique, l'ordonnancement multi-projet passe directement par l'affectation des ressources sur un ensemble connu d'activités sans procéder à un calcul préliminaire des dates de livraison anticipées pour chaque projet (Patterson 1982). À l'opposé, les algorithmes d'ordonnancement multi-projet dynamiques comprennent généralement des procédures distinctes pour la résolution successive de deux éléments d'importance (Dumond 1992): la détermination d'une date de livraison individuelle pour chaque projet et l'ordonnancement complet des activités de tous les projets en fonction des dates de livraison auparavant calculées. La détermination des dates de livraison anticipées ou espérées est particulièrement difficile en raison de l'arrivée éventuelle mais non fixée de futurs projets. En pratique, l'estimation initiale de la date de livraison nécessite l'ajout d'un facteur de contingence pour contourner cet élément d'incertitude (Dumond et Mabert 1988).

Dans le cas de projets de réfection, l'entreprise fonctionne habituellement avec un nombre fixe de projets déterminé par la capacité physique de l'usine. En conséquence, le nombre moyen de ressources par projet est relativement constant; ce qui facilite le calcul des dates de livraison estimées.

7.2.2 Généralisation de l'algorithme d'ordonnancement

Connaissant le nombre moyen de ressources de chaque type alloué à chaque projet, l'estimation de la date de livraison d'un projet se rapproche d'un ordonnancement de projet unique. Pour ce faire, il est possible de faire appel directement à l'algorithme d'ordonnancement présenté au chapitre précédent sans même chercher à évaluer un facteur de contingence. On peut ainsi estimer la durée d'un projet en simulant son réseau de manière indépendante en utilisant un nombre moyen de ressources dédiées au projet. Un nombre restreint de répliques permet d'identifier rapidement une règle d'affectation acceptable et fixe par le fait même une date de début et de fin moyenne ou planifiée pour chacune des activités.

Cette première phase de planification détermine ainsi la séquence et la priorité des activités de base à l'intérieur d'un projet sans considérer les conflits de ressources entre projets. L'établissement d'un plan directeur de production nécessite donc de procéder à un ordonnancement plus global qui considère les conflits entre projets simultanés. Un tel calcul est réalisable en construisant un réseau d'activités complet $G_M (V_M, A_M)$ constitué des sous-réseaux individuels des M projets considérés. L'ordonnancement de ce réseau est simplifié et accéléré en raison des priorités relatives des activités déjà connues.

Cette méthodologie d'ordonnancement multi-projet, résumée à la figure 7.1, constitue aussi une approche intéressante pour la planification stratégique de projets comme le

démontre Villeneuve et al. (1995). En augmentant l'horizon de planification, le modèle permet d'établir un plan directeur de production qui est en accord avec les objectifs stratégiques de l'entreprise. L'établissement d'un ordonnancement multi-projet global est décrit à la section suivante.

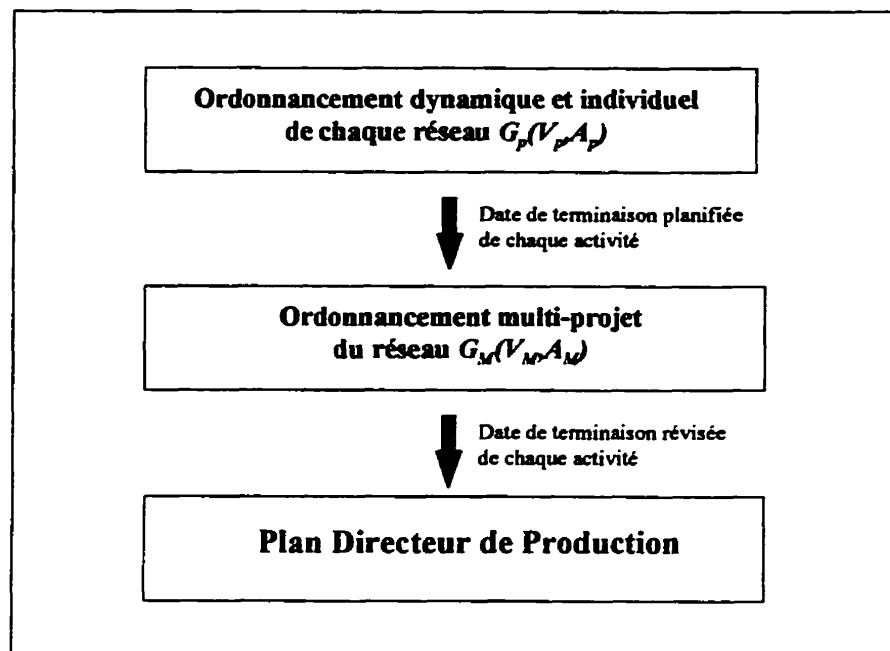


Figure 7.1 Méthodologie d'ordonnancement multi-projet

7.2.3 Algorithme d'ordonnancement multi-projet

Le processus d'ordonnancement multi-projet s'appuie sur les dates de début moyennes calculées de façon indépendante pour chacune des activités de base à l'aide du modèle

décrit aux chapitres 4 et 5. L'algorithme multi-projet débute en listant l'ensemble des activités admissibles et utilise le même processus de simulation pour générer la durée réelle des activités ainsi que les bris imprévus. Le réseau global $G_M (V_M, A_M)$ est ainsi modifié de façon statistique à chacune des répliques en accord avec le modèle de simulation proposé.

Les activités sont ordonnancées en affectant les ressources et les zones de travail appropriées aux activités dont la date de début moyen est minimale. Les activités non planifiées mais simulées lors de l'exécution d'une activité de base se voient octroyer la même date de début planifiée que l'activité de base touchée. Cette règle d'affectation force donc la séquence des activités d'un projet à se rapprocher de la séquence obtenue par la meilleure règle d'affectation déterminée au cours de l'ordonnancement dynamique initial. L'échéancier global ainsi formé tient compte de l'ensemble des contraintes des projets et se veut donc réalisable. L'utilisation de cette approche est non seulement valide pour l'établissement d'un échéancier de production à court terme mais est aussi adéquat pour construire un plan directeur de production qui s'échelonne sur plusieurs mois.

7.3 Planification stratégique en mode multi-projet

Un élément important de la planification stratégique est d'établir le niveau des ressources

pour une longue période de temps qui permet de rencontrer les objectifs de l'entreprise (Dumond 1992). Dans un environnement de réfection, il est difficile d'évaluer le nombre réel de techniciens nécessaires pour la réalisation d'un ensemble de projets entrepris simultanément en raison de la nature variable du contenu du travail. Les décisions à ce niveau doivent en plus spécifier le nombre de projets entrepris simultanément par l'unité de production. Avant d'aborder cette problématique, il est nécessaire de bien comprendre l'impact de ces décisions sur l'exécution des projets en temps réel.

7.3.1 Importance des décisions stratégiques

L'entreprise de réfection cherche habituellement à entreprendre un nombre élevé de projets concomitants afin d'avoir un grand nombre de tâches disponibles pour la réaffectation des ressources à la suite d'une panne et ainsi assurer une utilisation maximale des techniciens. De cette façon, on évite aussi de congestionner un appareil avec un grand nombre de ressources. Bien que cette utilisation semble adéquate pour l'entreprise de réfection, elle oblige le client à se départir d'un grand nombre d'équipements. De plus, lorsque l'ensemble des ressources est partagé sur un grand nombre de projets, la durée de chaque projet est plus longue que si un nombre inférieur était entrepris. Ceci s'explique simplement par le fait que le nombre moyen de ressources affectées à un projet est plus élevé lorsque le nombre de projets est réduit.

Il existe donc une relation entre la durée moyenne des projets et le nombre de projets concomitants. Cette relation n'est cependant pas linéaire. Lorsque l'on réduit le nombre de projets et que le nombre moyen d'employés par équipement augmente, les contraintes d'espace deviennent de plus en plus importantes. Comme l'équipement est en position fixe lors de la réfection, les techniciens doivent travailler directement sur l'équipement pour une grande proportion des travaux. La zone de travail occupée lors de l'exécution d'une tâche sur l'équipement limite le nombre d'employés dans la région voisine. Lorsque le nombre de techniciens est trop élevé, les contraintes de zones empêchent l'utilisation de tout le personnel disponible. En considérant cette relation, la section suivante présente les objectifs du modèle de planification stratégique proposé ainsi que le critère d'évaluation utilisé.

7.3.2 Objectifs de planification stratégique de projets

La date de livraison d'un projet a un impact considérable sur le déroulement en temps réel d'une remise à neuf car elle détermine en partie la priorité accordée à un projet lors de l'affectation des ressources. Le choix de la date de livraison des projets ainsi que du niveau de main-d'oeuvre représente les décisions clés de la planification stratégique de l'usine de réfection. La coordination des périodes de travaux des projets doit assurer une utilisation satisfaisante de la main-d'oeuvre de l'usine tout en permettant de rencontrer les objectifs fixés par le client. En général, les décisions de planification sont guidées par des

critères tels que durée minimale ou coût minimal. Speranza et Vercellis (1993) soulignent que le critère de coût minimal ou de valeur présente nette maximum est généralement réservé à une analyse touchant une plus grande période de temps, soit la planification stratégique. Le critère de durée minimale est plutôt employé au niveau opérationnel, soit l'ordonnancement des tâches.

Dans le cas étudié, les coûts de production sont considérés comme fixes pour toute la période d'analyse en raison de l'utilisation d'une main-d'oeuvre constante. On suppose également que les revenus ne dépendent pas des durées des projets étant donné que les contrats sont généralement signés de façon périodique pour une quantité d'équipements déterminés et non pas de façon individuelle pour chacun des projets.

En supposant des revenus et des dépenses fixes, le critère de valeur actuelle nette maximum n'est donc pas applicable à la situation étudiée. Le critère du coût minimal représente cependant l'objectif de l'entreprise de réfection. Comme le niveau de main-d'oeuvre de production constitue la seule variable affectant le coût de réalisation des travaux accordés pour l'entreprise de réfection, le critère de coût minimal est équivalent à l'utilisation d'une main-d'oeuvre minimale. Du point de vue du client, chaque remise à neuf entraîne une période de non-disponibilité de l'appareil. Le critère recherché est sans contredit la minimisation de la durée moyenne des projets. Bien que les deux objectifs soient à première vue contradictoires, il est possible d'établir un compromis acceptable pour les deux parties. Le critère d'évaluation retenu consiste à minimiser la durée

moyenne des projets de réfection en fonction d'une quantité déterminée de main-d'oeuvre. Ce critère est utilisé dans la méthodologie présentée à la section suivante.

7.3.3 Description de la méthodologie de planification stratégique

Le nombre de techniciens affectés à un projet détermine la disponibilité des ressources. La disponibilité est définie en terme de pourcentage des heures de travail à exécuter. Ainsi une disponibilité de 200 % indique que le nombre de ressources peut fournir deux fois plus d'heures de travail que le nombre d'heures actuellement requises pendant une période donnée. Dumond (1992) a étudié les effets du niveau de disponibilité des ressources dans un environnement dynamique de type multi-projet avec contraintes de ressources. Lorsque la disponibilité des ressources est réduite, les contraintes de ressources limitent de plus en plus l'avancement des projets. À l'opposé, lorsque la disponibilité des ressources est grande, les contraintes de ressources ont peu d'impacts sur le déroulement des projets. Ainsi, la durée d'un projet se rapproche du temps du chemin critique calculé par l'algorithme du CPM sans contrainte de ressources. Dumond a démontré que la relation entre la durée moyenne d'un ensemble de projets et la disponibilité des ressources suit une courbe décroissante telle que montrée à la figure 7.2.

Comme le nombre de projets entrepris simultanément détermine le nombre moyen de ressources par projet, en supposant un nombre total de ressources constant, il est possible

de relier le nombre de projets simultanés avec la durée moyenne des projets par une relation similaire à celle de la figure 7.2. Un niveau restreint de projets concomitants augmente le nombre moyen de ressources par projet. La disponibilité des ressources est alors élevée. À l'inverse, un nombre élevé de projets concomitants réduit la disponibilité moyenne des ressources par projet. La relation entre la capacité utilisée, c'est-à-dire le nombre de projets entrepris en même temps, et la durée moyenne des travaux agit à l'inverse de la relation de la figure 7.2, comme l'indique la figure 7.3.

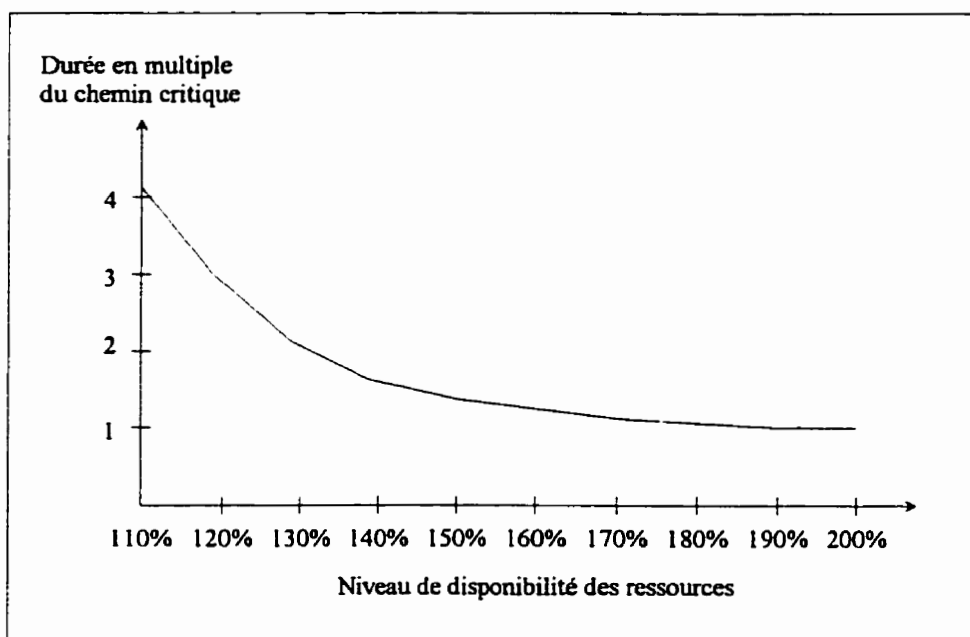


Figure 7.2 Relation entre le niveau de disponibilité et la durée moyenne

Bien que la réalisation d'un nombre limité de remise à neuf permet de réduire la durée moyenne de ceux-ci, un nombre limité de projets concomitants peut entraîner des pertes

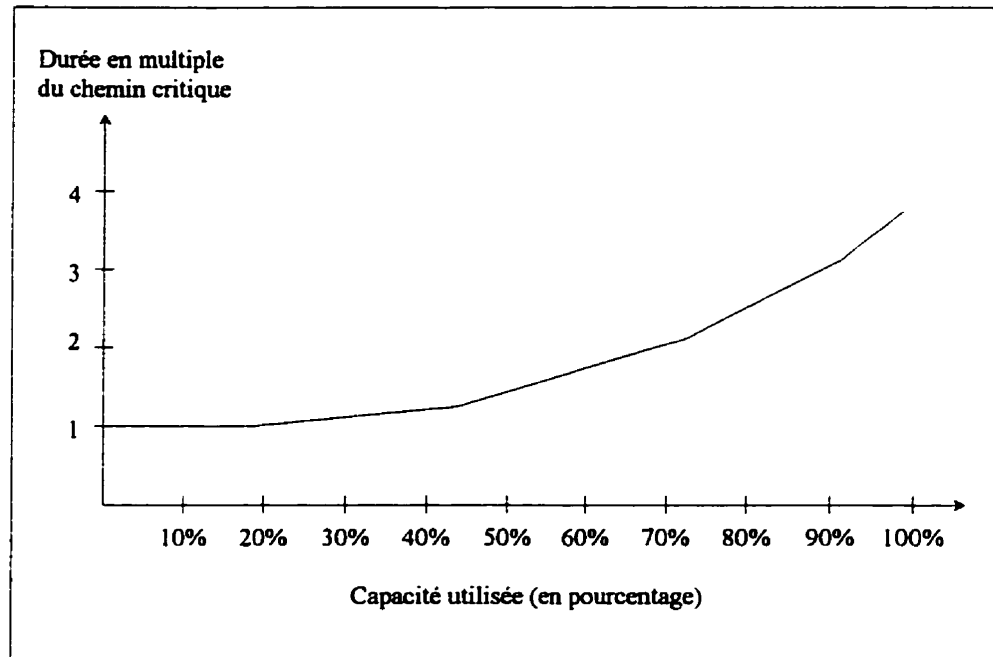


Figure 7.3 Relation entre la capacité utilisée et la durée moyenne des projets

de productivité en ne fournissant pas une charge de travail assez importante pour occuper tous les techniciens. En conséquence, l'ensemble des projets ne pourra être complété à l'intérieur des délais prescrits. La capacité recherchée est plutôt le nombre minimal de projets concomitants qui permet d'effectuer tous les travaux prévus à l'intérieur de la période d'étude, c'est-à-dire que tous les projets sont complétés dans le délai prescrit par le client. Cette capacité permet ainsi de maximiser le nombre de techniciens moyen par équipement tout en atteignant un pourcentage d'utilisation élevé.

La méthodologie de planification proposée comprend deux étapes distinctes. Elle consiste d'abord à calculer le nombre minimal de techniciens requis pour compléter l'ensemble des projets. Cette étape assure un coût minimal pour l'entreprise de réfection. Puis dans un deuxième temps, les périodes associées à chaque projet sont calculées en utilisant successivement différents niveaux de capacité (le nombre de projets concomitants). Des expériences sont ainsi conduites en variant le nombre de projets concomitants et en gardant le niveau de main-d'oeuvre constant. L'objectif est ici d'évaluer la relation entre le nombre moyen de techniciens par projet et la durée moyenne des projets. Les deux étapes de la méthodologie proposée sont maintenant décrites plus en détail.

7.3.4 Calcul du nombre d'employés requis

La quantité de main-d'oeuvre est définie à partir de la charge globale de travail prévue pour la période de production étudiée. Le calcul du nombre d'employés de chaque classe se fait à partir des données historiques plutôt qu'à partir des contraintes de ressources de chaque projet. Les données historiques comprennent implicitement les travaux reliés aux défaillances non planifiées des projets antérieurs tandis que les informations contenues dans le réseau des activités des projets ne comprennent que les activités planifiées a priori. Il est donc nécessaire d'avoir recours aux historiques pour obtenir une estimation non biaisée des heures de production pour les projets futurs.

Posons N comme le nombre de projets visés par la période étudiée. L'indice i désigne chacun des projets. De façon similaire, l'indice j désigne les classes d'employés. La charge de travail prévue pour une classe d'employés à chaque projet, T_{ij} , permet de calculer la charge totale de travail pour chaque classe d'employés, W_j . Ainsi,

$$W_j = \sum_{i=1}^N T_{ij} \quad (7.1)$$

À partir de cette information, le nombre d'employés minimal de chaque classe est obtenu en divisant la charge totale par le nombre d'heures de production compris dans la période étudiée. Comme il est impossible en pratique d'utiliser la main-d'oeuvre à 100 %, le nombre d'heures de production planifiées pour une classe d'employés, H_j , est ajusté en fonction du taux de productivité visé, p . Le nombre minimal d'employés de chaque classe, E_j , est alors donné par:

$$E_j = \frac{W_j}{H_j \times p} \quad (7.2)$$

7.3.5 Évaluation de la capacité optimale

La méthodologie proposée nécessite la détermination de la relation entre la capacité de

l'unité de production utilisée et la durée moyenne des projets. Il est donc nécessaire de calculer les échéanciers de l'ensemble des projets en utilisant différents niveaux de capacité.

Les expériences présentées se sont concentrées sur une période de production de douze mois où une quinzaine de projets était prévue à l'usine de réparation de Canadair à Mirabel (Qc). Les données historiques provenant de périodes de production antérieures à celle étudiée ont permis dans un premier temps de valider le modèle d'ordonnancement multi-projet présenté à la section 7.2. Ces premiers résultats ont d'ailleurs démontré que le modèle de simulation utilisé est nettement supérieur à la méthode de planification de projets utilisée par l'entreprise (Gharbi et al. 1997).

Le calcul du nombre minimal d'employés s'est fait en utilisant un pourcentage d'utilisation qui correspond aux objectifs de l'entreprise. Les niveaux de main-d'oeuvre pour les techniciens d'avionique, de remise à neuf, de peinture et de pré-envol ont été fixés à partir des résultats obtenus avec l'équation (7.2) en arrondissant vers les nombres entiers supérieurs.

Dans un deuxième temps, la période de production projetée fut simulée en variant successivement le nombre de projets concomitants tout en maintenant les niveaux de main-d'oeuvre constants. La figure 7.4 démontre l'influence du nombre de projets concomitants sur la durée moyenne des projets.

À mesure que le nombre de réfection entrepris simultanément est réduit, la durée moyenne des projets diminue. Il faut cependant remarquer que la réduction de la durée moyenne obtenue en réduisant la capacité utilisée diminue en même temps. Les résultats de simulation indiquent que l'ensemble des projets a été réalisé dans la période simulée seulement lorsque la capacité utilisée était supérieure à 7 appareils.

