

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M.Ing.

PAR
Moussa BAGAYOKO

STRATÉGIE DE MAINTENANCE OPTIMALE DU PARC DE LOCOMOTIVES DE
TRANSRAIL

MONTREAL, LE 24 AOÛT 2009

© Moussa BAGAYOKO

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ali Gharbi, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Robert Pellerin, codirecteur de mémoire
Département de mathématiques et de génie industriel à l'École polytechnique

M. Victor Songmene, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Adnène Hajji, examinateur externe
Département de mathématiques et de génie industriel à l'École polytechnique

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 17 AOÛT 2009

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie mon directeur de recherche Dr Ali Gharbi et mon co-directeur Dr Robert Pellerin pour leur bonne collaboration tout au long de ce travail de recherche. De même, je remercie Dr Victor Songmene, président du jury et Dr Adnène Hajji, examinateur externe d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Ensuite, je remercie tous les professeurs qui ont eu à m'encadrer et qui ont bien voulu me transmettre une partie de leur savoir.

Puis, je remercie infiniment mon père Sinsé Bagayoko, ma mère Fanta Traoré, mon épouse Fatoumata Kanté et toute ma famille pour leur appui et leurs judicieux conseils. Aussi, je remercie tous mes parents, amis et collègues que je ne pourrais citer nommément ici.

Enfin, je dédie ce mémoire à ma très chère mère Fanta Traoré et à mon défunt grand-père et homonyme Moussa Traoré.

STRATÉGIE DE MAINTENANCE OPTIMALE DU PARC DE LOCOMOTIVES DE TRANSRAIL

Moussa Sinsé BAGAYOKO

RÉSUMÉ

Transrail est la société qui exploite présentement les chemins de fer entre Dakar (au Sénégal) et Bamako (au Mali) une voie métrique longue de 1 288 kilomètres. Deux des particularités des systèmes de transport sont l'impossibilité de constituer un inventaire de voyages et la perte d'une partie ou de la totalité du temps de production consacré aux voyages durant lesquels l'outil de production tombe en panne avant d'arriver à destination: ce qui rend l'implantation d'une stratégie de maintenance d'autant plus importante dans ce cas. Il faut alors maintenir la disponibilité des engins de transport autour d'une valeur suffisante pour permettre au système de transport de répondre de manière satisfaisante à la demande.

La problématique abordée par ce mémoire est l'intégration de la disponibilité de deux ressources de maintenance importantes que sont les équipements de rechange et les équipes de maintenances, ainsi que la prise en compte dans le modèle de maintenance préventive de plusieurs opérations d'importances différentes.

Dans le but d'avoir des modèles de maintenance reflétant mieux la réalité par l'élimination de certaines hypothèses simplificatrices, ce mémoire utilise la simulation, la planification et l'analyse statistique d'expérience pour l'optimisation des stratégies de maintenance.

Particulièrement, ce mémoire vise à trouver la stratégie de maintenance optimale pour le parc de locomotives de Transrail, en déterminant le type de stratégie de maintenance et les valeurs optimales des facteurs dont dépendent les mesures de performance. Dans un premier temps, les deux mesures de performance sont la disponibilité moyenne annuelle et le coût moyen annuel de maintenance et dans un deuxième temps, la mesure est la désirabilité globale obtenue en donnant différents poids à chacune de ces deux premières mesures. Pour ce faire, les quatre stratégies de maintenance retenues sont : la stratégie de maintenance de type âge, la stratégie de maintenance de type bloc, la stratégie de maintenance de type bloc étendu et une quatrième stratégie de maintenance obtenue en intégrant la disponibilité du personnel de maintenance à la stratégie de maintenance de type âge. Ainsi, pour chacune de ces quatre stratégies de maintenance les valeurs optimales de ses variables de décision et les valeurs optimales correspondantes des performances sont déterminées. Enfin, la stratégie de maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance donnant les meilleures valeurs de ces dernières a été retenue comme la meilleure, suivie de la stratégie de maintenance de type âge en deuxième place, de celle de type bloc étendu en troisième place et enfin de stratégie de maintenance de type bloc en dernier.

Mots-clés : stratégies de maintenance, optimisation multicritère, simulation, personnel de maintenance, optimisation conjointe.

OPTIMUM MAINTENANCE STRATEGY OF TRANSRAIL ENGINES PARK'S

Moussa Sinsé BAGAYOKO

ABSTRACT

Transrail is the company which exploits at present the railroads between Dakar (in Senegal) and Bamako (in Mali) a 1 288 kilometers long metric gauge track. Two of the characteristics of the transport systems are the impossibility of constituting an inventory of voyages and the loss of a part or totality of the time of production devoted to the voyages during which the production equipment breaks down before arriving at destination; that return the maintenance strategy implantation more important in this case. It is then necessary to maintain the transport engines availability around a sufficient value that permits the transport system to answer the request satisfactorily.