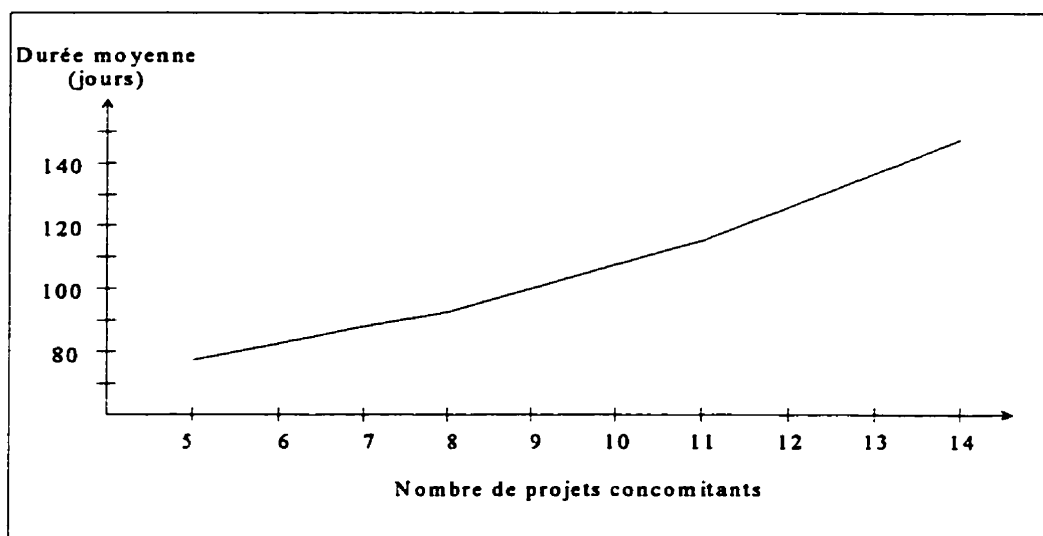


Figure 7.4 Durée moyenne en fonction du nombre de projets concomitants

Le graphique de la figure 7.5 démontre qu'à partir d'une capacité de 8 appareils, toute baisse du nombre de projets traités simultanément entraîne des pertes de productivité substantielles. Les contraintes de zones ainsi que les contraintes d'antériorité ont alors un impact marqué sur l'avancement des projets. Le nombre d'activités disponibles est donc insuffisant pour le nombre de ressources utilisé par projet. En conséquence,

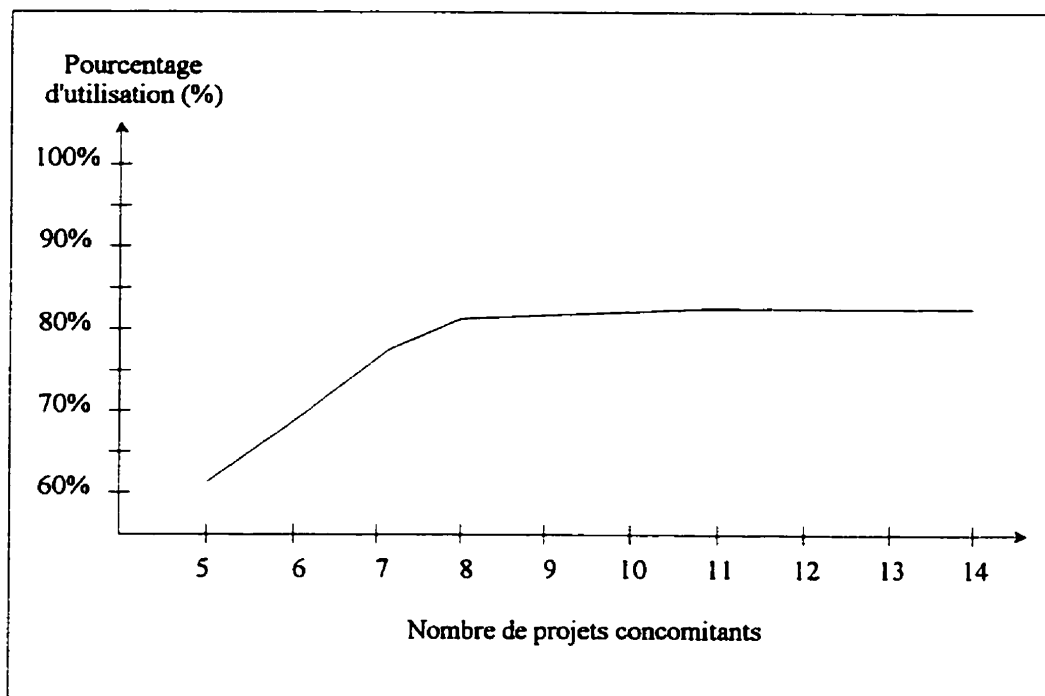


Figure 7.5 Utilisation des ressources en fonction du nombre de projets concomitants

l'ensemble des projets ne peut être complété dans les délais désirés. Pour ces expériences, on conclut qu'une capacité de 8 appareils permet de minimiser la durée moyenne des projets tout en assurant un taux donné de productivité. L'utilisation de cette capacité, plutôt que celle utilisée au moment de cette étude, a permis de réduire les délais de livraison de 25% sans aucun investissement. Pour le client, ces résultats ont non seulement permis de réduire les délais de livraison de chacun des équipements mais aussi de réduire de façon appréciable le nombre d'appareils non disponibles à tout moment.

7.4 Conclusion

Le nombre de projets traités simultanément dans une usine de réparation est important, car il détermine directement le nombre d'employés dédiés à chaque projet. Ainsi, à mesure que le nombre d'équipement remis à neuf simultanément diminue, le nombre d'employés par équipement augmente et la durée moyenne des projets diminue. Au niveau de la planification stratégique, une étude de capacité permet de déterminer le nombre minimal de projets traités simultanément sans entraîner des pertes de productivité. La méthodologie proposée nécessite l'utilisation du modèle de simulation afin de calculer les échéanciers pour l'ensemble des projets compris dans une période de production projetée. La généralisation du modèle d'ordonnancement fournit une approche propice à cette évaluation.

Pour les entreprises de réparation, l'approche proposée permet de réduire considérablement les délais de livraison. De telles réductions sont aujourd'hui essentielles pour maintenir ou augmenter leur part du marché. Ces bénéfices sont d'autant plus intéressants qu'il n'exige aucun investissement.

CHAPITRE VIII

RECOMMANDATIONS

8.1 Introduction

L'ordonnancement et la planification stratégique de projets en milieu de production présente, en plus de la complexité de l'algorithme de résolution, d'autres éléments forts importants. Ces éléments comprennent notamment l'utilisation rationnelle du module de planification à travers l'organisation et son intégration au sein d'un système d'information.

L'utilisation rationnelle du module de planification relève principalement de l'établissement de procédures efficaces. Bien que ces procédures doivent nécessairement être formulées en fonction de la structure organisationnelle de l'entreprise, la propagation de celles-ci repose en grande partie sur la création de fonctionnalités conviviales qui facilite l'utilisation du module de planification. Considérant l'importance de ces fonctionnalités et de leur intégration au sein du système d'information, il fut jugé adéquat d'en présenter brièvement les grandes lignes dans le cadre de ce chapitre.

Ce dernier chapitre donne aussi un aperçu personnel des tendances du marché de la réfection, de la portée de cette recherche et des développements imminents de la gestion de la production dans ce secteur.

8.2 Utilisation rationnelle du système de planification

Les objectifs de la planification consistent à déterminer les quantités de produits ou de commandes à réaliser à l'intérieur d'un horizon à moyen ou à court terme et à préciser les quantités de ressources à utiliser afin de satisfaire les objectifs opérationnels de l'entreprise. Pour ce faire, le système de planification s'appuie sur les fonctions de planification stratégique, commerciale, de gestion des besoins en matériel en plus de celle d'ordonnancement. L'intégration de ces fonctions à l'intérieur d'un système d'information cohérent est essentiel et permet d'éliminer la duplication d'information en plus d'assurer un accès à des données continuellement mises à jour par tous les membres concernés de l'organisation. Au delà de ces bénéfices tangibles, l'intégration du modèle de planification proposé au système de gestion de la production permet de synchroniser l'exécution physique des activités de production avec les objectifs de production et la demande du marché.

8.2.1 Intégration au système d'information de gestion de la production

La synchronisation manufacturière, en fonction principalement des contraintes de production et d'approvisionnement, cherche à réduire les besoins en capital, optimiser l'utilisation des ressources et conséquemment, accroître la rentabilité de l'entreprise. Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel de faciliter la prise de décisions quant à l'affectation

des ressources et l'acquisition du matériel au gré des contraintes changeantes du plancher de production et du marché. En pratique, l'amélioration du processus d'aide à la décision repose sur la création d'un système de gestion de la production complet qui relie la fonction d'ordonnancement aux modules de gestion des pièces, de gestion des données techniques, de suivi de la production et commercial comme illustré à la figure 8.1.

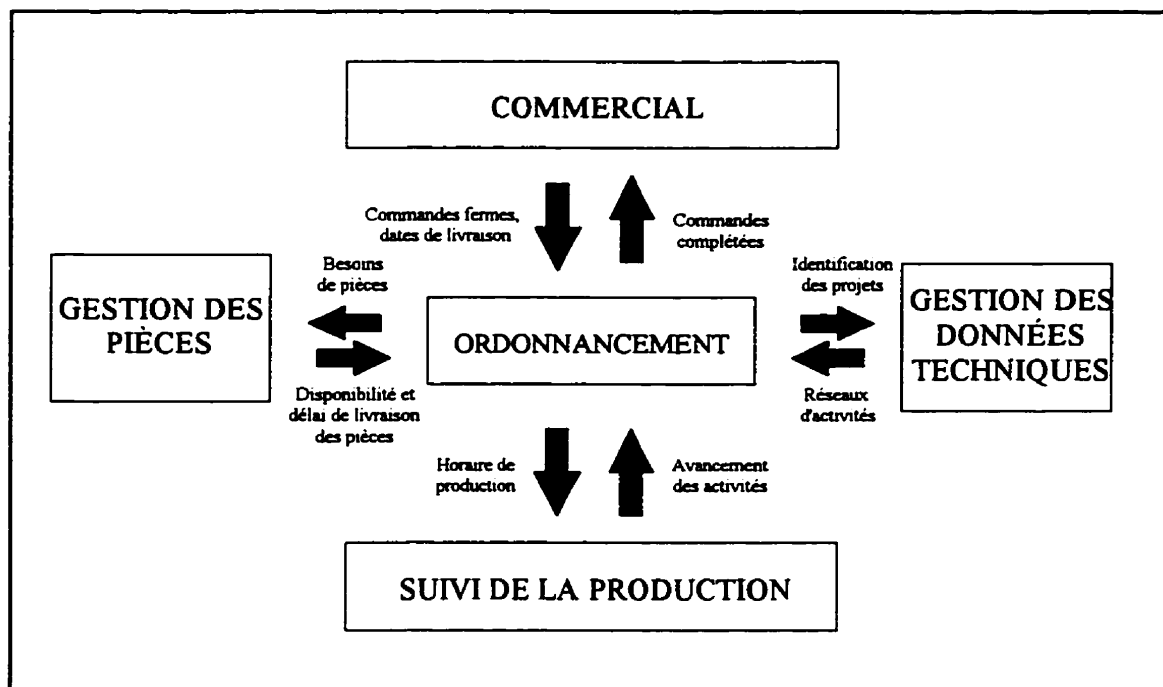


Figure 8.1 Intégration du système de gestion de la production

Le lien entre l'ordonnancement et la fonction commerciale permet de coordonner les demandes du client avec la réalisation physique des activités de remise à neuf. De même,

la coordination entre la commande des pièces et la production requiert un lien direct entre les modules de gestion des pièces et d'ordonnancement.

Le module de gestion des données techniques représente la source principale d'information pour la fonction d'ordonnancement. Il sert à décrire les activités du projet, les ressources de production requises, les processus de remise à neuf et l'ensemble des contraintes d'ordonnancement qui en découle. La base de données techniques permet ainsi, à l'utilisateur, de définir les données d'un projet et ses contraintes d'une manière complètement transparente par rapport à la construction, la simulation et la résolution du réseau d'activités.

Le module de lancement et de suivi de la production assurent la réalisation du projet selon les résultats de l'ordonnancement et de sa mise à jour en fonction de l'avancement réel des activités. Le module de suivi permet ainsi de déclarer les événements aléatoires à la fonction d'ordonnancement, ce qui est capital lorsque cette dernière repose sur un algorithme d'ordonnancement dynamique. Le suivi du projet en temps réel se réalise plus facilement par la mise en place d'un réseau local de type clients-serveur et par l'utilisation d'un système de lecteurs de codes à barres qui accélère la lecture et le transfert d'information à partir du plancher de production.

8.2.2 Fonctionnalités recherchées du module d'ordonnancement

Bien que profitable, l'intégration des fonctions de gestion de la production au module d'ordonnancement proposé n'assure pas l'utilisation du plein potentiel offert par ce dernier. La convivialité du logiciel demeure un facteur déterminant pour une utilisation efficace d'un logiciel d'ordonnancement. Il est même surprenant de constater que ce facteur est souvent plus important lors de la sélection d'un tel logiciel que la puissance et l'exactitude de l'algorithme. En considérant ce fait, il faut s'assurer de compléter l'algorithme avec des fonctionnalités qui en facilitent son utilisation.

Sans tenir compte des fonctionnalités de nature purement informatique (environnement de type Windows®, base de données commerciales ouvertes, ...), la première considération des utilisateurs touche souvent la représentation visuelle des données et des résultats d'ordonnancement. Les fonctions de représentation graphique jouent un rôle prédominant en rendant le système très facile à utiliser et accessibles aux utilisateurs les moins avertis. Elles permettent donc une meilleure maîtrise de la complexité du système de production. La visualisation graphique du plan de production sous la forme d'un graphique de Gant est sans aucun doute le moyen de transmission le plus simple et le plus efficace pour des résultats d'ordonnancement.

La deuxième préoccupation concerne les fonctionnalités de simulation. Comme l'optimisation de la planification passe ici par la conduite d'expériences, le logiciel doit

absolument fournir un module d'archivage qui permet aux utilisateurs de conserver et de comparer différentes alternatives simulées. Un générateur de rapports est aussi requis pour les mêmes raisons. L'utilisation commerciale du logiciel développé dans cette recherche est impensable sans l'ajout de ces fonctionnalités.

8.3 Tendances du marché de la réparation et de la recherche

Jusqu'à ce jour, les recherches dans le milieu de la remise à neuf se sont principalement concentrées sur l'amélioration des procédés de réparation et de monitoring de la condition des composants. À l'exception des recherches de Gharbi et al. (1995), Moen (1985), Ouellet (1988) et Smith (1989), il n'existe que peu d'exemples d'applications réelles de méthode de gestion de la production dans ce milieu. La gestion de réparation et l'ordonnancement dans un environnement d'ateliers demeure un sujet quasi inexploré. Avec la croissance continue de ce secteur de marché, il faut s'attendre à des efforts de recherche plus grands dans ce domaine à court et moyen terme.

À l'heure actuelle, la coordination entre les services d'approvisionnement et de production constitue aussi une préoccupation majeure des entreprises de réparation. Sans diminuer l'importance des autres modules de gestion de la production, l'impact d'une intégration des fonctions d'ordonnancement et de gestion des pièces représente, pour l'entreprise, le potentiel de gain maximum en terme de rentabilité. La tendance du Juste à Temps et la

création de nouvelles ententes entre clients et fournisseurs cherchent à réduire le niveau des inventaires en liant directement la commande de pièce avec le plan de production du client. Dans un contexte de remise à neuf, ce lien direct est difficile à réaliser en raison du caractère incertain des travaux de réparation. Le besoin en pièces n'est souvent identifié qu'au moment de la réparation même. Cette complexité représente sans contredit le plus grand défi des gestionnaires de production dans l'industrie de la réparation.

8.4 Conclusion

Bien que la qualité des résultats obtenus par l'utilisation du modèle de planification présentés apparaisse très prometteuse, seule la mise en pratique de ces derniers par des entreprises de réparation permettra d'en évaluer la véritable portée. Leur implantation fera nécessairement apparaître le besoin de faciliter l'utilisation du modèle d'ordonnancement en plus de celui de l'intégrer au sein d'un système d'information existant. Malgré la puissance de l'algorithme utilisé, la validité d'un module d'ordonnancement ne peut être assurée sans une synchronisation entre les fonctions de planification des activités et de l'acquisition du matériel. Cette problématique dans un environnement de réparation représente sans aucun doute une sphère de recherche remplie de défis.

CONCLUSION

La simulation d'un projet de réfection, plutôt que son évaluation analytique, permet de construire une distribution statistique valable pour la durée et le coût d'un projet. La simulation est aussi un moyen propice d'expérimenter et de déterminer une stratégie de gestion pour l'affectation des ressources en temps réel. Le modèle d'ordonnancement proposé utilise cette approche, ce qui permet de modéliser et d'imiter de façon précise le déroulement stochastique d'un projet de réfection. Ce modèle se distingue des modèles traditionnels de simulation en utilisant un réseau d'activités différent à chaque réplication, construit à partir d'un réseau de base formé des activités connues a priori. La simulation d'un réseau d'activités non fixe comprenant un algorithme d'ordonnancement dynamique des tâches représente une approche nouvelle de planification.

Le caractère dynamique de l'algorithme d'ordonnancement proposé contribue notamment à améliorer la prise de décision d'ordonnancement en cours de projet sans limiter le choix des règles d'affectation. Le mécanisme d'actualisation des priorités relatives des activités utilisé s'avère nettement plus rapide que les mécanismes connus en ne considérant que les activités admissibles à l'ordonnancement. Les tests effectués à partir d'un ensemble de 300 projets générés de façon aléatoire et représentatifs de l'industrie de la réfection ont clairement démontré la supériorité des règles dynamiques dans un environnement stochastique.

La reconnaissance des activités dominantes, par l'intermédiaire de la règle d'affectation *MAXCON*, apparaît aussi comme une approche nouvelle et supérieure aux règles d'ordonnancement connues pour minimiser la durée espérée d'un projet de réfection. Cette règle dynamique performe mieux que les règles reposant uniquement sur les informations du calcul du chemin critique. En plus de la validité de cette règle d'ordonnancement, les expériences ont démontré les avantages qu'apporte l'utilisation du modèle de planification proposé. La structure générique du modèle permet d'en généraliser l'utilisation pour la planification stratégique d'un ensemble de projets ce qui permet non seulement de réduire la durée moyenne des projets mais aussi de valider un plan directeur de production d'un environnement multi-projet.

Bien que spécifiquement conçu pour une entreprise de réfection, l'algorithme d'ordonnancement dynamique est aussi applicable à d'autres environnements incertains de production. Son utilisation éventuelle nécessite cependant de poursuivre le développement du modèle afin de répondre à l'ensemble des besoins énoncés lors d'un processus complet de planification. La considération des besoins en matériel lors de l'établissement d'un échéancier est particulièrement importante. Cette fonctionnalité supplémentaire nécessite de relier la consommation des pièces à la définition des activités en plus d'ajouter des contraintes de disponibilité du matériel au processus de résolution. La mise en application du modèle nécessitera aussi l'ajout de fonctionnalités graphiques permettant d'en simplifier l'utilisation. Ces limitations du modèle actuel constituent des possibilités de recherche intéressantes.

La recherche suivante ouvre aussi la porte à des développements similaires dans un environnement de gestion de la production où la quantité de commandes est beaucoup plus grande qu'en gestion de projets. Dans ce contexte, les contraintes de zones sont moins importantes mais la variabilité des durées des opérations demeure.

RÉFÉRENCES

ADLAKHA, V.G. (1987). A Monte Carlo technique with quasirandom points for the stochastic shortest path problem. American Journal of Mathematical and Management Sciences, 7, no. 4, 325-358.

ADLAKHA, V.G. et KULKARNI, V.G. (1989). A Classified Bibliography of Research on Stochastic PERT Networks: 1966-1987. INFOR, 27, no. 3, 272-296.

AFITEP (1991). Le management de projet. AFNOR Gestion, Paris, 126.

ALVADEZ-VALDES, A. et TAMARIT, J.M. (1989). Heuristic algorithms for resource constrained project scheduling: a review and an empirical analysis. Advances in Project Scheduling, Elsevier, Amsterdam, 113-134.

ANKLESIA, K.P. et DVEZNER, Z. (1986). A multivariate approach to estimating the completion time for PERT networks. Journal of the Operational Research Society, 37, no. 8, 811-815.

BADIRU, A.B. (1988). Towards the Standardization of Performance Measures for Project Scheduling Heuristics. IEEE Transactions on Engineering Management, 35, no. 2, 82-89.

BADIRU, A.B. (1991a). A simulation approach to PERT network analysis. Simulation, 57, no. 4, 245-255.

BADIRU, A.B. (1991b). STARC 2.0: An Improved PERT Network Simulation Tool. Computers Industrial Engineering, 20, no. 3, 389-400.

BEAULIEU, A., GHARBI, A., GIRARD, J. et PELLERIN, R. (1994). Simulation des activités du hangar - Description du modèle de simulation. Rapport de projet Canadair/École de technologie supérieure - 4 avril.

BLANKS, H.S. (1992). Reliability in Procurement and Use. Wiley & Sons, Toronto.

BOCTOR, F.F. (1990). Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling. European Journal of Operational Research, 49, 3-13.

BREIPOHL, A., LEE, F.N., HUANG, J. et FENG, Q. (1990). Sample size reduction in stochastic production simulation. IEEE Transactions on Power Systems, 5, no. 3, 984-992.

BURT, J.M., GAVER, D.P. et PERLAS, M. (1970). Simple Stochastic Networks: Some Problems and Procedures. Naval Research Logistic Quaterly, 17, no.4, 439-459.

BURT, J.M. et GARMAN, M.B. (1971). Conditional Monte Carlo: A Simulation Technique for Stochastic Network Analysis. Management Science, 18, no. 3.

CAMPBELL, D.W. (1972). Schedule Risk Analysis. Proceedings of the 4th Annual Seminar Symposium, Project Management Institute, Drexel Hill, Pa., October.

CARRÉ, D. (1964). Ordonnancement des travaux d'entretien dans une raffinerie. Les problèmes d'ordonnancement, DUNOD, Paris, 67-84.

CASILIO, A. (1990). Turbomachinery Overhauls: Planning. Turbomachinery International, November/December, 26-32.

CHRISTOFIDES, N., ALVAREZ-VALDES, R. et TAMARIT, J.M. (1987). Project scheduling with ressource constraints: a branch and bound approach. European Journal of Operational Research, 29, 262-273.

CRANDALL, K.C. (1976). Probabilistic Time Scheduling. Journal of the Construction Division, 102, no. CO3, 415-423.

CRANDALL, K.C. (1977). Scheduling under Uncertainty. Proceeding of the 9th Annual Seminar Symposium, Project Management Institute, Drexel Hill, Pa., October, 336-343.

DAVIS, E.W. et PATTERSON, J.H. (1975). A comparison of heuristic and optimum solutions in resource-constrained project scheduling. Management Science, 21, 944-955.

DIAZ, C.F. et HADIPRIONO, F.C. (1993). Non-Deterministic Networking Methods. Journal of Construction Engineering and Management, 119, no. 1, 40-57.

DODIN, B. (1984). Determining the K most critical paths in PERT networks. Operations Research, 32, no. 4, 859-877.

DODIN, B. (1985a). Bounding the Project Completion Time Distribution PERT Networks. Operations Research, 33, no. 4, 862-881.

DODIN, B. (1985b). Approximating the distribution function in stochastic networks. Computers and Operations Research, 12, no. 3, 251-264.

DODIN, B. et ELMAGHRABY, S.E. (1985). Approximating the criticality indices of the activities in PERT networks. Management Science, 31, no. 2, 207-223.

DUMOND, J. et MABERT, V.A. (1988). Evaluating project scheduling and due date assignment procedures: an experimental analysis. Management Science, 34, 101-118.

DUMOND, J. (1992). In a multi-resource environment, how much is enough? International Journal of Production Research, 30, no. 2, 395-410.

EISNER, H. (1962). A Generalized Network Approach to the Planning and Scheduling of a Research Project. Operations Research, 10, no. 1, 115-125.

ELMAGHRABY, S. E. (1964). An Algebra for the Analysis of Generalized Activity Networks. Management Science, 10, no. 3, 494-514.

ELMAGHRABY, S. E. (1977). Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models, John Wiley, New York.

ELMAGHRABY, S.E. (1993). Ressource allocation via dynamic programming in activity networks. European Journal of Operational Research, 64, 199-215.

ELSAYED, E.A. (1982). Algorithms for project scheduling with resource constraints. International Journal of Production Research, 19.

FISHER, D.L., SAISI, D. et GOLDSTEIN, W.M. (1985). Stochastic PERT networks: OP diagrams critical paths and the project completion time. Computers and Operations Research, 12, no. 5, 471-482.

FREEMAN, R.J. (1960). A Generalized PERT. Operations Research, 8, no. 2, 281.

GALLAGHER, C. (1987). A Note On PERT Assumptions. Management Science, 33, 1360.

GHARBI, A., PELLERIN, R. et VILLENEUVE, L. (1995), Improving overhaul project planning through simulation. Proc. of the 1995 Summer Computer Simulation Conference, Ottawa (Ont.), Canada, 1995.

GHARBI, A., GIRARD, J., PELLERIN, R. et VILLENEUVE, L. (1997), Bombardier Turned to Simulation to Validate the CF-18 Maintenance Program. À paraître dans Interfaces.

GARMAN, M.B. (1972). More on Conditioned Sampling in the Simulation of Stochastic Networks. Management Science, 19, no. 1.

GIRARD, J., GHARBI, A., PELLERIN, R. et VILLENEUVE, L. (1995). La planification stratégique de projets de réfection. Actes La productivité dans un monde sans frontières, Congrès international de génie industriel, Montréal, Canada, 1279-1288.

GORGONE, R.G. (1992). Improving Overhaul Planning Through Risk Assessment and Risk Management. Journal of Ship Production, 8, no. 4, 235-243.

GOTHA (1993). Les problèmes d'ordonnancement. Recherche opérationnelle - Operations Research, 27, no. 1, 77-150.

GRANT III, F.H. (1983). Hybrid variance reduction techniques using antithetic sampling, control variates and stratified sampling. Computers and Industrial Engineering, 7, no. 2, 159-169.

HAMMERSLEY, J.M. et MORTON, K.W. (1956). A New Monte Carlo Methods: Antithetic Variates. Proc. Camb. Phil. Soc., 52, 449-475.

HARIGA, M. (1994). Coordinated Overhaul Scheduling of Production Units. Naval Research Logistics, 41, 565-577.

HASTING, N.A.J. (1970). Equipment replacement and the repair limit method. Operational research in Maintenance, Manchester University Press/Barnes and Noble.

HEANY, J., SORAS, C. et WILLIAM, R. (1988). Employment Prospects in Overhaul and Maintenance Bright. Aviation Week & Space Technology, 129, 67.

HEBERT, J.E. III (1975). Critical Path Analysis and a Simulation Program for Resource-Constrained Activity Scheduling in GERT Project Networks. Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN.

HOLLOWAY, C.A, NELSON, R.T. et SURAPHONGSCHAI, V. (1979). Comparison of a multi-pass heuristic decomposition procedure with other resource-constrained project scheduling procedure. Management Science, 25, 862-872.

JABOT, R. (1969). Entretien et travaux neufs, Éditions Homme et Techniques, Paris.

JARDINE, A.K.S. (1973). Maintenance, Replacement, and Reliability. Pitman Publishing, University of Birmingham.

KAMBUROWSKI, J. (1985). Bounds in temporal analysis of stochastic networks. Foundations of Control Engineering, 10, 177-189.

KHATTAB, M. et CHOUBINEH, F. (1994). A new approach for project scheduling with a single resource. International Journal of Production Research, 29, 185-198.

KIEFER, F., MICHEZ, A., LE GUIRRIEC, C. et GAZZO, J.M. (1995). Les enjeux de la conception des systèmes intégrés de production. Congrès International de Génie Industriel de Montréal, 1527-1536.

KULKARNI, V.G. et ADLAKHA, V.G. (1986). Markov and Markov-Regenerative PERT Networks. Operations Research, 34, no. 5, 769-781.

KURTULUS, I., et DAVIS, E.W. (1982). Multi-project scheduling: Categorization of heuristic rules performance. Management Science, 28, February, 161-172.

LAW, A.M. et KELTON, W.D. (1991). Simulation Modeling and Analysis, Second Edition, McGraw-Hill, New York.

LEBEAU, L.-Y. (1992). Planification des projets. Ecole Polytechnique de Montréal.

LITTLEFIELD, T.K. JR et RANDOLPH, P.H. (1987). Another Note on PERT Times. Management Science, 33, 1357-1359.

LYONNET, P. (1988). Les politiques de maintenance. La maintenance: Mathématiques et Méthodes, Lavoisier, Paris, France, 101.

MACRIMMON, K.R. et RYAVEC, C.A. (1964). An analytical study of the PERT assumptions. Operations Research, 12, January-February, 16-37.

MANN, L. JR. (1976). Maintenance Management. Lexington Books, Toronto, 41-44.

MARLEAU, J.R. (1989). Politique de réfection - Familles M113 et Lynx. Rapport 202 DA 12350-4, 12 septembre.

MARSON, C. et POULIN, M. (1993). Description du système de production. Rapport Canadair/ÉTS, 27 avril.

MODER, J.J., PHILLIPS, C.R. et DAVIS, E.W. (1983). Project Management with CPM and PERT and Precedence Diagramming, Third Edition, Van Nostrand Reinhold, New York.

MOEN, D. (1985). Application of Zone Logic and Outfit Planning Concepts to Overhaul, Modernization, and Repair of U.S. Navy Ships. Journal of Ship Production, November, 238-248.

MONCHY, F. (1987). La fonction maintenance - Formation à la gestion de la maintenance industrielle, Masson, Paris.

Non-signé (1990). Northwest Airlines Overhaul Facility Gives Jet Engines Million-Dollar Treatment. Plating and Surface Finishing, June.

Non-signé (1987). Maintenance and overhaul - Technology, management improvements cut costs, increase reliability. Special Advertising Section, Aviation Week and Space Technology, Jan 12.

OUELLET, J.C. (1988). Évaluation et analyse par la simulation du projet de réfection Léopard A2 du ministère de la Défense nationale. Rapport de projet (M.Ing.), École Polytechnique de Montréal.

OZDAMAR, L. et ULUSOY, G. (1994). A local constraint based analysis approach to project scheduling under general resource constraints. European Journal of Operational Research, 79, 287-298.

PADILLA, E.M. et CARR, R.I. (1991). Resource Strategies for Dynamic Project Management. Journal of Construction Engineering and Management, 117, no. 2, 279-293.

PATTERSON, J.H. (1976). Project scheduling: The effect of problem structure on heuristic performance. Naval Research Logistics Quarterly, 23, no. 1, 95-123.

PATTERSON, J.H. (1984). A Comparaison of Exact Approaches for Solving the Multiple Constrained Resource, Project Scheduling Problem. Management Science, 30, 854-867.

PELLERIN, R., GIRARD, J. et GHARBI, A. (1994). Analyse du système de planification de Canadair. Rapport Canadair/Ecole de technologie supérieure, 25 janvier.

PERT: Program Evaluation Research Task (1958). Phase I Summary Report. Special Projects Office, Bureau of Ordnance, Department of the Navy, Washington, D.C., July.

PLOURDE, D. et BISSONNETTE, C. (1987). Workshop Layout Review, Building 10 and 11. 202 Workshop Depot, 1951-205-87/898-01, August.

PRICE, S. (1989). A professional approach to overhaul management. Foundry Trade Journal, April 21.

PRITSKER, A.A.B. et HAPP, W.W. (1966). GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Part I. Fundamentals. Journal of Industrial Engineering, 17, no. 5, 267-74.

PRITSKER, A.A.B. et WHITEHOUSE, G.E. (1966). GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Part II. Applications. Journal of Industrial Engineering, 17, no. 5, 293-301.

PRITSKER, A.A.B. et BURGESS, R.R. (1970). The GERTS Simulation Programs: GERTS III, GERTS IIIQ, GERTS IIIC and GERTS IIIR. NASA/ERC Contract NAS-12-2113, Virginia Polytechnic Institute, June.

PRITSKER, A. A. B. (1977). Modeling and Analysis Using Q-GERT Network. Halsted Press Books (John Wiley & Sons), New York, N.Y.

RAGSDALE, C. (1989). The Current State of Network Simulation in Project Management Theory and Practice. OMEGA, 17, no. 1, 21-25.

RUSSEL, R.A. (1986). A comparison of heuristics for scheduling projects with cash flows and resource restrictions. Management Science, 32, October, 1291-1300.

RIPLEY, B.D. (1987). Stochastic Simulation. Wiley, New York.

SALIBY, E. (1980) A Reappraisal of Some Simulation Fundamentals, Ph.D. Thesis, University of Lancaster.

SASIENI, M.W. (1986). A Note on PERT Times. Management Science, 32, 1652-1653.

SIGAL, C.E., PRITSKER, A.A.B. et SOLBERG, J.J. (1979). The Use of Cutsets in Monte Carlo Analysis of Stochastic Networks. Mathematics and Computers in Simulation, XXI, 376-384.

SMITH, B.D.JR. (1989). Risk Management in Repair Work Decision Making. Naval Engineers Journal, May, 220-230.

SOROUSH (1994). The most Critical Path in a Pert Network. Journal of the Operational Research Society, 45. no. 3.

SPERANZA, M.G. et VERCELLIS, C. (1993). Hierarchical models for multi-project planning and scheduling. European Journal of Operational Research, 64, 312-325.

STERNS, A. (1989). Shop and Zone Administration and Management: The Transition to Zone Outfitting in Repair and Overhaul at Puget Sound Naval Shipyard. Journal of Ship Production, 5, no. 1, February, 22-35.

SULE, D.R. et HARMON, B. (1979). Determination of Coordinated Maintenance Scheduling Frequencies for a Group of Machines. AIIE Transactions, 11, no. 1, 48-53.

SULLIVAN, R.S., HAYYA, J.C. et SCHAU, R. (1982). Efficiency of the Antithetic Variate Method for Simulating Stochastic Networks. Management Science, 28, no. 5, 563-572.

TURGEON, J.L.Y. (1992). Model for productivity improvement of manufacturing systems through robust design. Royal Military College, Kingston (Ont.), Canada.

ULUSOY, G. et OZDAMAR, L. (1989). Heuristic performance and network/resource characteristics in resource-constrained project scheduling. Journal of the Operational Research Society, 40, no. 12, pp.1145-1152.

ULUSOY, G. et OZDAMAR, L. (1994). A constraint-based perspective in resource constrained project scheduling. Journal of Production Research, 32, no. 3, 693-705.

VAN SLYKE, R.M. (1963). Monte Carlo Methods and the PERT Problem. Operations Research, 11, 839-860.

VILLENEUVE, L., GHARBI, A. et PELLERIN, R. (1995). La planification de projets de réfection avec contraintes de zones. 5e Congrès International de Génie Industriel, Grenoble, France.

VOLLMAN, T.E., BERRY, W.L. et WHYBARK, D.C. (1988). Manufacturing Planning and Control Systems. Second edition, IRWIN, Homewood (Illinois).

WEISS, G. (1986). Stochastic bounds on distributions of optimal value functions with applications to PERT, networks flows and reliability. Operations Research, 34, no. 4, 595-605.

WEIST, J.D. et LEVY, F.K. (1977). A Management Guide to PERT/CPM. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

WHITEHOUSE, G.E. (1983). A comparaison of computer search heuristic to analyze activity/networks with limited resources. Project Management Quaterly, 14, 35-39.

WOOLERY, J.C. et CRANDALL, K.C. (1983). Stochastic Network Model for Planning Scheduling. Journal of Construction Engineering and Management, 109, no.3, 342-354.

ANNEXE I: PROGRAMME OVERPLAN

Cette annexe contient le code du programme OVERPLAN. Ce dernier peut être lancé à partir d'un menu créé dans le système de gestion de base de données FoxPro® Version

2.6. L'écran du menu principal se divise en trois sous-menus :

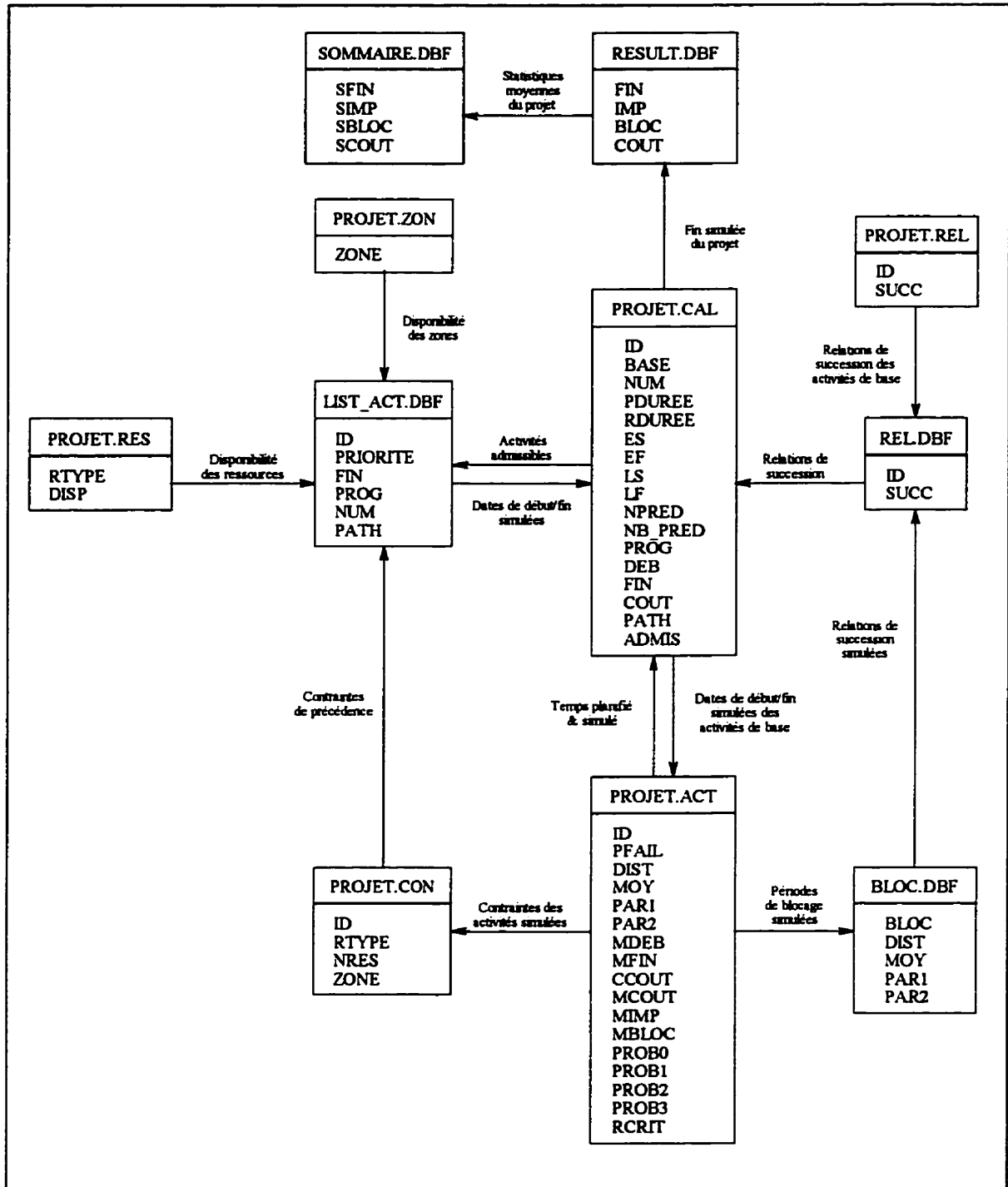
- a. **Projet;**
- b. **Simulation; et**
- c. **Résultats.**

Le premier sous-menu permet de visualiser ou d'entrer des données d'un projet. L'utilisateur a ainsi accès aux fichiers décrivant les activités de base, les contraintes de celles-ci, les relations de précedence, les ressources et les zones de travail.

Le deuxième sous-menu permet de lancer un ensemble de répliquations de simulation. L'utilisateur n'a qu'à fixer les paramètres (nombre de répliquations, germe pour la génération de nombres aléatoires et la règle d'affectation souhaitée).

Finalement, le dernier sous-menu permet de visualiser les résultats de simulation.

La figure suivante, illustrant le transfert de données entre les fichiers, permet de mieux comprendre le code de programmation.



Structure du programme OVERPLAN

```

*****
*      PROGRAMME : SIMUL.PRG
*
*      DESCRIPTION : Programme de simulation
*
*****

*** Déclaration des variables
PUBLIC j, m_tnow, m_projet, m_priority, m_regle, m_replic, vecteur_pbloc, mseed
PUBLIC m_pbloc, m_tcout, m_tfai, m_tbloc, m_timestart, m_timestop, m_cputime
PUBLIC m_totalr, m_totalz, m_charge, m_final, moy_bloc, m_correlat, m_germe

*** Effacer l'écran
CLOSE ALL
CLEAR
SET CONSOLE OFF
SET STATUS BAR OFF
SET DEFAULT TO c:\fpw26\overplan

*** Déclaration des fichiers nécessaires à la simulation
SELECT 1
USE LIST_ACT.DBF
SELECT 2
USE UPPER(TRIM(m_projet)+".CAL")
SELECT 3
USE UPPER(TRIM(m_projet)+".CON")
SELECT 4
USE UPPER(TRIM(m_projet)+".REL")
*** Fichier de disponibilité des ressources
SELECT 5
USE UPPER(TRIM(m_projet)+".RES")
*** Fichier de disponibilité des zones
SELECT 6
USE UPPER(TRIM(m_projet)+".ZON")
SELECT 7
USE UPPER(TRIM(m_projet)+".ACT")
SELECT 8
USE BAK.REL
SET SAFETY OFF
ZAP
SELECT 9
USE RESULT.DBF
ZAP
SELECT 10
USE SOMMAIRE.DBF
ZAP
SET SAFETY ON
SELECT 11
USE BLOC.DBF

```

```

*** Démarrer l'horloge
m_timestart = SECONDS( )

*** Préparation les fichiers requis pour la simulation
DO DEBUT

*** Calcul initial du CPM
DO CPM

*** PROGRAMME PRINCIPAL

FOR j = 1 TO m_replic
    m_tnow = 0.0

    *** Préparer les fichiers de simulation
    DO PREPARE

    *** Générer les durées des activités et les imprévus
    IF m_determ = .F.
        DO ALEAT
    ENDIF

    *** Calcul de l'échéancier
    DO AFFECT

    *** Enregistrer les résultats de simulation
    IF m_determ = .F.
        DO RESULT
    ENDIF

ENDFOR

*** Arrêter l'horloge
m_timestop = SECONDS( )
m_cputime = m_timestop - m_timestart

IF m_determ = .F.
    *** Calcul des résultats moyen
    DO SOMMAIRE

    *** Nettoyage des fichiers après simulation
    DO NETTOYAGE
ENDIF
CLOSE ALL

*****
* PROCEDURE : DEBUT
*
* BUT: Préparer les fichiers nécessaires à la simulation
*****
PROCEDURE DEBUT

```

```

m_tnow = 0.0
*** Préparer le fichier des activités (m_projet.ACT)
SELECT 7
GO TOP
SCAN
    REPLACE MDEB WITH 0.0
    REPLACE MFIN WITH 0.0
    REPLACE MCOUT WITH 0.0
    REPLACE MIMP WITH 0.0
    REPLACE MBLOC WITH 0.0
ENDSCAN

*** Préparation du fichier de calcul (m_projet.CAL)
SELECT 2
DELETE ALL
PACK
SELECT 7
GO TOP
SCAN
    m_actbase = ID
    mpduree = 0.0
    mpduree = mpduree + (PFAIL * MOY)
    SELECT 2
    APPEND BLANK
    REPLACE ID WITH m_actbase
    REPLACE BASE WITH .T.          && Pointeur pour les activités de base
    REPLACE PDUREE WITH mpduree
    IF m_determ = .T.
        REPLACE RDUREE WITH mpduree
    ENDIF
    REPLACE ADMIS WITH .F.
    SELECT 7
ENDSCAN

*** Préparation du fichier de relation (BAK.REL)
SELECT 4
SCAN
    SCATTER MEMVAR
    SELECT 8
    APPEND BLANK
    GATHER MEMVAR
    SELECT 4
ENDSCAN
RETURN

*****
*      PROCEDURE : CPM
*
*      DESCRIPTION : Algorithme du chemin critique
*****
PROCEDURE CPM

```

```

*** Calcul standard du CPM au début de la simulation
IF m_tnow = 0.0
    DO INITIALISE
    DO NUMEROTATION
    DO CALCUL
ELSE
    *** Mise à jour des données du CPM sans propagation sur les activités non démarrables
    DO CPMUPDATE
ENDIF

```

```

*****

```

```

*      PROCEDURE : INITIALISE

```

```

*

```

```

*      BUT : Initialiser le fichier de calcul

```

```

*****

```

```

PROCEDURE INITIALISE

```

```

SELECT 2

```

```

GO TOP

```

```

SCAN WHILE !EOF()

```

```

    REPLACE NUM WITH 0

```

```

    REPLACE PROG WITH .T.

```

```

ENDSCAN

```

```

RETURN

```

```

*****

```

```

*      PROCEDURE : NUMEROTATION

```

```

*

```

```

*      BUT : Numéroté les activités pour le calcul du CPM

```

```

*

```

```

*****

```

```

PROCEDURE NUMEROTATION

```

```

*** Calcul du nombre de prédécesseur(s)

```

```

SELECT 2

```

```

SET INDEX TO m_projet + ".CDX"

```

```

GO TOP

```

```

SCAN WHILE !EOF()

```

```

    m_id = ID

```

```

    IF BASE = .T.

```

```

        SELECT 4

```

```

        m_cpt = 0

```

```

        GO TOP

```

```

        SCAN FOR ALLTRIM(SUCC) == ALLTRIM(m_id)

```

```

            m_cpt = m_cpt + 1

```

```

        ENDSCAN

```

```

        SELECT 2

```

```

        REPLACE NPRED WITH m_cpt

```

```

        REPLACE NB_PRED WITH m_cpt

```

```

    ENDIF

```

```

ENDSCAN

```

```

*** Numérotation non cyclique

```

```

m_num = 1
SELECT 2
GO TOP
SCAN FOR ((NPRED=0) AND (NUM=0) AND (BASE=.T.))
    REPLACE NUM WITH m_num
    m_num = m_num + 1
    m_id = ID

*** Mise à jour du nombre de prédécesseurs
    SELECT 4
    GO TOP
    SCAN FOR ALLTRIM(ID) == ALLTRIM(m_id)
        m_succ = SUCC
        SELECT 2
        LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == ALLTRIM(m_succ)
        m_nb = NPRED
        REPLACE NPRED WITH (m_nb - 1)
        SELECT 4
    ENDSCAN
    SELECT 2
    GO TOP
ENDSCAN
RETURN

*****
*      PROCEDURE : CALCUL
*
*      BUT : Calcul des dates au plus tôt et au plus tard
*****
PROCEDURE CALCUL
**** Passe avant
SELECT 2
m_final = m_tnow
SET ORDER TO NUM
GO TOP
SCAN FOR (PROG=.T.)
    m_id = ID
    m_base = BASE
    m_es = m_tnow
    SELECT 4
    SCAN FOR ALLTRIM(SUCC) == ALLTRIM(m_id)
        m_pred = ID
        SELECT 2
        LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == ALLTRIM(m_pred)
        IF PROG = .T.
            IF m_base = .T.
                m_es_ind = ES + PDUREE
            ELSE
                m_es_ind = ES
        ENDIF
    ELSE

```

```

        m_es_ind = FIN
    ENDIF
    m_es = MAX(m_es,m_es_ind)
    SELECT 4
    ENDSCAN
    SELECT 2
    LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == ALLTRIM(m_id)
    REPLACE ES WITH m_es
    REPLACE EF WITH (ES + PDUREE)
    m_final = MAX(m_final,EF)
ENDSCAN
**** Passe arrière
SET ORDER TO DNUM
GO TOP
SCAN WHILE !EOF()
    m_lf = m_final
    m_id = ID
    SELECT 4
    SCAN FOR ALLTRIM(ID) == ALLTRIM(m_id)
        m_succ = SUCC
        SELECT 2
        LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == ALLTRIM(m_succ)
    IF BASE = .T.
        m_lf_ind = LF - PDUREE
        m_lf = MIN(m_lf,m_lf_ind)
    ELSE
        m_lf = LF
    ENDIF
    SELECT 4
ENDSCAN
SELECT 2
LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == ALLTRIM(m_id)
REPLACE LF WITH m_lf
REPLACE LS WITH (LF - PDUREE)
ENDSCAN

*** Enregistrer la longueur du chemin max pour toutes les activités
SELECT 2
GO TOP
SCAN WHILE !EOF()
    REPLACE PATH WITH m_final - LS
ENDSCAN

*** Copier le nombre de prédécesseurs
SELECT 2
GO TOP
SCAN
    m_nopred = NB_PRED
    REPLACE NPRED WITH m_nopred
ENDSCAN
RETURN

```

```
*****
*      PROCEDURE : CPMUPDATE
*
*      BUT : Mise à jour des données du CPM sans propagation
*****
```

```
PROCEDURE CPMUPDATE
```

```
*** Détermination du chemin critique avec biais
```

```
SELECT 1
```

```
CALCULATE MAX(PATH) FOR PROG = .T. TO m_actduree
```

```
*** Mise à jour des données du CPM
```

```
GO TOP
```

```
SCAN WHILE !EOF()
```

```
    m_id = ID
```

```
    IF PROG = .T.
```

```
        SELECT 2
```

```
        LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == ALLTRIM(m_id)
```

```
        REPLACE ES WITH m_tnow
```

```
        REPLACE EF WITH (m_tnow + PDUREE)
```

```
        REPLACE LS WITH (m_tnow + m_actduree - PATH)
```

```
        REPLACE LF WITH (LS + PDUREE)
```

```
    ENDIF
```

```
    SELECT 1
```

```
ENDSCAN
```

```
RETURN
```

```
*****
*      PROCEDURE : PREPARE
*
*      BUT: Préparer et nettoyer les fichiers du projet entre répliques de simulation
*****
```

```
PROCEDURE PREPARE
```

```
*** Préparation du fichier de relation (BAK.REL)
```

```
IF j > 1
```

```
    SELECT 8
```

```
    SET SAFETY OFF
```

```
    ZAP
```

```
    SET SAFETY ON
```

```
    SELECT 4
```

```
    SCAN
```

```
        SCATTER MEMVAR
```

```
        SELECT 8
```

```
        APPEND BLANK
```

```
        GATHER MEMVAR
```

```
        SELECT 4
```

```
    ENDSCAN
```

```
ENDIF
```

```
*** Nettoyage du fichier des contraintes et de calcul (m_projet.CON et m_projet.CAL)
```

```
SELECT 2
```

```

GO TOP
SCAN FOR BASE = .F.
    m_actnb = ALLTRIM(ID)
    DELETE
    PACK
    SELECT 3
    SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_actnb
        DELETE
    ENDSCAN
    PACK
    SELECT 2
ENDSCAN
SCAN
    m_nompred = NPRED
    REPLACE NB_PRED WITH m_nompred
    REPLACE ADMIS WITH .F.
ENDSCAN
RETURN

```

```

*****

```

```

* PROCEDURE : ALEAT

```

```

*

```

```

* BUT: Générer les imprévus et la durée des activités

```

```

*

```

```

* FICHIER DE SORTIE: m_projet.CAL

```

```

*****

```

```

PROCEDURE ALEAT

```

```

*** Générer la durée et le coût de toutes les activités

```

```

m_tcout = 0.0

```

```

SELECT 7

```

```

GO TOP

```

```

SCAN

```

```

    m_acti = ALLTRIM(ID)

```

```

    mduree = 0.0

```

```

    mccount = 0.0

```

```

    IF RNUM() < PFAIL

```

```

        mccount = mccount + CCOUT

```

```

        IF ALLTRIM(DIST) == ""

```

```

            mduree = mduree + MOY

```

```

        ELSE

```

```

            mduree = mduree + GENR()

```

```

        ENDIF

```

```

    ENDIF

```

```

    SELECT 2

```

```

    LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_acti

```

```

    REPLACE RDUREE WITH mduree

```

```

    REPLACE COUT WITH mccount

```

```

    SELECT 7

```

```

    m_tcout = m_tcout + mccount

```

```

ENDSCAN

```

*** Préparer les fichiers d'activités

m_tfai = 0.0

m_tbloc = 0.0

moy_bloc = 0.000

SELECT 7

GO TOP

SCAN

 m_act = ALLTRIM(ID)

 nb_fail = 0

 nb_bloc = 0

 *** Calculer l'espérance mathématique du no. de blocage

 IF PROB0 != 1

 mactbloc = (PROB1-PROB0)+2*(PROB2-PROB1)+3*(1-PROB2)

 moy_bloc = moy_bloc + mactbloc

 ENDIF

 *** Détermination du nb d'imprevu(s)

 m_rand = RNUM()

 DO CASE

 CASE m_rand <= PROB0

 nb_fail = 0

 CASE m_rand <= PROB1

 nb_fail = 1

 CASE m_rand <= PROB2

 nb_fail = 2

 OTHERWISE

 nb_fail = 3

 ENDCASE

 REPLACE MIMP WITH (MIMP + nb_fail)

 *** Calcul et insertion des périodes de blocage

 IF nb_fail > 0

 nb_bloc = BLOCAGE(nb_fail, m_pbloc)

 && Détermination du # de

blocage(s)

 REPLACE MBLOC WITH (MBLOC + m_pbloc)

 IF nb_bloc > 0

 DO DUPLICATE WITH nb_bloc, m_act

 ENDIF

 ENDIF

 m_tfai = m_tfai + nb_fail

 m_tbloc = m_tbloc + nb_bloc

ENDSCAN

moy_bloc = moy_bloc*m_pbloc

RETURN

* FONCTION : BLOCAGE()

*

* PARAMETRE(S) D'ENTREE : nb_fail, m_pbloc

*

```

•      PARAMETRE(S) DE SORTIE : nb_bloc
*
*      BUT : Cette fonction retourne un nombre de blocage(s) nb_bloc
*****
FUNCTION BLOCAGE
PARAMETER nb_fail, m_pbloc
nb_bloc = 0
FOR cpt = 1 TO nb_fail
  pourcen = RNUM()
  IF pourcen <= m_pbloc
    nb_bloc = nb_bloc + 1
  ENDIF
ENDFOR
RETURN nb_bloc

*****
*      PROCEDURE : DUPLICATE
•
*      PARAMETRE(S) D'ENTREE : nb_bloc, m_act
*
*      FICHER D'ENTREE/SORTIE :  m_projet.REL          m_projet.CON
*                                m_projet.CAL
*
*      BUT :   Cette procédure subdivise une activité selon le nombre de blocage(s)
*              dans chacun des fichiers BAK.REL, m_projet.CON et m_projet.CAL
*****
PROCEDURE DUPLICATE
PARAMETER nb_bloc, m_act
DIMENSION vecteur_temp(nb_bloc), vecteur_pbloc(nb_bloc)

*** MODIFICATION DU FICHER DE CALCUL m_projet.CAL
*** Déterminer la durée des périodes de blocage
SELECT 11
GO TOP
m_dist = DIST
FOR i = 1 TO nb_bloc
  vecteur_pbloc(i) = GENR()
ENDFOR

*** Déterminer le moment d'apparition des périodes de blocage
SELECT 2
LOCATE FOR ALLTRIM(ID) = m_act
indice = 65      && Caractère ASCII de la lettre A
temp_total = RDUREE
FOR i = 1 TO nb_bloc
  vecteur_temp(i) = RNUM()
ENDFOR
= ASORT(vecteur_temp,1)
SCATTER MEMVAR

```

```

*** Créer les activités supplémentaires
m_duree = vecteur_temp(1) * temp_total
REPLACE RDUREE WITH m_duree
temp_total = temp_total - m_duree
FOR cpt = 1 TO nb_bloc

    *** Période(s) de blocage
    APPEND BLANK
    GATHER MEMVAR
    REPLACE ID WITH ALLTRIM(ID)+"_"+CHR(indice)
    REPLACE RDUREE WITH vecteur_pbloc(cpt)
    REPLACE BASE WITH .F.
    REPLACE NB_PRED WITH 1
    indice = indice + 1

    *** Sous-activité(s) supplémentaire(s)
    APPEND BLANK
    GATHER MEMVAR
    REPLACE ID WITH ALLTRIM(ID)+"_"+CHR(indice)
    REPLACE BASE WITH .F.
    REPLACE NB_PRED WITH 1
    IF cpt < nb_bloc
        m_duree = vecteur_temp(cpt + 1) * temp_total
        IF m_regle = .T.
            REPLACE PATH WITH (PATH - PDUREE + RDUREE)
            REPLACE PDUREE WITH temp_total
        ENDIF
        REPLACE RDUREE WITH m_duree
        temp_total = temp_total - m_duree
    ELSE
        IF m_regle = .T.
            REPLACE PATH WITH (PATH - PDUREE + temp_total)
            REPLACE PDUREE WITH temp_total
        ENDIF
        REPLACE RDUREE WITH temp_total
    ENDIF
    indice = indice + 1

ENDFOR

*** Modification du fichier des relations
SELECT 8
m_acfin = .F.

*** Modification des relations de successeur de l'activité touchée par le(s) blocage(s)
SCAN FOR ALLTRIM(ID) = ALLTRIM(m_act)
    m_acfin = .T.
    SCATTER MEMVAR
    REPLACE ID WITH ALLTRIM(m_act) + "_" + CHR(indice - 1)
ENDSCAN

```

*** Insertion des relations des sous-activités supplémentaires

indice = 65

APPEND BLANK

IF m_acfin = .T.

 GATHER MEMVAR

 REPLACE SUCC WITH m_act + "_" + CHR(indice)

ELSE

 REPLACE SUCC WITH m_act + "_" + CHR(indice)

 REPLACE ID WITH m_act

ENDIF

FOR cpt = 1 TO (2*nb_bloc - 1)

 APPEND BLANK

 REPLACE ID WITH ALLTRIM(m_act) + "_" + CHR(indice)

 REPLACE SUCC WITH ALLTRIM(m_act) + "_" + CHR(indice + 1)

 indice = indice + 1

ENDFOR

*** Modification du fichier des contraintes

SELECT 3

GO TOP

SCAN FOR ALLTRIM(ID) = ALLTRIM(m_act)

 indice = 66

 SCATTER MEMVAR

 FOR cpt = 1 TO nb_bloc

 APPEND BLANK

 GATHER MEMVAR

 REPLACE ID WITH ALLTRIM(ID)+"_"+CHR(indice)

 indice = indice + 2

 ENDFOR

ENDSCAN

indice = 65

FOR cpt = 1 TO nb_bloc

 APPEND BLANK

 REPLACE ID WITH ALLTRIM(m_act)+"_"+CHR(indice)

 indice = indice + 2

ENDFOR

RETURN

* Procédure: AFFECT

*

* But: Affectation dynamique des ressources

PROCEDURE AFFECT

PRIVATE m_count, m_next, m_fin, m_num, m_nombre

SELECT 1

SET SAFETY OFF

ZAP

SET SAFETY ON

*** PROGRAMME PRINCIPAL

*** Créer le vecteur de disponibilité des ressources

```

SELECT 5
GO TOP
m_totalr = RECCOUNT()
DIMENSION v_ressource(m_totalr)
SCAN
    m_num = RTYPE
    m_nombre= DISP
    v_ressource(m_num) = m_nombre
ENDSCAN

```

*** Créer les vecteur de disponibilité et de charge des zones

```

SELECT 6
GO TOP
m_totalz= RECCOUNT()
DIMENSION v_zone(m_totalz), v_zoncharge(m_totalz)
*** Contraintes de zones
SCAN
    m_num = ZONE
    IF m_num > 0
        v_zone(m_num) = 1
        *** Charge de travail par zone
        IF m_priority = "MAXZON" OR m_priority = "MAXCON"
            m_zoncharge = 0.0
            m_double = " "
            SELECT 3
            SCAN FOR ZONE = m_num
                m_idzone = ALLTRIM(ID)
                IF m_double != m_idzone
                    SELECT 2
                    LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_idzone
                    IF BASE = .T.
                        m_zoncharge = m_zoncharge + PDUREE
                    ENDIF
                ENDIF
                m_double = m_idzone
            SELECT 3
        ENDSCAN
        v_zoncharge(m_num) = m_zoncharge
    ENDIF
ENDIF
SELECT 6
ENDSCAN

```

*** Liste des activités pouvant débuter avec leur priorité relative

```

DO PRIORITY
DO LISTE

```

*** Vérification et affectation des ressources

```

SELECT 1
SET ORDER TO PRIORITE
COUNT ALL TO m_count
DO WHILE (m_count != 0)
  DO CHECK_RESS

    *** Sélection du prochain évènement
    SELECT 1
    SET ORDER TO FIN
    GO TOP
    LOCATE FOR FIN != 0
    m_fin = FIN

    *** Libérez les ressources utilisés
    DO LIBER

    *** Avancer le temps au prochain évènement
    m_tnow = m_fin

    *** Mise à jour du nombre de prédécesseurs
    SELECT 1
    SET ORDER TO DFIN
    SCAN FOR FIN = m_fin
      m_suivant = ALLTRIM(ID)
      SELECT 8
      SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_suivant
        m_succ = ALLTRIM(SUCC)
        SELECT 2
        LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_succ
        REPLACE NB_PRED WITH (NB_PRED - 1)
        SELECT 8
      ENDSCAN
    ENDSCAN

    *** Ajouter les activités admissibles à la liste des activités
    SELECT 2
    SCAN FOR ADMIS = .T.
      m_suiv = ALLTRIM(ID)
      m_prior = PRIORITE
      m_path = PATH
      IF m_priority = "MAXZON" OR m_priority = "MAXCON"
        IF BASE = .F.
          m_addzon = PDUREE
          SELECT 3
          LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_suiv
          m_capzon = ZONE
          IF m_capzon > 0
            v_zoncharge(m_capzon) = v_zoncharge(m_capzon) +
m_addzon
          ENDIF
        ENDIF
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF

```

```

        ENDIF
        SELECT 1
        APPEND BLANK
        REPLACE ID WITH m_suiv
        REPLACE PRIORITE WITH m_prior
        REPLACE FIN WITH 0.0
        REPLACE PROG WITH .T.
        REPLACE PATH WITH m_path
        SELECT 2
        REPLACE ADMIS WITH .F.
    ENDSCAN

    *** Eliminer les activités complétées
    SELECT 1
    GO TOP
    SCAN FOR FIN = m_fin
        IF m_priority = "MAXZON" OR m_priority = "MAXCON"
            m_elim = ALLTRIM(ID)
            SELECT 3
            m_doubler = 0
            SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_elim
                m_elimzon = ZONE
                IF m_elimzon > 0
                    IF m_doubler != m_elimzon
                        SELECT 2
                        LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_elim
                        v_zoncharge(m_elimzon) =
v_zoncharge(m_elimzon) - PDUREE
                    ENDIF
                    m_doubler = m_elimzon
                ENDIF
            ENDIF
        ENDIF
        SELECT 3
    ENDSCAN
    ENDIF
    SELECT 1
    DELETE
    ENDSCAN
    PACK

    *** Vérification pour la mise à jour du calcul du CPM
    IF m_regle = .T.
        DO CPM
    DO PRIORITY
    ENDIF
    SET ORDER TO PRIORITE
    GO TOP
    COUNT ALL TO m_count

ENDDO
SELECT 2
SET ORDER TO NUM

```

```

*****
* PROCEDURE : LISTE
*
* BUT: Lister les activités pouvant débiter
*
* FICHER DE SORTIE: List_act
*****
PROCEDURE LISTE
SELECT 2
GO TOP
SCAN FOR NB_PRED = 0
    m_id = ALLTRIM(ID)
    m_priorite = PRIORITE
    m_num = NUM
    m_path = PATH
    SELECT 1
    APPEND BLANK
    REPLACE ID WITH m_id
    REPLACE PRIORITE WITH m_priorite
    REPLACE PROG WITH .T.
    REPLACE NUM WITH m_num
    REPLACE PATH WITH m_path
    SELECT 2
ENDSCAN
SELECT 1
SET ORDER TO PRIORITE
RETURN

*****
* PROCEDURE : CHECK_RESS
*
* BUT: Vérifier les contraintes de ressources et de zones
*****
PROCEDURE CHECK_RESS
DIMENSION v_zontemp(m_totalz),v_restemp(m_totalr)
*** Vérification du nombre de ressources et des zones disponibles
SELECT 1
GO TOP
m_charge = 0.0
SCAN FOR PROG = .T.
    m_id = ALLTRIM(ID)
    correct = .T.
    FOR i = 1 TO m_totalr
        v_restemp(i) = v_ressource(i)
    ENDFOR
    FOR i = 1 TO m_totalz
        v_zontemp(i) = v_zone(i)
    ENDFOR
    SELECT 3
    SCAN FOR ( ALLTRIM(ID) == m_id AND correct = .T.)

```

```

m_zone = ZONE
m_type = RTYPE
m_res = NRES
IF m_zone > 0
    IF ( (v_zontemp(m_zone) - 1) < 0.0 )
        correct = .F.
    ENDIF
ENDIF
IF m_type > 0
    IF ( (v_restemp(m_type) - m_res) < 0.0 )
        correct = .F.
    ENDIF
    v_restemp(m_type) = v_restemp(m_type) - m_res
ENDIF
ENDSCAN

*** Affectation des zones et des ressources
IF correct = .T.
    IF m_zone > 0
        v_zontemp(m_zone) = v_zontemp(m_zone) - 1
    ENDIF
    FOR i = 1 TO m_totalr
        v_ressource(i) = v_restemp(i)
    ENDFOR
    FOR i = 1 TO m_totalz
        v_zone(i) = v_zontemp(i)
    ENDFOR
    SELECT 2
LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_id
    m_duree = RDUREE
    m_pduree = PDUREE
    m_base = BASE
REPLACE DEB WITH m_tnow
REPLACE FIN WITH (m_tnow + m_duree)
    SELECT 1
LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_id
REPLACE FIN WITH (m_tnow + m_duree)
REPLACE PROG WITH .F.
    IF m_priority = "MAXZONE" AND m_base = .T.
        SELECT 6
LOCATE FOR ALLTRIM(ZONE) == m_zone
        m_charge = CHARGE - m_pduree
REPLACE CHARGE WITH m_charge
    ENDIF
ENDIF
ENDSCAN
RETURN

```

```

*****

```

```

* PROCEDURE : PRIORITY

```

```

*

```

• BUT: Calculer la priorité des activités pour l'affectation des ressources

PROCEDURE PRIORITY

IF m_tnow = 0.0

 SELECT 2

 GO TOP

 SCAN

 *** Calcul des priorités

 DO CASE

 *** Règle d'affectation : Minimum (départ au plus tôt)

 CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "MINES"

 IF ES = 0.0

 m_aprior = 100.0

 ELSE

 m_aprior = (1 / ES)

 ENDIF

 REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

 *** Règle d'affectation : Minimum (départ au plus tard)

 CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "MINLS"

 IF LS = 0.0

 m_aprior = 100.0

 ELSE

 m_aprior = (1 / LS)

 ENDIF

 REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

 *** Règle d'affectation : Minimum (MARGE TOTALE)

 CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "MINSLK"

 IF (LS - ES) = 0.0

 m_aprior = 100.0

 ELSE

 m_aprior = (1 / (LS - ES))

 ENDIF

 REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

 *** Règle d'affectation : Minimum (durée prévue)

 CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "MINDUR"

 IF PDUREE = 0.0

 m_aprior = 100.0

 ELSE

 m_aprior = (1 / PDUREE)

 ENDIF

 REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

 *** Règle d'affectation : Maximum (durée*demande de ressource)

 CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "ACTRES"

 m_actp = ALLTRIM(ID)

 m_aprior = 0.0

 m_duration = PDUREE

```

SELECT 3
SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
      m_aprior = m_aprior + NRES
ENDSCAN
SELECT 2
REPLACE PRIORITE WITH (m_aprior*m_duration)

*** Règle d'affectation : Maximum (demande de ressource)
CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "GRD"
  m_actp = ALLTRIM(ID)
  m_aprior = 0.0
  SELECT 3
  SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
        m_aprior = m_aprior + NRES
  ENDSKAN
  SELECT 2
  REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

*** Règle d'affectation : Maximum (durée prévue)
CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "MAXDUR"
  m_aprior = PDUREE
  REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

*** Règle d'affectation : Minimum (demande de ressource)
CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "SRD"
  m_actp = ALLTRIM(ID)
  m_aprior = 0.0
  SELECT 3
  SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
        m_aprior = m_aprior + NRES
  ENDSKAN
  SELECT 2
  IF m_aprior = 0.0
    REPLACE PRIORITE WITH 100.0
  ELSE
    REPLACE PRIORITE WITH (1 / m_aprior)
  ENDIF

*** Règle d'affectation : Maximum (Contrainte)
CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) = "MAXCON"
  m_actp = ALLTRIM(ID)
  m_aprior = 0.0
  m_priozone = 0.0
  SELECT 3
  SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
        m_idzone = ZONE
        IF m_idzone = 0
          m_bprior = 0.0
        ELSE
          m_bprior = v_zoncharge(m_idzone)
        ENDIF

```

```

                                m_priozone = MAX(m_priozone, m_bprior)
                                ENDSCAN
                                SELECT 2
                                LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
                                m_priopath = PATH
                                m_aprior = MAX(m_priozone, m_priopath)
                                REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

                                ENDCASE
                                ENDSCAN
ELSE
    SELECT 1
    GO TOP
    SCAN
        m_actp = ALLTRIM(ID)

        *** Calcul des priorités
        DO CASE

            *** Règle d'affectation : Minimum (départ au plus tard)
            CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "MINLS"
                SELECT 2
                LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
                IF LS = 0.0
                    m_aprior = 100.0
                ELSE
                    m_aprior = (1 / LS)
                ENDIF
                REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

            *** Règle d'affectation : Minimum (MARGE TOTALE)
            CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "MINSLK"
                SELECT 2
                LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
                IF (LS - ES) = 0.0
                    m_aprior = 100.0
                ELSE
                    m_aprior = (1 / (LS - ES))
                ENDIF
                REPLACE PRIORITE WITH m_aprior

            *** Règle d'affectation : Maximum (Contrainte)
            CASE UPPER(ALLTRIM(m_priority)) == "MAXCON"
                m_priozone = 0.0
                SELECT 3
                SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
                m_idzone = ZONE
                IF m_idzone = 0
                    m_bprior = 0.0
                ELSE
                    m_bprior = v_zoncharge(m_idzone)
            END CASE
        END CASE
    END CASE

```

```

                                ENDIF
                                m_priozon = MAX(m_priozon, m_bprior)
                                ENDSCAN
                                SELECT 2
                                LOCATE FOR ALLTRIM(ID) == m_actp
                                m_priopath = PATH
                                m_aprior = MAX(m_priozon, m_priopath)
                                REPLACE PRIORITE WITH m_aprior
                                ENDCASE
                                SELECT 1
                                REPLACE PRIORITE WITH m_aprior
                                ENDSCAN
                                ENDIF
                                RETURN

*****
* PROCEDURE : LIBER
*
* BUT: Libérer les ressources utilisées pour les activités complétées
*
*****
PROCEDURE LIBER
SELECT 1
SCAN FOR FIN = m_fin
    m_identi = ALLTRIM(ID)
    SELECT 3
    SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_identi
        m_zon = ZONE
        m_ress = NRES
        m_typ = RTYPE
        IF m_typ > 0
            v_ressource(m_typ) = v_ressource(m_typ) + m_ress
        ENDIF
        IF m_zon > 0
            v_zone(m_zon) = 1
        ENDIF
    ENDSCAN
ENDSCAN
RETURN

*****
* PROCEDURE : RESULT
*
* BUT: Enregistrer les résultats de simulation dans le fichier de sortie
*
* FICHER D'ENTREE: m_projet.CAL
*
* FICHER DE SORTIE: m_projet.ACT et RESULT.DBF
*****
PROCEDURE RESULT
SELECT 2

```

```

CALCULATE MAX(FIN) TO m_maxfin
SELECT 7
GO TOP
SCAN
    m_activ = ALLTRIM(ID)
    m_mdeb = m_tnow
    m_mfin = 0.0
    SELECT 2
    SCAN FOR ID = RTRIM(m_activ)
        m_deb = DEB
        m_mdeb = MIN (m_mdeb,m_deb)
        m_fin = FIN
        m_mfin = MAX (m_mfin,m_fin)
    ENDSCAN
    REPLACE MDEB WITH (MDEB + m_mdeb)
    REPLACE MFIN WITH (MFIN + m_mfin)
    REPLACE MCOUT WITH (MCOUT + CCOUT)
ENDSCAN
SELECT 9
APPEND BLANK
REPLACE REPLIC WITH j
REPLACE FIN WITH m_maxfin
REPLACE IMP WITH m_tfail
REPLACE BLOC WITH m_tbloc
REPLACE COUT WITH m_tcout
RETURN

```

```

*****
* PROCEDURE : SOMMAIRE
*
* BUT: Construire le sommaire des résultats
*
* FICHER DE SORTIE: m_projet.ACT et SOMMAIRE.DBF
*****
PROCEDURE SOMMAIRE
*** Résultats moyens par activité
SELECT 7
GO TOP
SCAN
    REPLACE MDEB WITH (MDEB / m_replic)
    REPLACE MFIN WITH (MFIN / m_replic)
    REPLACE MCOUT WITH (MCOUT / m_replic)
    REPLACE MIMP WITH (MIMP / m_replic)
    REPLACE MBLOC WITH (MBLOC / m_replic)
ENDSCAN
*** Résultats moyens pour le projet
SELECT 9
AVERAGE FIN TO som_fin
AVERAGE COUT TO som_cout
AVERAGE IMP TO som_imp

```

```

AVERAGE BLOC TO som_bloc
CALCULATE MIN(FIN) TO minfin
CALCULATE MAX(FIN) TO maxfin
CALCULATE VAR(FIN) TO mvarfin
CALCULATE VAR(BLOC) TO mvarbloc

```

*** Évaluation de la corrélation entre le no. de blocages et la durée

```

GO TOP
SCAN
      REPLACE COVAR WITH ((FIN-som_fin)*(BLOC-som_bloc))
ENDSCAN
AVERAGE COVAR TO m_covar
m_correlat = (m_covar/(SQRT(mvarfin*mvarbloc)))

```

*** Copier les résultats dans le fichier sommaire

```

SELECT 10
APPEND BLANK
REPLACE SFIN WITH som_fin
REPLACE SCOUT WITH som_cout
REPLACE SIMP WITH som_imp
REPLACE SBLOC WITH som_bloc
REPLACE REGLE WITH m_priority
REPLACE CPUTIME WITH m_cputime
REPLACE MIN WITH minfin
REPLACE MAX WITH maxfin
REPLACE VAR WITH mvarfin
*** REPLACE CORREL WITH m_correlat
** REPLACE VAR_RED WITH ((1-(m_correlat*m_correlat))*mvarfin)
*** REPLACE MOY_RED WITH (som_fin-((m_covar/mvarbloc)*(mvarbloc-moy_bloc)))
RETURN

```

* PROCEDURE : NETTOYAGE

*

• BUT: Nettoyer les fichiers nécessaires à la simulation

PROCEDURE NETTOYAGE

*** Nettoyage des fichiers des contraintes et de calcul (m_projet.CON et m_projet.CAL)

```

SELECT 2
GO TOP
SCAN FOR BASE = .F.
      m_actnb = ALLTRIM(ID)
      DELETE
      PACK
      SELECT 3
      SCAN FOR ALLTRIM(ID) == m_actnb
      DELETE
      ENDSCAN
      PACK
      SELECT 2
ENDSCAN

```

```

SCAN
    REPLACE ADMIS WITH .F.
ENDSCAN
RETURN

```

```

*****

```

```

• FONCTION : RNUM

```

```

*

```

```

* BUT: Génération de variables aléatoires

```

```

*****

```

```

FUNCTION RNUM
PUBLIC mseed
X = MOD( (69069 * mseed + 1), 2**32)
    URAND = X / 2**32
    mseed = X
RETURN URAND

```

```

*****

```

```

• FONCTION : GENR

```

```

•

```

```

• BUT: Génération de variables aléatoires

```

```

*****

```

```

FUNCTION GENR
DO CASE
    *** Durée déterministe
    CASE ALLTRIM(DIST) == ""
        RETURN MOY

    *** Distribution uniforme avec borne inférieure PAR1 et borne supérieure PAR2
    CASE UPPER(ALLTRIM(DIST)) = "UNIFO"
        RETURN (PAR2 - PAR1)*RNUM() + PAR1

    *** Distribution exponentielle avec moyenne MOY
    CASE UPPER(ALLTRIM(DIST)) = "EXPON"
        RETURN -MOY*log(RNUM())

    *** Distribution triangulaire avec borne inférieure PAR1, moyenne MOY, borne supérieure
    PAR2
    CASE UPPER(ALLTRIM(DIST)) = "TRIAN"
        Z = RNUM()
        R = 0.0
        IF Z <= (MOY - PAR1) / (PAR2 - PAR1)
            R = PAR1 + SQRT((MOY - PAR1)*(PAR2 - PAR1)*Z)
        ELSE
            R = PAR2 - SQRT((PAR2 - MOY)*(PAR2 - PAR1)*(1-Z))
        ENDIF
        RETURN R

    *** Distribution Erlang avec moyenne MOY et paramètre PAR1
    CASE UPPER(ALLTRIM(DIST)) = "ERLAN"
        R = 0.0

```

```

        m_ind = INT(PAR1)
        FOR i = 1 to m_ind
            R = R + RNUM()
        ENDFOR
        RETURN -MOY*log(R)

    *** Distribution normale avec moyenne MOY et déviation standard PAR1
    CASE UPPER(ALLTRIM(DIST)) = "NORML"
        m_norm = FNORM(MOY,PAR1)
        RETURN m_norm

    *** Distribution lognormale avec moyenne MOY et déviation standard PAR1
    CASE UPPER(ALLTRIM(DIST)) = "LOGNL"
        U = log(MOY) - 0.5*(PAR1**2)
        STD = Sqrt(log(PAR1**2/((MOY**2)+1)))
        RETURN EXP(FNORM(U,STD))

    *** Distribution Weibull avec paramètre d'échelle PAR1 et paramètre de courbe PAR2
    CASE UPPER(ALLTRIM(DIST)) = "WEIBL"
        RETURN (- PAR1 * log(RNUM()))**(1.0/PAR2)

    *** Distribution Gamma avec paramètre PAR1
    CASE UPPER(ALLTRIM(DIST)) = "GAMMA"
        RETURN GAMMA(PAR1,PAR2)
ENDCASE
FUNCTION FNORM
    PARAMETER U,STD
    R = x_p(RNUM())
    RETURN R* STD + U

FUNCTION x_p
    PARAMETER p
    IF p < 0 or p > 1
        RETURN 0.0
    ENDIF
    IF p < .5
        adjust = .T.
    ELSE
        p = 1 - p
        adjust = .F.
    ENDIF
    t = Sqrt(LOG(1/(p*p)))
    v = t - (((t*0.010328 + 0.802853);
        * t + 2.515517);
        / (((t*0.001308 + 0.189269);
        * t + 1.432788) * t + 1)
    RETURN IIF (adjust, -v, v)

FUNCTION GAMMA
    PARAMETER SCA,SHA
    RIND = .F.

```

```
DO WHILE RIND = .F.  
  M1 = RNUM()**(1.0/SCA)  
  M2 = RNUM()**(1.0/(1.0 - SCA))  
  IF M1 + M2 <= 1  
    M3 = (M1/(M1 + M2))  
    RIND = .T.  
  ENDIF  
ENDDO  
RETURN M3*(-log(RNUM())*SHA)
```

ANNEXE II : EXPÉRIMENTATION - CAS DÉTERMINISTE

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
1	396.190	364.400	320.500	396.800	397.100	455.560	410.860	364.400	364.400	322.270	320.500	337657440
2	184.540	187.560	187.330	184.540	184.310	187.560	187.560	202.560	202.560	169.540	169.540	3719904469
3	254.500	251.110	257.580	290.760	251.190	278.800	287.120	247.580	247.580	261.090	247.580	2944770130
4	156.710	149.680	149.680	149.680	149.680	149.680	149.680	149.680	149.680	149.680	149.680	3260368823
5	238.610	260.520	255.470	241.430	242.180	245.270	276.640	238.610	253.260	263.950	238.610	2577252962
6	181.290	186.740	190.560	193.920	192.250	186.740	205.360	186.740	186.740	181.290	181.290	904620645
7	289.210	322.810	327.600	301.820	277.760	311.700	322.810	279.430	279.430	264.430	264.430	605425520
8	320.040	273.220	295.980	320.040	360.140	320.040	345.140	273.220	273.220	270.960	270.960	4060545627
9	281.500	281.500	239.150	252.690	252.690	252.690	252.690	258.950	258.950	258.950	239.150	3532171000
10	208.160	190.600	189.330	185.810	210.970	190.600	189.330	189.330	189.330	185.810	185.810	2031410579
11	308.880	288.160	289.280	326.860	296.800	318.890	355.040	317.750	317.750	280.050	280.050	3163907068
12	331.720	268.890	292.060	264.010	264.890	312.290	332.490	287.700	271.930	293.120	264.010	3116810581
13	240.160	271.460	243.150	302.960	288.910	302.960	263.860	234.460	286.460	243.150	234.460	389682974
14	305.240	240.090	289.100	268.500	255.090	253.500	294.390	255.090	255.090	262.860	240.090	4043917977
15	314.200	297.480	301.960	362.930	359.630	362.930	378.630	312.480	312.480	298.400	297.480	2541188924
16	248.290	223.230	232.280	238.230	247.280	238.230	242.860	248.290	248.290	211.540	211.540	2479482781
17	227.130	222.700	220.190	215.840	227.130	211.640	207.930	222.700	222.700	243.500	207.930	397325416
18	212.260	227.840	212.260	212.260	212.260	212.260	211.080	212.260	212.260	212.260	211.080	2392501993
19	241.680	223.270	242.030	241.680	246.970	241.680	303.200	223.270	223.270	241.680	223.270	576808692
20	294.970	304.490	335.950	278.020	293.240	278.020	312.880	282.570	282.570	278.020	278.020	2627979415
21	353.960	313.970	313.200	350.350	324.020	350.350	312.350	354.730	354.730	326.760	312.350	1027135284
22	172.020	172.020	175.130	189.930	172.020	211.690	248.620	172.020	172.020	172.020	172.020	3501291335
23	229.170	206.080	200.980	228.870	270.760	228.870	192.310	206.080	206.080	192.830	192.310	2267403300
24	181.530	181.530	181.530	181.530	181.530	181.530	181.530	181.530	181.530	181.530	181.530	3399090311
25	207.310	212.920	212.920	213.180	213.180	200.680	212.920	217.780	218.700	202.780	200.680	3481746294
26	192.720	199.390	177.720	192.720	192.720	246.420	231.420	192.720	192.720	192.720	177.720	1014967305
27	444.940	415.100	507.830	453.180	453.180	415.100	484.920	434.700	434.700	446.840	415.100	4039439606
28	349.240	376.230	342.700	370.250	329.330	370.250	357.960	329.330	329.330	327.460	327.460	3374984741
29	255.200	246.860	234.610	246.860	249.670	246.860	246.860	239.850	239.850	246.860	234.610	2425139606
30	244.000	245.650	266.200	237.350	302.180	260.650	287.180	245.050	245.050	237.350	237.350	489219323
31	248.770	244.710	262.250	248.300	256.370	249.420	246.030	244.710	244.710	239.320	239.320	641221232
32	291.250	266.310	287.960	267.500	317.480	267.500	291.840	281.310	281.310	259.970	259.970	693079427
33	384.650	378.940	413.730	393.940	382.570	350.170	367.300	377.340	377.340	362.340	350.170	462800648
34	233.750	242.070	251.030	226.180	233.750	268.380	266.030	242.070	242.070	244.830	226.180	1354955509
35	207.730	192.730	192.730	203.620	204.970	203.620	192.730	207.730	207.730	192.730	192.730	883759886

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
36	235.940	232.980	206.760	240.450	221.760	240.450	206.760	240.450	240.450	225.450	206.760	966782821
37	284.650	278.680	261.880	310.870	262.780	342.600	301.960	276.880	276.880	274.800	261.880	646514550
38	182.820	182.820	202.660	182.820	182.820	182.820	182.820	182.820	182.820	167.820	167.820	2247020379
39	228.670	272.210	238.170	294.970	294.970	279.970	259.640	276.810	276.810	231.310	228.670	2547908244
40	277.590	203.220	272.170	277.590	217.630	277.590	217.630	217.630	217.630	210.750	203.220	309571443
41	168.090	147.680	162.890	147.680	153.370	147.680	162.890	147.680	147.680	147.680	147.680	1175215356
42	267.480	274.780	299.930	245.020	292.630	247.010	254.510	284.620	284.620	277.320	245.020	2944364593
43	291.570	339.150	291.570	347.320	331.890	337.680	331.890	314.790	314.790	291.570	291.570	845170948
44	228.240	213.240	211.190	228.240	228.240	228.240	213.240	228.240	228.240	213.240	211.190	827881329
45	223.050	188.690	207.430	221.790	223.050	221.790	207.430	199.480	199.480	192.430	188.690	3364465340
46	265.000	282.530	245.710	275.130	260.710	260.130	245.710	260.710	260.710	243.760	243.760	110600411
47	218.520	233.500	203.520	218.520	218.520	218.520	203.520	230.360	230.360	234.910	203.520	2029490682
48	150.750	145.700	150.750	145.700	150.750	145.700	145.700	145.700	145.700	145.700	145.700	3215461533
49	323.590	326.860	337.750	368.990	356.810	390.600	353.630	361.670	361.670	347.690	323.590	1024162766
50	136.010	129.140	129.250	132.310	132.310	141.210	132.130	129.140	129.140	129.140	129.140	1523841343
51	213.970	248.640	227.530	219.530	218.560	219.530	234.140	243.900	243.900	218.560	213.970	1144376844
52	172.430	196.510	170.910	172.430	172.430	175.760	210.120	172.430	172.430	172.430	170.910	1477243315
53	231.440	231.440	231.440	231.440	231.440	231.440	231.440	231.440	231.440	231.440	231.440	3085575054
54	252.090	274.640	252.090	257.860	283.180	257.860	274.640	252.090	252.090	252.090	252.090	111610581
55	236.360	255.830	225.340	233.700	227.650	232.000	217.000	242.540	242.540	210.340	210.340	359711912
56	426.500	473.170	428.530	467.540	428.530	438.080	469.250	461.330	426.500	422.750	422.750	258985699
57	148.160	137.520	150.570	145.900	151.720	145.900	189.480	152.520	157.110	145.900	137.520	1904505760
58	281.000	265.950	234.300	280.950	280.950	265.950	265.950	280.950	280.950	265.950	234.300	2729290787
59	285.640	269.740	285.640	269.740	285.640	269.740	274.780	269.740	269.740	269.740	269.740	4044201256
60	180.350	163.980	163.980	180.350	163.980	180.350	163.980	163.980	180.350	163.980	163.980	4269417145
61	206.030	198.880	200.060	213.880	206.040	224.520	238.150	213.880	213.880	198.880	198.880	4085003538
62	309.880	282.160	282.160	314.280	297.160	306.250	322.500	297.160	297.160	299.280	282.160	2788783885
63	369.040	353.060	397.250	383.050	390.180	383.050	394.350	371.180	371.180	356.430	353.060	1684054148
64	277.320	254.630	262.320	269.630	269.630	269.630	269.630	269.630	269.630	267.620	254.630	2532637219
65	254.480	243.780	222.730	296.820	256.770	296.820	268.360	258.780	258.780	216.750	216.750	1152041156
66	245.270	300.370	221.780	261.650	268.290	326.610	236.780	326.610	326.610	263.070	221.780	3360163383
67	225.940	210.940	203.920	209.210	218.920	209.210	210.940	225.940	225.940	210.940	203.920	3691562470
68	374.830	441.080	352.470	480.450	371.000	480.450	385.350	429.890	429.890	384.200	352.470	3334338585
69	240.770	226.460	239.380	270.200	285.620	244.180	235.520	235.520	235.520	235.520	226.460	1967324232
70	181.400	180.080	176.190	207.470	176.190	206.520	185.950	207.470	207.470	182.930	176.190	3126751503

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
71	288.990	317.530	293.140	304.610	310.100	322.740	318.740	275.920	275.920	279.360	275.920	150504152
72	194.550	171.030	186.030	178.960	199.170	178.960	186.030	201.070	186.030	217.370	171.030	1184255613
73	252.220	245.070	252.220	335.010	252.220	335.010	335.010	252.220	252.220	294.330	245.070	301757810
74	313.430	293.520	297.570	307.890	286.680	285.400	297.570	286.680	286.680	293.500	285.400	2433596921
75	316.590	298.310	299.710	309.360	317.720	309.360	345.870	313.310	313.310	307.930	298.310	574009218
76	296.650	318.250	282.280	282.280	282.280	315.570	309.420	282.280	282.280	274.520	274.520	1706967201
77	203.020	203.020	207.320	263.520	222.090	225.880	224.900	203.020	203.020	227.270	203.020	2121049358
78	261.480	252.190	235.610	252.400	243.630	282.190	260.470	272.600	272.600	280.680	235.610	789483167
79	239.080	260.800	217.220	274.190	258.530	265.300	243.530	260.850	260.850	257.960	217.220	3529573668
80	210.460	217.120	248.280	215.090	221.000	231.700	234.820	208.450	208.450	218.730	208.450	524689375
81	207.400	220.580	231.440	205.210	219.500	222.460	203.060	227.860	217.080	222.460	203.060	2648318348
82	338.670	313.880	338.670	374.360	349.570	355.030	313.880	313.880	313.880	324.240	313.880	3496548585
83	246.800	217.270	260.340	237.440	239.940	237.440	222.980	252.690	252.690	232.270	217.270	464034036
84	223.010	200.990	218.220	208.080	215.990	198.970	200.990	208.080	208.080	208.080	198.970	582865941
85	210.660	254.370	234.200	260.170	273.270	245.170	258.270	210.660	210.660	237.400	210.660	2577134274
86	330.810	328.810	322.510	339.350	328.810	369.110	385.360	323.580	323.580	321.540	321.540	2788427823
87	256.150	243.550	256.150	275.760	275.760	275.760	269.420	243.550	243.550	243.550	243.550	564632654
88	170.640	162.180	183.910	201.720	201.720	162.180	170.640	170.640	170.640	162.180	162.180	2766005645
89	231.780	231.490	228.960	231.780	219.220	237.390	222.390	231.780	231.780	215.490	215.490	4163545096
90	299.040	241.520	288.610	280.660	288.970	280.660	302.500	246.500	246.500	248.280	241.520	836790145
91	275.280	265.800	249.790	232.600	229.310	254.030	239.560	240.020	240.020	249.610	229.310	1302609386
92	295.440	295.070	295.070	299.270	295.070	323.990	316.600	316.600	316.600	308.840	295.070	15347895
93	295.540	258.280	331.470	249.520	246.010	249.520	331.470	280.880	280.880	271.840	246.010	88663872
94	281.760	328.900	266.760	340.870	288.720	325.870	306.730	296.690	296.690	273.720	266.760	2132271319
95	168.020	154.130	161.760	173.240	161.760	173.240	161.030	168.020	168.020	161.760	154.130	1951039170
96	243.570	249.600	243.570	262.760	237.000	262.760	235.020	235.020	235.020	237.000	235.020	1193336019
97	170.320	170.320	153.390	181.100	170.320	181.100	196.100	170.320	170.320	155.320	153.390	4111421376
98	285.180	270.330	233.190	307.490	261.690	279.070	263.360	285.180	285.180	285.180	233.190	1394352547
99	259.300	263.790	259.300	260.960	270.020	259.300	259.300	259.300	259.300	259.300	259.300	1193952660
100	180.410	180.410	180.410	208.540	181.110	208.540	180.410	180.410	180.410	180.410	180.410	3883877447
101	262.160	247.160	259.570	296.050	262.160	296.050	257.270	262.160	262.160	247.160	247.160	1580697802
102	271.650	262.570	271.650	261.770	261.770	289.420	290.430	289.420	281.370	289.420	261.770	2340842117
103	200.230	186.680	197.520	199.680	188.690	199.680	218.910	188.300	188.300	197.520	188.300	1915177382
104	193.010	217.830	193.010	252.950	187.380	275.150	217.830	208.120	208.120	208.120	187.380	2886643855
105	240.120	224.270	207.590	219.690	208.400	235.560	218.880	253.040	253.040	208.400	207.590	1187115116

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
106	248.610	220.770	230.460	247.620	213.990	247.620	230.460	262.080	262.080	230.120	213.990	2688846739
107	290.210	249.460	237.640	252.670	252.640	281.590	287.570	262.510	265.090	266.540	237.640	2110434914
108	388.670	400.330	360.210	419.350	361.350	441.210	444.350	364.670	364.670	343.660	343.660	2992563489
109	257.030	261.930	246.500	281.320	281.320	281.320	287.420	261.930	261.930	261.930	246.500	1957092208
110	380.060	366.120	362.490	411.330	385.810	411.330	377.490	366.120	366.120	366.120	362.490	975469757
111	268.780	234.520	281.260	245.720	249.700	235.610	238.850	249.520	249.520	249.390	234.520	1605118738
112	301.860	308.090	300.810	325.710	301.860	323.090	301.860	323.090	323.090	308.090	300.810	1233358343
113	172.930	173.680	170.350	173.680	173.680	173.680	171.450	173.680	173.680	171.110	170.350	1758584098
114	253.870	250.100	249.370	283.790	235.360	273.880	261.850	247.350	247.350	242.800	235.360	1601646187
115	278.020	278.160	261.890	260.290	280.640	260.290	278.170	293.170	293.170	260.290	260.290	958986316
116	225.270	199.910	208.060	212.860	226.410	212.860	187.670	200.810	200.810	198.880	187.670	2229212299
117	267.460	284.100	251.820	287.960	300.700	290.910	304.710	289.080	289.080	293.470	251.820	77655152
118	248.380	239.310	233.380	248.380	262.210	249.610	233.380	248.380	248.380	233.380	233.380	2910510139
119	250.660	261.430	247.590	256.940	250.660	248.330	249.510	250.660	250.660	241.940	241.940	2328767320
120	187.920	166.150	200.100	163.150	187.920	172.920	200.100	178.150	178.150	175.920	163.150	2211148781
121	241.770	240.280	268.110	279.640	279.640	253.340	268.070	231.250	231.250	231.250	231.250	4212774158
122	209.100	201.500	209.100	211.490	209.100	252.440	226.340	211.490	211.490	220.200	201.500	778873429
123	136.510	121.510	131.750	133.190	136.510	121.510	131.750	136.510	136.510	133.190	121.510	612286570
124	235.600	250.990	250.990	233.320	235.600	233.320	250.990	265.410	265.410	235.600	233.320	3971391835
125	380.920	484.610	421.180	423.280	364.930	451.460	484.610	402.390	402.390	387.850	364.930	195494474
126	336.340	316.900	331.900	365.380	385.940	365.380	402.610	315.230	315.230	300.230	300.230	2367660295
127	272.420	268.040	269.610	270.090	283.950	270.090	313.700	272.640	272.640	252.670	252.670	315198498
128	368.950	362.360	329.490	332.320	355.510	332.320	354.820	329.950	329.950	329.490	329.490	1924945993
129	255.810	206.210	255.810	253.730	234.530	253.730	255.810	227.090	227.090	208.290	206.210	3597726352
130	369.970	364.840	394.700	462.270	418.500	462.270	403.100	393.130	393.130	405.720	364.840	1653700655
131	242.340	267.980	250.450	255.220	267.980	275.100	267.980	242.340	242.340	242.340	242.340	173271394
132	234.300	211.020	219.300	213.750	234.300	213.750	225.060	219.200	219.620	223.680	211.020	1707870393
133	241.750	231.320	245.180	272.770	283.650	277.340	268.650	246.320	246.320	231.320	231.320	1350755166
134	365.590	366.990	360.120	364.650	335.160	356.080	358.990	338.270	338.270	342.570	335.160	2585698243
135	241.030	261.680	271.760	261.850	241.840	261.680	254.690	276.680	276.680	233.190	233.190	2120266114
136	257.500	263.750	242.790	283.850	286.050	283.850	298.360	251.960	251.960	238.400	238.400	1147845091
137	381.160	349.180	382.810	345.710	406.060	357.680	382.810	347.980	347.980	333.390	333.390	1190310122
138	338.000	316.790	310.390	312.810	336.040	338.000	348.910	336.040	336.040	346.950	310.390	109875387
139	173.530	161.790	159.490	176.790	187.440	176.790	187.440	176.790	176.790	150.020	150.020	3915801908
140	270.390	277.780	232.970	255.360	247.970	255.390	277.780	270.390	270.390	245.020	232.970	1939481857

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
141	144.860	149.370	145.890	227.500	189.180	227.500	214.520	144.860	144.860	144.860	144.860	341888214
142	272.930	268.900	268.900	272.930	289.450	300.190	257.930	272.930	272.930	272.930	257.930	2863411297
143	89.240	89.240	89.240	99.810	89.240	89.240	89.240	90.300	90.300	89.240	89.240	341900888
144	220.950	192.620	219.910	216.840	207.620	216.840	217.440	237.210	237.210	192.620	192.620	1785684351
145	217.100	212.130	217.100	211.490	204.930	215.780	212.130	226.490	226.490	204.930	204.930	1893010724
146	185.470	223.920	182.710	223.920	183.220	223.920	223.920	180.790	180.790	172.730	172.730	2960410591
147	236.070	238.410	293.780	229.360	250.500	226.470	270.300	248.060	248.060	224.540	224.540	4213964804
148	240.580	240.530	252.370	267.370	242.420	258.470	267.370	222.410	222.410	248.110	222.410	829353391
149	169.430	172.560	214.790	230.670	214.790	230.670	214.790	167.490	167.490	169.430	167.490	18426966
150	390.190	390.600	390.600	384.930	391.650	384.930	390.600	390.190	390.190	357.480	357.480	3021667219
151	305.710	289.410	298.820	289.410	298.820	289.410	316.010	298.820	298.820	298.820	289.410	3368949640
152	239.630	245.040	227.070	288.790	287.870	274.970	245.040	245.040	245.040	246.980	227.070	1605343641
153	180.490	190.090	180.490	194.040	190.090	194.040	180.490	190.090	190.090	180.490	180.490	4227995868
154	199.590	199.590	197.400	199.590	199.590	199.590	184.590	199.590	199.590	184.590	184.590	794906085
155	238.260	216.280	208.720	261.260	255.130	288.060	241.630	243.060	243.060	256.630	208.720	592684432
156	281.390	275.490	267.840	290.490	267.840	261.040	336.870	267.770	290.490	285.760	261.040	2510589805
157	231.740	195.120	208.010	206.460	208.010	218.160	205.280	219.810	219.810	218.160	195.120	3107103374
158	199.960	196.090	199.960	266.290	197.710	266.920	243.630	196.090	196.090	199.960	196.090	2241231805
159	255.070	238.330	221.870	277.200	265.740	283.560	253.460	247.330	247.330	226.970	221.870	3724425650
160	343.170	332.220	335.670	329.370	333.460	329.370	328.170	347.220	347.220	306.160	306.160	1744350725
161	161.680	169.890	171.100	178.110	172.200	178.110	193.030	150.270	150.270	167.470	150.270	2341035790
162	181.170	194.110	186.440	183.250	181.170	194.110	202.600	183.250	183.250	181.170	181.170	1675698867
163	289.970	271.230	315.270	305.280	289.970	274.520	299.820	271.230	280.170	278.820	271.230	312276168
164	254.830	288.090	238.480	291.450	313.640	291.450	279.200	266.300	263.000	254.960	238.480	2709024755
165	294.800	283.930	308.630	276.120	298.930	276.120	323.630	276.120	276.120	276.120	276.120	1473163368
166	260.350	236.840	207.490	236.840	260.100	236.840	260.350	236.840	236.840	234.520	207.490	572985323
167	293.350	299.290	299.080	299.980	291.750	294.940	319.070	314.480	314.480	278.160	278.160	4216491336
168	365.070	312.300	301.500	364.040	329.160	364.040	430.170	340.960	340.960	375.310	301.500	3369723619
169	220.180	227.570	205.180	252.480	268.520	248.750	245.370	242.570	242.570	248.090	205.180	3738648640
170	319.700	310.570	297.390	355.540	355.540	301.460	280.750	319.700	319.700	293.440	280.750	382179689
171	369.430	322.810	312.990	313.900	354.430	313.900	361.910	369.430	369.430	330.070	312.990	1908838436
172	210.390	210.390	203.960	210.390	210.390	210.390	203.960	210.390	210.390	195.390	195.390	3380893833
173	218.070	254.790	192.300	278.380	200.740	268.230	200.740	213.290	213.290	190.030	190.030	3671672274
174	221.990	234.080	207.940	221.070	221.990	221.070	208.520	249.080	249.080	221.070	207.940	2955634747
175	299.260	299.260	283.400	282.870	285.570	299.260	299.260	299.260	299.260	272.980	272.980	337192828

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
176	250.420	215.560	251.920	265.130	250.420	229.280	250.810	250.230	250.230	221.410	215.560	2070610173
177	240.870	226.260	240.870	226.260	214.370	245.560	243.690	226.260	226.260	233.480	214.370	241373504
178	261.390	266.160	262.910	305.240	271.700	296.470	322.940	266.160	266.160	247.790	247.790	205507231
179	185.610	229.170	170.610	261.140	220.730	249.140	246.140	185.610	185.610	214.170	170.610	2530394072
180	289.450	319.080	306.900	307.080	320.260	282.260	319.080	319.080	319.080	318.190	282.260	3742070331
181	374.500	348.720	325.960	364.840	325.960	366.840	355.060	327.800	327.800	327.800	325.960	1620065660
182	279.650	250.290	279.650	250.290	250.290	250.290	279.650	250.290	250.290	250.290	250.290	3826263665
183	258.760	258.760	266.830	258.760	258.760	258.760	234.010	258.760	258.760	218.140	218.140	867935476
184	223.930	235.010	236.000	214.260	226.320	235.010	222.930	235.010	227.520	219.410	214.260	2200548647
185	171.390	171.390	173.270	171.390	171.390	163.780	163.780	171.390	171.390	163.780	163.780	2003705078
186	185.250	181.410	181.910	258.070	199.130	243.070	243.070	195.230	195.230	194.450	181.410	3815130159
187	314.190	307.690	321.020	305.480	327.060	305.480	339.020	305.480	305.480	328.150	305.480	3034831648
188	250.550	240.690	258.310	272.110	247.720	272.110	258.310	254.330	254.330	258.310	240.690	735233535
189	188.590	190.370	198.980	211.060	198.470	219.260	191.350	191.220	191.220	186.930	186.930	95747858
190	296.700	274.390	279.390	307.120	268.470	307.120	294.390	306.910	306.910	281.700	268.470	964280209
191	209.870	209.870	231.470	209.870	231.470	209.870	209.870	209.870	209.870	209.870	209.870	1962774150
192	255.870	255.870	255.870	255.870	255.870	255.870	263.630	255.870	255.870	255.870	255.870	4046071255
193	237.130	201.260	231.360	216.260	237.130	216.260	203.250	241.770	241.770	225.110	201.260	1507372328
194	258.720	224.500	243.720	252.320	252.320	252.320	254.900	228.320	228.320	213.320	213.320	3600316805
195	197.210	201.080	197.210	197.210	211.520	197.210	240.500	197.210	197.210	197.210	197.210	2611764650
196	202.430	177.100	182.140	211.930	199.710	211.930	187.500	199.710	199.710	177.480	177.100	900457437
197	311.300	279.420	314.540	294.420	307.630	337.750	292.630	294.420	294.420	298.090	279.420	1195890680
198	320.960	305.960	313.670	320.480	316.560	312.130	331.380	320.960	320.960	284.910	284.910	1941607949
199	277.260	283.100	290.840	298.100	258.560	298.100	298.100	242.100	242.100	242.100	242.100	1808554998
200	382.110	298.590	345.640	313.590	319.220	335.060	367.110	330.830	330.830	313.160	298.590	1597589355
201	183.250	183.250	196.400	183.250	184.890	183.250	195.530	183.250	183.250	196.400	183.250	2416805102
202	201.910	172.850	186.910	190.360	201.910	190.360	186.120	206.540	206.540	192.110	172.850	3339426759
203	242.170	227.170	227.170	242.170	242.170	242.170	230.620	242.170	242.170	242.170	227.170	814939812
204	264.480	239.100	234.600	237.600	244.970	237.600	257.920	254.100	254.100	237.710	234.600	2617226791
205	188.300	170.180	198.150	182.320	182.320	204.640	204.640	182.320	182.320	170.180	170.180	607732214
206	367.920	375.700	333.380	405.430	369.340	365.870	422.390	359.270	359.270	364.550	333.380	2021775453
207	259.460	208.000	226.150	256.670	208.000	261.460	261.650	259.460	259.460	244.460	208.000	4059592758
208	378.940	387.140	363.940	402.140	378.940	387.140	363.940	378.940	378.940	363.940	363.940	1546910031
209	171.940	186.040	171.940	186.040	186.040	186.040	174.120	174.120	174.120	171.940	171.940	2882478772
210	178.830	176.180	159.000	191.430	172.590	197.670	163.830	191.180	191.180	178.830	159.000	1380622715

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
211	171.010	165.500	172.170	159.450	159.450	151.850	172.170	171.010	171.010	159.450	151.850	1620956388
212	225.650	197.420	225.960	197.420	236.320	197.420	236.320	197.420	197.420	195.790	195.790	2769979989
213	336.070	275.280	242.200	321.070	321.070	321.070	275.280	336.070	336.070	287.990	242.200	1600106450
214	223.540	237.440	252.440	250.870	250.870	223.540	252.440	223.540	223.540	252.440	223.540	3875416375
215	170.260	148.990	155.260	163.990	163.990	163.990	148.990	163.990	163.990	167.010	148.990	993100922
216	342.550	295.470	288.420	335.930	342.550	335.930	327.550	342.550	342.550	327.550	288.420	1466387493
217	281.230	279.350	266.040	300.010	278.890	300.010	266.040	279.350	279.350	291.680	266.040	3050607582
218	230.400	242.240	217.110	250.660	232.590	242.240	242.240	217.110	217.110	217.110	217.110	241306783
219	317.170	315.190	337.620	326.360	311.740	326.360	330.190	326.360	326.360	326.360	311.740	591150032
220	214.400	202.500	214.480	238.920	214.480	238.920	214.480	214.480	214.480	201.920	201.920	211576461
221	175.390	156.210	219.440	149.460	151.630	156.210	158.380	156.210	149.460	156.210	149.460	4286525534
222	245.620	264.940	220.800	337.610	235.800	360.930	276.340	235.800	235.800	245.620	220.800	3317966601
223	192.500	191.860	176.860	191.860	195.780	191.860	195.780	191.860	191.860	176.860	176.860	2826158374
224	223.750	251.330	243.330	322.540	246.190	322.540	246.190	251.330	242.590	242.590	223.750	436254791
225	253.930	240.320	237.220	248.260	275.490	248.260	300.950	240.320	240.320	237.340	237.220	883627400
226	166.900	152.330	145.850	152.690	151.900	151.900	145.850	166.900	166.900	151.900	145.850	2590948453
227	205.190	205.930	180.950	259.070	259.070	259.070	180.950	220.930	220.930	205.930	180.950	5723742
228	278.330	252.350	283.180	267.350	267.350	252.910	252.350	267.350	267.350	278.330	252.350	829465865
229	209.190	240.150	215.150	240.150	249.970	240.150	215.150	209.190	209.190	209.190	209.190	3994211436
230	122.640	122.640	122.640	122.640	122.640	122.640	122.640	122.640	122.640	122.640	122.640	2210211399
231	290.000	273.510	289.150	293.720	293.720	258.780	286.780	257.050	257.050	257.050	257.050	2111528568
232	243.490	264.140	245.750	279.140	232.490	279.140	309.000	241.060	241.060	217.790	217.790	2715686899
233	210.150	210.150	195.150	210.150	210.150	210.150	195.150	210.150	210.150	210.150	195.150	1849353312
234	207.730	183.890	197.770	184.040	198.780	184.040	207.730	222.690	222.690	184.340	183.890	1557933309
235	351.980	311.520	282.550	351.980	336.980	336.980	336.980	351.980	351.980	302.660	282.550	1928286812
236	222.360	221.840	207.360	262.690	248.210	258.180	243.180	221.840	222.360	222.360	207.360	2186757105
237	284.880	248.860	269.880	263.860	273.480	274.440	269.880	284.880	284.880	284.880	248.860	662297200
238	266.840	227.550	242.700	310.600	247.870	310.600	275.740	227.550	227.550	224.910	224.910	282664885
239	177.740	181.790	181.790	177.740	177.740	177.740	181.790	181.790	181.790	181.790	177.740	2195151192
240	292.150	271.730	276.420	301.860	301.860	301.860	286.860	282.760	282.760	262.010	262.010	1336636459
241	265.240	241.760	229.930	251.480	257.590	251.480	244.930	239.150	239.150	234.340	229.430	2255563914
242	234.290	194.790	194.790	194.790	194.790	234.290	216.200	192.560	192.560	192.560	192.560	1744700237
243	294.790	260.710	260.710	308.840	275.710	308.840	294.790	275.710	275.710	276.530	260.710	1095211108
244	164.370	174.310	149.370	168.300	162.660	168.300	172.690	174.310	174.310	174.310	149.370	101996431
245	142.010	142.010	142.010	142.010	142.010	142.010	142.010	142.010	142.010	142.010	142.010	234318240

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
246	282.540	255.060	288.650	327.270	324.550	338.020	357.870	266.080	266.080	271.860	255.060	115259939
247	215.830	215.830	223.490	215.830	215.830	215.830	215.830	215.830	215.830	215.830	215.830	733795112
248	282.420	259.300	290.820	312.270	277.580	327.270	314.980	279.840	279.840	299.660	259.300	2268324025
249	224.470	214.210	208.370	235.370	250.370	209.470	209.470	214.210	224.470	202.300	202.300	1190282614
250	271.100	299.260	312.020	307.340	307.120	307.340	314.980	271.100	289.610	274.970	271.100	787054585
251	269.640	260.060	283.340	260.060	260.060	260.060	283.340	260.060	260.060	263.760	260.060	4287364022
252	277.570	302.370	285.220	286.250	277.710	286.250	311.560	303.390	303.390	303.950	277.570	2344439081
253	200.970	161.360	177.810	199.870	194.180	178.130	161.960	161.960	161.960	161.960	161.360	1920188198
254	182.720	147.570	182.720	154.540	163.380	174.180	174.180	154.540	154.540	174.180	147.570	3952035179
255	380.060	371.810	371.810	380.060	394.430	400.280	400.280	368.100	368.100	380.060	368.100	1494620626
256	243.220	217.490	195.860	293.470	243.350	293.470	243.350	209.680	209.680	209.680	195.860	3782392245
257	168.030	162.470	204.170	162.470	204.170	162.470	204.170	162.470	162.470	162.470	162.470	4067934748
258	203.530	196.440	203.530	214.930	203.530	214.930	203.530	196.440	196.440	196.440	196.440	2320962887
259	129.900	143.250	129.900	157.420	129.900	142.420	129.070	157.420	157.420	142.420	129.070	3714182498
260	227.260	227.260	212.260	233.700	227.260	233.700	261.340	227.260	227.260	212.260	212.260	2097968193
261	337.260	337.260	337.260	337.260	337.260	337.260	356.240	337.260	337.260	337.260	337.260	3110200956
262	196.900	156.400	219.870	170.930	193.190	160.130	228.590	168.850	168.850	170.720	156.400	37663741
263	287.660	298.440	267.550	326.220	290.610	267.760	304.500	287.970	287.970	267.190	267.190	1382639848
264	383.130	393.910	372.340	436.100	383.130	436.100	395.690	383.130	383.130	370.790	370.790	2089554047
265	212.800	216.040	238.930	225.810	212.800	225.810	213.270	231.040	231.040	212.800	212.800	1790297054
266	365.710	335.950	334.010	345.980	379.350	345.980	365.890	349.790	349.790	362.530	334.010	3036109313
267	378.160	364.590	337.370	400.740	405.210	375.130	373.930	354.300	360.720	321.100	321.100	3669520424
268	221.670	211.090	221.670	235.200	226.680	233.340	211.030	226.090	226.090	206.670	206.670	2871608199
269	199.550	184.870	218.230	195.300	199.550	184.870	205.830	184.870	184.870	184.870	184.870	1129009314
270	207.420	197.560	221.690	207.420	207.420	229.020	209.690	205.500	205.500	192.230	192.230	2908512007
271	202.040	183.960	174.040	195.560	193.410	195.560	193.410	202.040	202.040	199.660	174.040	381705376
272	288.850	293.950	315.250	302.380	292.400	368.180	294.470	300.970	300.970	293.950	288.850	2220069391
273	260.950	255.390	256.460	290.450	260.950	290.450	291.220	255.390	255.390	249.440	249.440	369542536
274	239.920	225.530	237.290	237.900	232.450	311.170	271.270	225.160	225.160	237.290	225.160	4077999027
275	276.470	255.110	255.110	325.300	325.300	310.300	273.310	270.110	270.110	261.470	255.110	3981765406
276	247.260	241.080	232.260	245.920	247.260	245.920	232.260	247.260	247.260	230.920	230.920	2742336669
277	212.660	183.280	198.240	198.280	213.240	198.280	198.240	198.280	198.280	183.280	183.280	2127630084
278	365.930	325.300	327.460	341.010	340.300	326.830	326.940	341.320	341.320	325.300	325.300	2785827233
279	216.510	191.320	216.510	239.950	216.510	220.000	216.510	191.320	191.320	191.320	191.320	1217693570
280	243.450	227.560	215.820	240.550	251.670	243.810	258.250	238.680	238.680	228.450	215.820	1234827581

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques				Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON	MINIMUM	
281	148.740	159.790	152.070	157.170	159.790	157.170	148.740	157.170	157.170	157.170	148.740	1853363840
282	262.960	240.920	247.960	255.920	240.920	255.920	252.340	255.920	255.920	200.510	200.510	2525684109
283	153.660	139.540	144.920	154.540	154.540	139.540	139.540	154.540	154.540	139.540	139.540	3471598852
284	149.390	149.390	134.390	134.390	149.390	134.390	134.390	149.390	149.390	134.390	134.390	1725910539
285	154.710	141.080	139.710	157.230	154.710	157.230	177.650	156.080	156.080	156.080	139.710	423347000
286	186.940	157.080	181.710	196.750	196.750	181.750	181.710	186.940	186.940	162.410	157.080	2417545039
287	210.530	195.530	193.190	210.530	210.530	210.530	195.530	210.530	210.530	195.530	193.190	1276695134
288	178.200	178.200	178.200	178.200	178.200	178.200	178.200	178.200	178.200	178.200	178.200	1830824729
289	224.910	228.880	230.640	222.930	237.910	222.930	215.640	256.670	256.670	202.310	202.310	2841468042
290	255.030	218.650	215.880	270.970	240.350	270.970	225.350	233.650	233.650	233.650	215.880	2211508721
291	190.780	190.780	190.780	190.780	190.780	182.170	182.170	190.780	190.780	182.170	182.170	3283303590
292	174.910	174.910	166.070	172.280	191.570	172.280	194.150	174.910	174.910	172.280	166.070	1216694835
293	296.360	272.850	276.750	288.200	292.000	283.130	276.750	291.750	291.750	276.750	272.850	3277820346
294	166.760	166.760	175.580	166.760	166.760	166.760	175.580	166.760	166.760	166.760	166.760	678683693
295	255.560	229.270	272.040	255.560	259.480	283.120	272.040	247.300	247.300	247.300	229.270	4089913580
296	284.410	296.200	266.900	284.190	266.450	292.400	296.200	307.180	307.180	292.420	266.450	3608078757
297	185.970	183.260	185.830	183.260	183.260	183.260	183.260	183.400	183.400	183.260	183.260	1437010782
298	412.310	383.990	397.760	399.260	422.010	395.420	387.340	399.260	399.260	387.340	383.990	3857862153
299	276.840	308.550	291.810	271.490	271.490	288.230	319.600	274.190	274.190	304.800	271.490	3602945366
300	292.250	291.980	272.030	291.980	291.980	291.340	285.600	291.980	291.980	291.980	272.030	1008566829
Moyenne	249.749	243.159	243.466	257.012	251.273	257.788	256.782	246.606	246.767	239.418	230.017	
% min	13.0%	31.3%	30.7%	13.0%	12.7%	15.0%	14.3%	20.0%	18.7%	40.3%		

ANNEXE III: EXPÉRIMENTATION - CAS STOCHASTIQUE

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
1	370.948	382.692	375.989	427.208	377.688	445.884	423.748	375.595	374.061	367.126	367.126	337657440
2	207.594	213.036	198.472	193.265	190.132	208.259	212.593	207.312	207.312	193.146	190.132	3719904469
3	290.610	280.876	302.290	299.652	295.516	305.869	302.045	294.409	291.097	302.443	280.876	2944770130
4	161.783	154.289	153.997	154.289	154.497	154.289	154.289	154.289	154.289	154.289	153.997	3260368823
5	276.064	268.337	284.331	260.311	260.936	273.201	286.481	257.539	260.389	266.529	257.539	2577252962
6	205.427	193.995	205.566	201.963	215.029	193.995	201.106	193.995	195.046	197.267	193.995	904620645
7	299.973	310.014	354.413	305.199	286.686	320.683	356.561	296.961	302.860	296.957	286.686	605425520
8	323.327	301.171	310.927	325.731	316.544	329.335	324.027	298.508	304.193	300.937	298.508	4060545627
9	304.988	291.595	273.642	284.932	272.630	299.705	300.377	286.647	283.535	285.702	272.630	3532171000
10	196.399	197.590	198.995	201.441	195.526	203.789	203.043	195.558	194.761	199.076	194.761	2031410579
11	344.311	347.427	342.980	369.813	369.352	366.076	396.890	334.507	336.818	345.442	334.507	3163907068
12	300.087	284.106	305.916	288.842	286.214	311.599	329.716	289.990	291.700	317.486	284.106	3116810581
13	258.102	274.827	249.645	286.694	264.334	304.308	282.565	251.051	250.146	246.700	246.700	389682974
14	283.275	274.862	297.542	278.641	275.944	278.199	292.748	274.640	280.228	277.528	274.640	4043917977
15	352.348	374.512	391.436	386.723	360.043	387.185	394.487	364.612	365.591	368.767	352.348	2541188924
16	267.932	274.431	268.954	271.918	268.308	272.632	284.020	268.123	266.491	266.120	266.120	2479482781
17	276.334	263.820	270.377	266.269	268.663	267.332	273.304	262.853	263.284	265.203	262.853	397325416
18	221.642	228.736	224.762	225.175	222.835	225.199	223.190	223.565	220.610	217.686	217.686	2392501993
19	267.740	269.095	288.436	264.574	270.647	264.488	287.875	266.896	266.747	266.114	264.488	576808692
20	315.766	326.684	335.016	312.166	324.234	309.686	333.489	308.157	310.725	310.070	308.157	2627979415
21	351.990	321.469	325.260	351.840	328.763	351.840	335.465	329.146	330.381	334.513	321.469	1027135284
22	224.306	212.799	216.900	226.562	212.067	239.440	261.560	213.513	213.398	213.661	212.067	3501291335
23	251.962	246.526	247.970	254.992	273.938	255.170	248.446	242.000	241.482	238.524	238.524	2267403300
24	187.197	187.124	187.275	187.124	187.275	187.124	187.202	187.124	187.124	187.124	187.124	3399090311
25	234.902	236.088	243.961	245.071	250.034	224.965	232.610	231.272	234.024	232.228	224.965	3481746294
26	221.784	219.461	217.078	225.907	219.694	230.836	222.931	219.139	221.784	221.784	217.078	1014967305
27	444.368	435.564	509.922	466.350	460.082	453.807	499.968	439.431	437.016	461.277	435.564	4039439606
28	387.560	396.243	365.879	382.744	354.507	380.209	409.443	368.493	367.958	379.506	354.507	3374984741
29	238.878	241.857	233.372	244.957	245.031	244.957	245.353	239.093	239.994	242.555	233.372	2425139606
30	260.571	282.827	269.320	266.941	285.092	267.024	287.339	266.150	264.829	273.827	260.571	489219323
31	289.913	271.608	277.501	276.982	277.510	285.297	291.005	271.667	271.324	272.047	271.324	641221232
32	275.561	273.582	297.968	282.136	276.492	278.852	294.373	273.746	273.746	283.795	273.582	693079427
33	390.573	380.191	427.801	401.692	430.611	380.599	391.204	368.764	368.130	367.751	367.251	462800648
34	261.035	257.370	268.535	259.383	257.768	258.191	268.551	258.658	257.329	260.994	257.329	1354955509
35	226.559	228.526	228.195	227.206	228.172	227.319	227.690	227.352	226.840	227.326	226.559	883759886

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
36	236.859	237.136	222.742	233.153	238.564	233.153	237.920	231.925	230.313	230.310	222.742	966782821
37	309.823	311.184	311.161	319.410	311.984	357.976	354.517	308.178	307.870	316.550	307.870	646514550
38	191.211	169.306	194.386	173.627	194.868	170.723	170.641	170.126	170.914	170.042	169.306	2247020379
39	275.878	307.729	263.735	318.408	317.057	317.340	288.310	295.097	284.462	276.323	263.735	2547908244
40	279.522	234.003	273.994	283.002	271.819	283.002	276.882	229.157	230.162	235.556	229.157	309571443
41	170.529	162.122	178.039	162.862	162.132	164.975	169.466	162.122	162.122	162.122	162.122	1175215356
42	318.042	298.127	291.057	292.494	316.157	291.708	304.446	296.445	298.062	300.603	291.057	2944364593
43	342.473	366.565	338.124	364.574	363.888	365.552	365.341	340.185	341.212	339.770	338.124	845170948
44	242.905	244.365	238.490	244.430	240.738	246.664	246.021	240.800	241.524	239.358	238.490	827881329
45	223.026	215.331	216.706	223.470	222.527	223.470	216.056	215.430	215.984	219.096	215.331	3364465340
46	278.619	292.813	279.360	286.710	277.631	286.127	277.247	282.587	282.817	283.417	277.247	110600411
47	226.835	245.770	226.761	227.899	228.036	227.899	246.639	239.247	239.753	245.212	226.761	2029490682
48	170.689	169.221	170.709	169.221	170.689	169.221	169.221	169.221	169.221	169.221	169.221	3215461533
49	355.277	359.579	369.033	394.945	436.709	397.675	412.544	360.823	361.924	362.229	355.277	1024162766
50	152.103	149.254	152.241	152.954	151.231	154.845	152.246	148.887	148.887	148.983	148.887	1523841343
51	233.779	244.589	232.064	240.801	246.514	240.801	245.181	234.125	238.805	223.697	223.697	1144376844
52	188.878	193.561	196.994	182.415	188.977	190.379	195.776	182.415	182.415	182.415	182.415	1477243315
53	209.416	210.496	209.854	208.835	210.496	211.700	211.700	210.063	210.063	209.854	208.835	3085575054
54	281.920	290.829	281.421	289.633	281.514	289.677	286.483	283.049	283.277	285.706	281.421	111610581
55	241.446	260.241	241.242	243.847	235.817	241.018	242.667	243.042	237.698	235.425	235.425	359711912
56	438.606	475.352	439.232	444.807	435.085	454.904	466.321	465.072	464.877	455.345	435.085	258985699
57	166.282	163.780	167.156	163.877	164.810	163.780	191.794	164.001	164.302	163.780	163.780	1904505760
58	283.962	283.285	284.469	283.845	283.201	283.201	283.845	283.785	283.701	283.352	283.201	2729290787
59	298.886	290.037	308.781	290.037	290.249	290.037	300.569	290.037	290.003	290.003	290.003	4044201256
60	198.693	187.171	187.171	198.693	188.132	198.693	188.132	187.171	198.693	187.171	187.171	4269417145
61	227.504	233.366	229.991	231.054	229.406	230.645	226.676	230.182	226.458	227.826	226.458	4085003538
62	321.440	302.860	304.933	325.534	303.639	325.534	329.670	303.360	303.360	323.771	302.860	2788783885
63	415.078	406.094	429.040	401.510	421.912	402.773	425.722	393.543	393.543	395.816	393.543	1684054148
64	294.481	296.254	288.210	318.504	303.297	318.530	300.889	301.309	301.369	309.672	288.210	2532637219
65	266.423	273.627	247.211	293.059	253.121	305.540	285.215	270.082	262.658	259.285	247.211	1152041156
66	294.378	303.540	272.598	288.054	294.530	315.139	273.281	318.719	304.308	286.907	272.598	3360163383
67	226.505	225.708	221.906	225.230	222.951	225.230	225.763	225.282	225.282	229.446	221.906	3691562470
68	377.979	456.747	366.790	476.790	369.535	476.790	397.855	428.273	429.205	367.671	366.790	3334338585
69	223.886	221.287	226.357	251.512	244.477	225.934	233.687	220.979	220.991	221.083	220.979	1967324232
70	201.250	228.898	193.639	218.684	191.725	229.158	208.620	218.159	210.278	198.171	191.725	3126751503

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
71	329.764	332.557	317.966	336.148	335.422	335.864	333.139	305.357	305.357	300.927	300.927	150504152
72	196.460	192.226	203.506	188.932	217.372	189.110	192.879	192.257	194.539	193.958	188.932	1184255613
73	296.295	300.328	290.472	365.041	289.945	365.041	365.041	298.053	298.053	311.985	289.945	301757810
74	331.792	307.301	310.244	332.046	331.170	310.917	310.282	304.953	304.342	306.905	304.342	2433596921
75	316.621	326.049	308.864	298.843	309.798	298.843	333.501	306.248	300.920	312.057	298.843	574009218
76	310.168	330.370	306.350	311.065	297.079	330.370	315.976	295.335	294.744	298.337	294.744	1706967201
77	216.864	206.537	214.755	240.649	241.236	240.649	225.145	207.524	207.328	222.322	206.537	2121049358
78	271.603	260.804	261.103	259.876	260.048	279.346	269.352	272.204	272.204	288.604	259.876	789483167
79	246.205	317.936	245.773	303.350	278.794	303.128	278.794	276.466	267.326	255.283	245.773	3529573668
80	238.917	241.969	246.873	251.365	248.106	243.838	253.126	235.988	238.463	236.795	235.988	524689375
81	232.430	230.899	251.821	234.794	245.412	233.302	261.514	230.234	229.561	230.826	229.561	2648318348
82	374.949	373.544	380.723	410.069	399.153	389.826	376.581	367.153	373.608	386.503	367.153	3496548585
83	268.461	257.406	266.087	255.567	255.924	255.567	277.652	260.607	260.607	246.750	246.750	464034036
84	229.193	228.661	226.784	217.091	245.510	217.731	245.010	214.965	214.847	218.289	214.847	582865941
85	249.828	283.319	266.261	281.334	271.153	280.834	272.321	247.979	250.907	258.331	247.979	2577134274
86	325.253	328.488	337.540	334.789	339.930	349.736	338.601	329.296	329.296	318.739	318.739	2788427823
87	256.574	247.626	261.808	270.281	256.096	266.693	263.929	243.162	243.162	243.162	243.162	564632654
88	179.154	178.787	196.095	193.355	196.458	178.033	179.578	179.287	179.287	178.787	178.033	2766005645
89	247.942	254.508	251.315	245.791	247.093	255.792	256.641	251.845	248.754	244.484	244.484	4163545096
90	309.987	271.158	308.233	293.024	274.718	293.024	284.815	271.471	273.766	279.100	271.158	836790145
91	242.278	269.475	261.443	244.179	243.968	252.083	262.742	257.174	257.174	258.960	242.278	1302609386
92	326.928	315.184	319.367	317.685	315.318	328.333	320.590	318.602	314.079	315.596	314.076	15347895
93	305.069	303.937	373.390	291.832	293.557	291.839	366.172	292.327	290.706	305.653	290.706	88663872
94	282.900	314.452	293.895	323.959	325.071	323.459	343.596	279.528	273.540	278.449	273.540	2132271319
95	174.760	173.494	172.281	180.287	174.845	180.287	173.616	174.004	175.177	173.547	172.281	1951039170
96	240.529	254.700	239.091	257.698	251.620	257.460	247.085	239.453	241.991	250.710	239.091	1193336019
97	181.372	176.517	174.026	195.643	177.890	195.643	191.198	178.347	178.758	179.228	174.026	4111421376
98	301.685	290.410	269.914	297.726	269.135	277.149	276.080	299.875	299.875	299.875	269.135	1394352547
99	286.631	304.695	286.610	287.401	289.513	286.876	293.596	286.984	286.984	287.059	286.610	1193952660
100	217.852	205.498	204.845	218.565	219.009	218.565	204.834	204.834	204.834	204.834	204.834	3883877447
101	254.613	260.099	263.241	303.009	264.749	303.009	268.095	254.277	254.277	256.986	254.277	1580697802
102	289.407	283.335	271.794	270.562	274.249	282.303	296.177	282.741	280.166	276.297	270.562	2340842117
103	220.388	215.621	203.347	215.358	202.365	215.358	230.255	204.294	205.444	210.346	202.365	1915177382
104	195.974	217.989	191.450	223.921	196.976	264.173	262.099	204.511	205.706	204.511	191.450	2886643855
105	221.752	242.059	226.403	223.132	222.755	242.435	242.396	255.591	224.831	223.132	221.752	1187115116

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
106	257.906	268.853	261.288	271.766	257.647	271.766	265.755	277.953	282.622	269.956	257.647	2688846739
107	298.593	279.322	288.077	291.376	286.132	298.829	297.921	285.343	289.737	287.632	279.322	2110434914
108	420.843	435.878	432.851	431.786	460.431	439.054	482.572	397.475	405.561	399.128	397.475	2992563489
109	290.701	295.419	295.545	302.661	307.023	309.737	308.136	284.311	284.184	286.934	284.184	1957092208
110	384.594	385.576	398.613	433.127	417.786	424.564	424.776	390.207	390.787	404.289	384.594	975469757
111	280.465	283.052	293.310	285.228	286.791	287.398	288.434	275.420	275.273	281.065	275.273	1605118738
112	313.234	329.228	315.023	328.408	318.521	322.188	321.004	329.618	329.601	329.338	313.234	1233358343
113	183.390	176.889	182.872	176.889	179.642	176.889	184.093	174.593	174.593	182.890	174.593	1758584098
114	249.988	277.966	253.070	279.940	252.496	284.740	290.295	258.077	260.088	256.178	249.988	1601646187
115	271.010	274.479	274.398	276.064	275.798	274.015	268.986	276.921	278.553	272.682	268.986	958986316
116	242.199	228.203	234.381	238.127	235.356	237.853	239.277	228.248	228.269	225.565	225.565	2229212299
117	312.189	331.903	300.586	306.345	325.872	309.847	345.082	296.536	301.581	307.950	296.536	77655152
118	235.645	237.840	242.675	241.355	241.532	243.542	239.814	233.891	235.136	235.112	233.891	2910510139
119	276.473	281.072	276.215	275.804	282.540	273.091	284.366	273.799	275.293	272.889	272.889	2328767320
120	202.533	202.640	206.581	203.100	202.733	203.686	209.594	201.839	201.836	203.016	201.836	2211148781
121	261.104	256.630	271.471	265.722	271.565	254.593	266.282	250.286	250.227	250.169	250.169	4212774158
122	236.026	234.059	233.019	246.225	220.514	256.830	255.325	234.070	234.403	232.179	220.514	778873429
123	155.444	154.753	156.786	154.611	154.821	154.611	155.790	154.649	154.760	154.536	154.536	612286570
124	255.721	255.614	253.899	249.891	252.356	250.390	255.406	253.467	252.514	249.496	249.496	3971391835
125	413.025	491.790	427.916	420.023	407.649	456.285	431.148	443.033	442.876	423.471	407.649	195494474
126	299.242	298.576	321.389	332.084	296.111	332.084	303.032	293.182	293.839	293.728	293.182	2367660295
127	282.822	300.752	298.855	283.510	292.963	287.554	298.194	293.688	293.515	282.618	282.618	315198498
128	372.251	383.489	366.257	377.843	378.072	376.153	380.574	369.063	371.325	366.465	366.257	1924945993
129	246.089	246.095	249.066	265.847	257.741	270.401	275.687	236.781	236.838	238.587	236.781	3597726352
130	419.466	408.955	422.055	470.778	431.602	475.181	417.051	414.557	411.341	440.311	408.955	1653700655
131	259.515	267.890	254.988	280.619	271.971	284.165	282.368	257.478	257.317	257.712	254.988	173271394
132	258.378	257.185	264.796	263.248	268.927	263.883	270.463	258.071	256.312	256.129	256.129	1707870393
133	242.135	248.938	286.410	263.827	250.852	271.760	252.540	249.804	251.274	249.782	242.135	1350755166
134	367.049	424.253	371.389	397.108	373.964	397.039	394.127	372.389	371.542	388.325	367.049	2585698243
135	286.865	286.261	288.694	306.358	282.137	313.661	333.629	278.429	277.900	276.816	276.816	2120266114
136	286.534	285.327	287.274	306.661	292.515	308.189	296.792	279.417	280.951	284.991	279.417	1147845091
137	378.527	386.947	405.723	382.502	389.901	388.298	422.256	374.072	378.347	387.225	374.072	1190310122
138	344.163	341.630	332.602	330.632	338.230	352.800	361.739	341.489	342.819	360.531	330.632	109875387
139	178.261	180.372	178.746	181.104	176.304	180.739	184.827	180.872	180.872	177.087	176.304	3915801908
140	257.856	282.856	259.625	271.165	264.613	282.159	279.900	270.142	271.342	262.523	257.856	1939481857

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
141	187.600	175.819	177.858	228.406	201.453	228.406	224.676	172.042	173.625	172.901	172.042	341888214
142	295.882	300.298	297.113	302.706	305.874	312.934	305.837	290.231	296.389	296.079	290.231	2863411297
143	94.238	100.197	91.778	100.549	100.197	100.197	100.197	94.272	94.272	100.197	91.778	341900888
144	252.906	243.535	244.337	246.333	248.435	246.333	249.068	249.083	248.080	242.681	242.681	1785684351
145	221.958	224.081	218.566	225.188	218.087	225.746	218.441	227.607	227.032	225.993	218.087	1893010724
146	204.559	219.448	201.717	213.857	198.170	216.355	218.637	201.261	200.956	198.951	198.170	2960410591
147	260.560	259.412	307.811	249.186	278.477	248.223	302.227	253.982	253.228	246.323	246.323	4213964804
148	252.209	259.040	247.920	269.822	245.177	271.127	270.993	240.567	241.592	254.715	240.567	829353391
149	207.090	206.284	224.366	234.800	227.117	234.800	221.005	205.917	208.818	212.661	205.917	18426966
150	407.174	410.033	411.144	414.535	418.003	414.196	411.299	407.526	407.334	407.164	407.164	3021667219
151	314.021	305.192	309.467	306.873	306.295	309.922	338.623	305.692	305.412	309.462	305.192	3368949640
152	273.509	270.708	267.587	303.146	293.129	283.722	268.412	267.901	269.993	270.413	267.587	1605343641
153	197.883	183.383	188.597	198.015	196.703	196.533	188.211	183.679	183.679	187.918	183.383	4227995868
154	227.864	215.475	232.502	215.828	231.875	215.828	231.875	215.919	215.919	225.305	215.475	794906085
155	253.595	243.363	241.329	276.780	245.331	283.889	250.910	245.520	245.445	252.071	241.329	592684432
156	314.152	312.717	338.032	313.336	301.186	322.190	330.921	305.867	307.085	317.304	301.186	2510589805
157	246.042	240.807	241.718	240.911	240.992	247.370	250.787	241.938	241.662	243.235	240.807	3107103374
158	235.705	242.003	242.348	287.437	238.867	287.522	283.354	237.862	238.608	266.890	235.705	2241231805
159	262.550	261.884	264.201	270.472	265.192	279.232	296.237	261.939	264.385	254.093	254.093	3724425650
160	350.109	343.634	346.611	345.950	350.085	345.589	358.053	350.234	350.010	345.616	343.634	1744350725
161	181.352	195.620	184.881	193.357	194.701	196.250	199.293	180.331	182.401	191.746	180.331	2341035790
162	184.153	192.929	195.922	196.456	192.595	195.990	193.149	191.078	188.926	183.306	183.306	1675698867
163	301.472	301.107	315.463	318.769	307.196	306.759	311.994	298.405	298.107	300.960	298.107	312276168
164	281.400	294.037	268.800	297.883	280.212	298.391	299.924	280.555	283.488	284.569	268.800	2709024755
165	297.358	299.312	306.548	297.804	299.843	298.673	300.706	296.865	296.865	296.846	296.846	1473163368
166	239.339	237.051	241.678	238.640	244.235	238.824	238.305	236.953	236.364	239.683	236.364	572985323
167	313.637	316.352	325.139	321.920	312.618	322.326	340.541	317.902	318.000	319.537	312.618	4216491336
168	352.462	359.923	359.171	394.961	356.398	395.850	409.694	351.296	359.947	379.101	351.296	3369723619
169	235.799	235.645	239.224	244.548	249.483	244.486	244.778	234.494	238.695	239.285	234.494	3738648640
170	346.109	341.148	333.555	361.440	351.516	344.961	345.469	341.581	340.704	332.018	332.018	382179689
171	377.357	372.067	377.779	370.942	375.231	375.060	377.358	376.157	374.533	377.068	370.942	1908838436
172	236.774	236.488	233.987	236.822	240.716	236.532	233.176	236.488	235.841	236.488	233.176	3380893833
173	227.680	272.638	226.241	277.121	230.375	282.371	233.406	235.108	235.311	253.094	226.241	3671672274
174	251.385	254.913	244.566	250.840	251.022	250.840	243.465	256.303	255.640	250.890	243.465	2955634747
175	310.312	334.159	307.877	310.243	308.088	332.206	332.140	322.541	319.946	311.261	307.877	337192828

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK	MAXCON		
176	240.471	239.775	244.260	253.075	241.880	256.807	243.790	238.011	237.394	238.775	237.394	2070610173
177	257.007	253.460	262.313	252.517	252.373	254.763	265.078	252.097	252.712	258.694	252.097	241373504
178	301.705	304.588	295.604	317.097	290.177	330.242	328.597	293.944	301.400	292.118	290.177	205507231
179	203.261	231.168	200.123	249.057	213.917	248.657	244.372	206.747	207.823	214.416	200.123	2530394072
180	290.712	300.999	298.618	310.647	324.660	284.251	315.655	301.466	300.495	299.419	284.251	3742070331
181	364.728	379.660	354.705	373.172	366.371	382.758	387.307	349.943	354.791	359.217	349.943	1620065660
182	276.858	258.736	297.483	259.852	259.841	277.737	296.847	259.183	259.155	260.515	258.736	3826263665
183	290.911	265.795	307.210	269.266	298.804	269.641	324.297	264.130	266.536	263.818	263.818	867935476
184	241.975	235.479	241.895	237.207	238.366	239.801	242.741	236.208	237.148	236.516	235.479	2200548647
185	176.830	172.579	178.290	171.929	177.206	171.483	171.904	171.446	170.930	172.014	170.930	2003705078
186	215.159	213.691	213.055	241.447	214.058	242.373	246.180	215.016	214.046	209.081	209.081	3815130159
187	304.779	303.209	316.384	301.196	305.870	301.286	320.905	298.768	298.615	311.751	298.615	3034831648
188	281.343	291.686	279.229	295.269	282.651	295.269	282.299	279.794	282.990	281.088	279.229	735233535
189	212.682	216.227	213.232	225.092	217.417	227.137	224.811	211.997	214.658	212.856	211.997	95747858
190	310.672	320.664	317.059	320.633	308.824	320.769	319.706	313.858	311.142	305.076	305.076	964280209
191	208.678	208.517	234.867	214.221	234.867	208.517	208.733	208.517	208.517	208.517	208.517	1962774150
192	250.483	250.938	251.476	251.097	250.366	251.097	250.950	248.817	249.611	250.598	248.817	4046071255
193	252.496	249.014	250.914	248.717	249.173	249.923	257.022	250.009	251.480	247.662	247.662	1507372328
194	248.888	252.764	252.825	245.283	245.283	248.529	260.663	240.549	242.403	242.237	240.549	3600316805
195	209.837	212.820	212.778	207.802	210.781	209.052	211.226	210.209	209.573	210.259	207.802	2611764650
196	195.255	190.082	196.116	203.299	191.708	203.299	196.180	191.016	190.825	191.824	190.082	900457437
197	355.600	311.971	327.307	322.048	337.589	353.800	374.501	310.266	311.094	314.413	310.266	1195890680
198	328.332	350.762	335.961	335.546	324.383	331.580	356.333	330.376	328.144	326.375	324.383	1941607949
199	266.626	303.199	288.988	299.641	264.482	299.641	293.962	271.568	271.568	274.917	264.482	1808554998
200	394.592	352.415	396.112	342.856	364.648	346.195	402.859	349.055	344.603	365.551	342.856	1597589355
201	221.745	220.430	221.243	221.859	221.028	223.257	222.530	220.453	221.506	222.972	220.430	2416805102
202	239.158	239.180	239.302	239.153	243.969	239.307	243.354	238.182	238.122	237.009	237.009	3339426759
203	260.716	257.322	258.804	260.006	259.830	260.063	275.353	256.461	256.882	256.314	256.314	814939812
204	263.990	252.416	263.165	255.986	266.028	256.813	300.967	252.985	254.929	257.423	252.416	2617226791
205	217.158	213.609	217.666	213.609	216.755	217.135	221.749	214.797	214.439	214.439	213.609	607732214
206	408.160	413.910	409.161	414.731	436.667	416.372	435.687	396.614	403.837	409.625	396.614	2021775453
207	277.237	276.834	276.481	276.670	276.767	277.499	278.752	276.937	276.937	276.373	276.373	4059592758
208	381.383	402.845	391.809	400.031	381.466	400.031	381.501	381.920	381.801	382.761	381.383	1546910031
209	198.825	208.608	200.378	207.965	207.591	208.354	206.781	199.039	199.023	205.106	198.825	2882478772
210	201.532	210.766	193.070	231.692	201.610	238.000	229.007	210.192	205.231	200.741	193.070	1380622715

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
211	188.971	197.995	211.160	186.637	190.930	186.637	204.740	195.665	196.616	186.711	186.637	1620956388
212	214.429	209.904	236.125	210.020	216.351	209.904	216.765	210.020	210.225	219.421	209.904	2769979989
213	332.983	332.553	330.633	332.271	333.381	332.433	332.562	332.566	332.501	331.696	330.633	1600106450
214	227.634	250.408	232.378	229.733	228.962	231.523	255.707	235.830	234.452	234.452	227.634	3875416375
215	172.909	168.667	173.663	172.467	174.385	168.993	170.569	168.818	171.515	173.811	168.667	993100922
216	370.575	366.281	364.750	367.134	367.223	365.662	368.689	369.386	369.386	365.032	364.750	1466387493
217	276.259	263.547	267.136	275.801	271.459	276.064	284.113	259.821	263.291	271.364	259.821	3050607582
218	244.141	261.294	241.330	262.395	253.844	264.042	268.268	248.170	246.463	243.000	241.330	241306783
219	305.041	320.416	314.211	312.967	307.389	317.426	323.724	314.905	316.472	317.213	305.041	591150032
220	249.338	247.348	250.682	252.030	244.756	251.632	251.649	248.877	248.593	247.985	244.756	211576461
221	190.623	177.055	213.984	177.093	182.368	178.957	189.624	177.690	176.500	177.674	176.500	4286525534
222	239.680	269.783	244.421	317.996	237.074	343.111	295.485	242.290	243.892	247.285	237.074	3317966601
223	210.589	211.282	208.057	210.409	207.866	212.038	213.177	209.097	210.395	209.720	207.866	2826158374
224	301.599	281.218	283.349	336.035	328.659	336.035	317.308	286.495	292.989	275.395	275.395	436254791
225	266.604	273.912	261.983	276.188	271.730	277.052	275.586	266.578	270.410	266.706	261.983	883627400
226	169.122	171.132	165.164	171.008	170.789	171.008	169.170	171.212	170.638	170.646	165.164	2590948453
227	224.583	234.931	203.231	255.484	247.960	255.484	215.551	224.138	223.589	220.780	203.231	5723742
228	283.103	273.873	279.667	278.049	276.594	278.082	282.179	273.670	274.451	275.244	273.670	829465865
229	228.335	244.207	226.039	244.207	242.460	244.207	229.436	229.530	229.530	230.161	226.039	3994211436
230	138.573	138.573	138.672	138.573	138.672	138.573	138.672	138.573	138.573	138.573	138.573	2210211399
231	305.545	323.366	318.550	322.131	312.975	307.697	316.784	308.428	309.074	301.787	301.787	2111528568
232	260.962	254.344	245.105	264.169	246.388	264.341	267.064	245.981	248.063	246.485	245.105	2715686899
233	228.780	228.555	228.280	228.555	228.555	228.555	228.055	228.555	228.780	228.055	228.055	1849353312
234	213.522	220.387	215.100	204.641	205.124	204.933	221.247	213.388	207.469	209.034	204.641	1557933309
235	340.277	337.587	339.276	340.081	340.443	340.211	338.282	339.553	339.557	339.462	337.587	1928286812
236	232.944	226.960	226.164	236.861	236.949	246.365	246.303	226.638	226.656	226.656	226.164	2186757105
237	291.277	278.883	293.380	282.433	289.725	291.847	303.553	290.044	290.426	287.541	278.883	662297200
238	284.398	282.851	267.690	322.799	276.749	330.241	348.945	265.288	266.379	271.680	265.288	282664885
239	191.927	191.120	191.921	190.562	190.901	190.562	191.357	191.123	191.389	191.389	190.562	2195151192
240	305.874	309.290	304.558	312.388	301.379	314.698	315.818	310.605	309.075	299.193	299.193	1336636459
241	271.364	255.684	257.844	267.213	276.500	267.024	262.546	255.400	255.775	266.113	255.400	2255563914
242	222.994	218.483	219.926	225.242	227.029	253.897	236.924	221.101	223.742	221.101	218.483	1744700237
243	295.303	285.601	293.011	307.014	286.602	307.014	309.700	285.831	287.622	288.383	285.601	1095211108
244	170.658	178.785	169.699	180.255	177.464	180.255	179.445	178.785	180.073	178.058	169.699	101996431
245	170.137	164.060	167.407	164.034	170.739	164.118	170.803	163.897	163.995	163.897	163.897	234318240

PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK	MAXCON		
246	301.283	287.271	302.690	338.300	300.416	346.103	311.918	290.138	290.041	293.314	287.271	115259939
247	233.658	226.997	231.285	235.094	236.321	237.749	268.052	226.497	226.831	231.263	226.497	733795112
248	287.373	291.908	290.353	312.267	288.346	312.315	337.724	292.617	293.090	293.072	287.373	2268324025
249	254.896	227.695	236.273	254.468	254.419	234.278	228.766	227.710	230.610	228.545	227.695	1190282614
250	316.622	327.216	317.093	348.706	326.935	346.860	324.548	326.749	318.514	309.855	309.855	787054585
251	290.002	282.375	298.692	284.632	281.087	284.579	297.902	282.695	283.215	287.301	281.087	4287364022
252	317.747	327.844	319.547	333.196	310.240	331.839	345.739	314.611	314.252	330.355	310.240	2344439081
253	202.723	183.486	191.326	215.950	209.455	201.961	206.602	181.575	184.376	180.427	180.427	1920188198
254	184.515	179.870	193.446	180.867	181.447	193.189	193.189	180.195	180.531	192.530	179.870	3952035179
255	400.349	403.309	402.341	415.797	419.876	426.927	431.271	392.460	393.861	404.634	392.460	1494620626
256	273.234	260.414	241.804	312.519	298.142	312.519	304.149	258.059	256.612	258.145	241.804	3782392245
257	166.943	166.758	196.708	166.758	171.327	166.758	171.327	166.775	166.805	166.758	166.758	4067934748
258	242.609	244.977	241.256	268.316	253.913	268.316	238.787	244.815	244.457	247.913	238.787	2320962887
259	163.117	166.193	160.647	166.869	166.801	166.513	166.311	163.407	163.198	166.330	160.647	3714182498
260	258.989	261.008	258.686	263.904	259.505	263.863	269.810	258.909	258.889	258.389	258.389	2097968193
261	318.689	320.863	320.239	318.973	320.341	322.107	347.602	318.770	319.451	319.503	318.689	3110200956
262	184.008	179.959	212.352	182.876	187.552	181.229	187.833	179.390	180.881	180.757	179.390	37663741
263	292.753	309.654	288.531	313.036	302.280	314.844	324.752	313.455	310.310	289.611	288.531	1382639848
264	405.546	412.988	399.964	444.559	421.628	444.437	404.419	405.050	406.611	406.337	399.964	2089554047
265	239.419	240.341	252.863	240.304	245.231	240.341	255.290	239.068	240.184	237.098	237.098	1790297054
266	355.238	357.688	354.272	359.716	351.010	364.898	365.827	359.190	359.225	352.617	351.010	3036109313
267	396.572	388.854	394.176	401.062	393.650	397.821	395.718	381.311	381.005	388.777	381.005	3669520424
268	221.038	237.577	221.642	235.034	232.697	239.502	247.812	232.781	229.673	213.427	213.427	2871608199
269	230.830	222.580	240.071	224.888	228.525	222.580	244.346	222.229	222.778	222.580	222.229	1129009314
270	241.205	238.448	243.208	245.254	245.059	248.514	245.318	239.690	238.433	237.089	237.089	2908512007
271	198.995	217.761	198.790	215.962	200.089	215.962	199.589	214.530	212.863	210.584	198.790	381705376
272	327.087	322.275	337.335	339.433	339.038	371.569	373.019	321.363	324.127	324.031	321.363	2220069391
273	294.459	280.973	289.380	316.232	306.440	320.303	301.035	279.351	278.651	279.471	278.651	369542536
274	267.912	276.846	268.977	282.639	306.565	324.373	316.438	262.734	263.170	267.932	262.734	4077999027
275	299.153	299.271	299.139	334.938	301.277	334.938	337.454	296.862	298.393	320.538	296.862	3981765406
276	274.256	274.985	276.800	273.987	274.974	273.987	280.174	273.117	273.950	274.959	273.117	2742336669
277	202.246	202.608	204.053	201.964	201.955	202.206	202.478	202.206	202.206	201.706	201.706	2127630084
278	379.107	355.017	354.195	371.761	369.184	371.288	357.309	352.076	351.945	353.152	351.945	2785827233
279	228.933	221.452	218.038	235.566	235.719	225.025	227.593	224.151	223.834	229.963	218.038	1217693570
280	267.892	267.178	262.271	271.970	272.608	274.687	279.813	262.539	265.401	267.454	262.271	1234827581

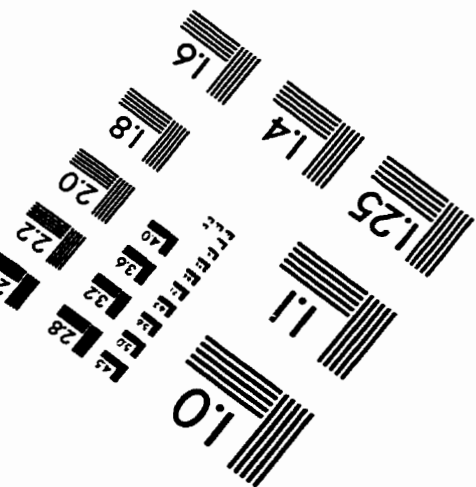
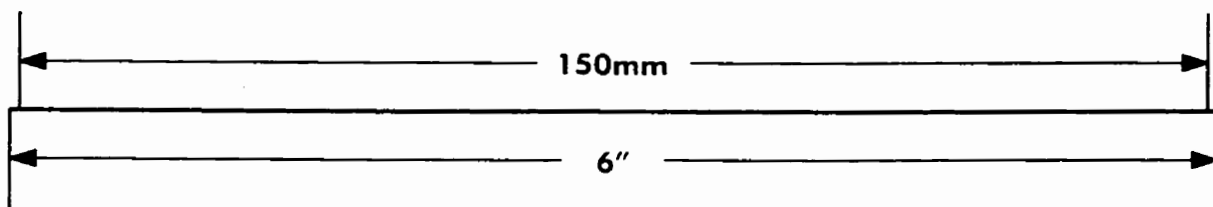
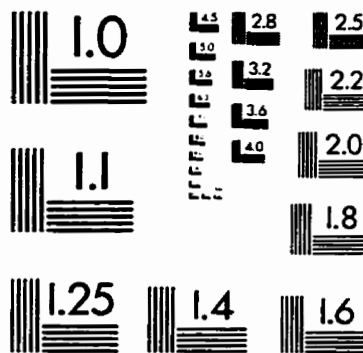
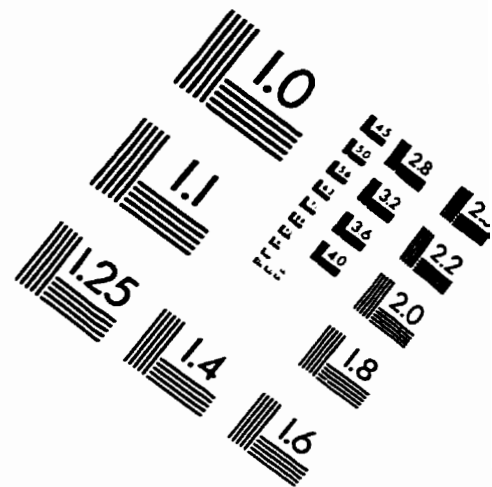
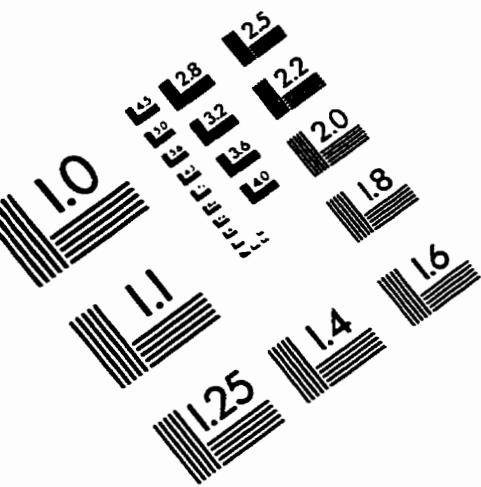
PROJET	Règles statiques							Règles dynamiques			MINIMUM	Germe initial
	MINES	MINSLK	MINDUR	ACTRES	GRD	MAXDUR	SRD	MINLS	MINSLK-	MAXCON		
281	183.111	183.627	185.055	183.056	184.346	183.189	186.076	181.339	181.667	182.961	181.339	1853363840
282	276.775	276.330	286.422	276.676	276.841	278.772	285.337	276.580	276.663	274.527	274.527	2525684109
283	165.034	162.966	160.576	167.375	163.394	167.375	163.435	162.966	163.135	163.000	160.576	3471598852
284	152.723	152.328	152.223	152.391	152.221	152.391	152.223	152.328	152.328	152.328	152.221	1725910539
285	161.774	159.646	161.817	170.605	161.903	170.605	177.228	159.981	159.981	161.308	159.646	423347000
286	202.416	196.989	204.132	208.605	200.937	211.484	204.726	202.416	202.020	199.808	196.989	2417545039
287	201.778	202.119	200.359	204.186	200.856	204.186	200.356	203.853	203.826	203.326	200.356	1276695134
288	214.155	226.944	215.687	220.987	223.700	220.908	223.543	213.193	213.699	213.699	213.193	1830824729
289	230.008	242.143	238.054	234.325	248.733	233.621	233.750	245.276	245.276	236.588	230.008	2841468042
290	240.785	220.908	227.537	252.734	239.913	252.734	239.913	220.594	227.530	221.163	220.594	2211508721
291	215.186	215.646	215.999	220.390	218.275	219.127	216.912	214.639	214.639	214.521	214.521	3283303590
292	193.463	184.331	192.808	190.444	193.041	190.380	226.349	184.402	184.164	187.269	184.164	1216694835
293	305.049	296.398	297.200	304.490	306.710	304.738	303.678	298.412	300.619	299.463	296.398	3277820346
294	180.537	176.611	183.752	176.420	176.420	180.537	183.752	176.420	176.420	176.420	176.420	678683693
295	254.484	258.817	267.401	250.696	249.061	260.832	263.352	250.731	251.207	248.980	248.980	4089913580
296	308.617	307.755	306.209	297.750	300.430	306.920	308.506	306.400	311.249	309.251	297.750	3608078757
297	195.043	196.774	196.682	196.807	202.473	196.807	195.726	195.774	193.532	197.852	193.532	1437010782
298	390.450	384.225	403.334	398.519	407.434	391.248	388.651	393.973	394.139	396.347	384.225	3857862153
299	286.985	315.868	308.132	290.925	290.819	303.807	315.104	289.081	292.678	289.790	286.985	3602945366
300	298.215	310.674	307.000	300.209	298.013	315.288	313.443	297.757	299.368	299.366	297.757	1008566829
Moyenne	264.901	266.684	266.345	272.268	267.410	274.462	276.701	261.675	261.885	262.646	256.827	
% min	7.3%	15.0%	17.0%	5.7%	10.0%	5.0%	2.7%	21.3%	13.0%	20.7%		

ANNEXE IV: DESCRIPTION DU CAS PRATIQUE

ACTIVITES	DESCRIPTION	DUREE
ARR	Arrivé et préparation de l'aéronef	12.00
DEC	Décapage sélectif de la structure	41.00
DEMA1	Démontage et inspection de l'aile gauche	UNIFO(50.05,70.05)
DEMA2	Démontage et inspection de l'aile droite	UNIFO(50.05,70.05)
REPA	Amélioration du longeron de la cloison A	NORM(34.66,13.49)
ASSA1	Assemblage et installation de l'aile gauche	82.50
ASSA2	Assemblage et installation de l'aile droite	82.50
REPB	Renforcement de la cloison B	EXPON(44.03)
DEMC1	Démontage de la structure gauche de la cloison	TRIAN(2.00,3.00,4.00)
DEMC2	Démontage de la structure droite de la cloison	TRIAN(2.00,3.00,4.00)
DEMC3	Démontage du gabarit A	EXPON(6.52)
REPC	Réparation du gabarit A	TRIAN(30.20,35.74,46.05)
ASSC1	Assemblage de la structure gauche de la cloison	6.00
ASSC2	Assemblage de la structure gauche de la cloison	6.00
DEMD1	Démontage de la valve de contrôle	NORML(2.00,0.40)
REPD	Réparation de la conduite d'admission d'air	NORML(26.0,4.31)
ASSD1	Installation de la valve de contrôle	2.00
DEME1	Démontage de la conduite d'air	EXPON(5.00)
REPE	Réparation de la plate-forme dorsale	EXPON(9.50)
ASSE1	Installation de la conduite d'air	10.00
DEMF1	Démontage des échangeurs de chaleur	14.00
REPF	Réparation du gabarit B	NORM(80.69,15.34)
ASSF1	Assemblage des échangeurs de chaleur	20.00
DEMG1	Démontage du panneau de direction	UNIFO(8.50,12.50)
DEMG2	Démontage et inspection du réservoir A	83.00
REPG	Remplacement du support angulaire	UNIFO(10.00,24.00)
ASSG1	Assemblage et installation du réservoir A	13.50
ASSG2	Assemblage et installation du panneau de direction	14.00
DEMH1	Démontage de la structure principale	22.00
ASSH1	Assemblage de la structure principale	3.00
DEMH2	Réparation du gabarit C	22.00
ASSH2	Assemblage de la structure gauche	3.00
DEMI1	Démontage de la porte A	EXPON(6.50)
DEMI2	Démontage du mécanisme de montée	EXPON(9.50)
REPI	Réparation du croisillon du train principal	UNIFO(140.30,180.30)
ASSI1	Assemblage et installation du mécanisme de montée	11.50
ASSI2	Installation de la porte A	10.50
DEMK1	Démontage et inspection du support de moteur	EXPON(12.00)
REPK1	Modification du support structural avant	TRIAN(100.70,234.87)
REPK2	Modification du support structural arrière	EXPON(46.91)

ASSK1	Installation du support structural avant	16.00
ASSK2	Installation du support structural arriere	16.00
ASSK3	Installation du support du moteur	2.00
TESA	Tests fonctionnels	163.00
PEI	Retouche de peinture et finition	96.00
TESB	Test d'envol	38.00

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc.
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