The problems approached by this memory are the integration of the availability of two important resources of maintenance that are the equipments of replacement and the teams of maintenances, as well as the taking into account in the model of preventive maintenance several operations of different importance.

With an aim of having models of maintenance reflecting better reality by the elimination of certain important simplifying assumptions, this memory jointly uses the simulation, the planning and the statistical analysis of experiment for the optimization of maintenance strategies.

Particularly, this memory aims at finding the optimum maintenance strategy of Transrail Engines Park's, by determining the type of maintenance strategy and the optimal values of the factors for whose depend performance measurements. Initially the two performance measurements are the annual average availability and the annual average cost of maintenance and in the second time the performance measurement is the global desirability obtained by giving various weights to each one of these first two measurements. With this intention, the four maintenance strategies selected are: the age replacement strategy, the block replacement strategy, the extended block replacement strategy and a fourth maintenance strategy obtained by integrating the availability of teams of maintenance into the age replacement strategy. Thus, for each one of these four maintenance strategies the optimal values of its decision variables and the corresponding optimal values of the answer variables are given. Lastly, the age type maintenance strategy combining with the availability of the personnel of maintenance giving the best values of these last was regarded as the best maintenance strategy, followed by the age type maintenance strategy in second place, that of block extended type in third place and finally the block type maintenance strategy in the last.

Keywords : maintenance strategies, multi-objective optimization, simulation, personnel of maintenance, joint optimization.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 MISE EN SITUATION	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Présentation de Transrail.....	3
1.3 Description de la maintenance du parc de locomotives de Transrail.....	4
1.4 Démarche de collecte et de validation des données de la maintenance des locomotives de Transrail.....	9
1.5 Étude de la maintenance du parc de locomotives de Transrail.....	10
1.6 Problématique	11
1.7 Définition du système à étudier et question de recherche.....	11
1.8 Démarche	12
1.9 Conclusion	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE, ÉVALUATION ET CRITIQUE DES MODÈLES EXISTANTS.....	13
2.1 Introduction.....	13
2.2 Stratégie de maintenance de type âge	13
2.3 Stratégie de maintenance de type bloc.....	15
2.4 Stratégie de maintenance de type bloc étendu	17
2.5 Autres stratégies de maintenance.....	19
2.5.1 La stratégie de remplacement périodique avec réparation minimale.....	19
2.5.2 La stratégie de remplacement périodique avec période d'inactivité.....	20
2.5.3 La stratégie de maintenance imparfaite	20
2.5.4 La stratégie de maintenance préventive séquentielle.....	20
2.6 Applicabilité des modèles existants et approche de résolution proposée	21
2.7 Approche de résolution	22
2.8 Conclusion	23
CHAPITRE 3 STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE.....	24
3.1 Introduction.....	24
3.2 Modélisation de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge.....	24
3.2.1 Modélisation du niveau macro de la maintenance de type âge.....	24
3.2.2 Modélisation du niveau micro de la maintenance.....	26
3.3 Régime permanent, intervalles de confiance et validation du modèle de la maintenance des locomotives	27
3.3.1 Régime permanent et intervalles de confiance du modèle du niveau macro de la maintenance.....	28
3.3.2 Régime permanent et intervalles de confiance du modèle du niveau micro de la maintenance	31
3.3.3 Validation du modèle globale de la maintenance des locomotives	33

3.4	Optimisation conjointe multicritère de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge.....	36
3.4.1	Désirabilité et optimisation multicritère	36
3.4.2	Optimisation conjointe multicritère du niveau macro de la maintenance de type âge	37
3.4.3	Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type âge	43
3.5	Analyse de sensibilité des modèles de la maintenance des locomotives	47
3.5.1	Analyse de sensibilité du modèle du niveau macro de la maintenance	47
3.5.2	Analyse de sensibilité du modèle du niveau micro de la maintenance	51
3.6	Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type âge avec trois équipes	55
3.7	Conclusion	58
CHAPITRE 4 STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE CONJUGUANT AVEC LA DISPONIBILITÉ DU PERSONNEL DE MAINTENANCE		60
4.1	Introduction.....	60
4.2	Définition de la stratégie de maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance (ARP-PA)	60
4.3	Modélisation du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance	61
4.4	Optimisation conjointe multicritère de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance	63
4.4.1	Optimisation conjointe multicritère du niveau macro de la maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance.....	63
4.4.2	Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance avec trois équipes.....	68
4.5	Conclusion	71
CHAPITRE 5 STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC		73
5.1	Introduction.....	73
5.2	Modélisation du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc	73
5.3	Optimisation conjointe multicritère de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc	75
5.3.1	Optimisation conjointe multicritère du niveau macro de la maintenance de type bloc.....	75
5.3.2	Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type bloc avec trois équipes	80
5.4	Conclusion	83
CHAPITRE 6 STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC ÉTENDU		85
6.1	Introduction.....	85
6.2	Modélisation du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc étendu.....	85

6.3	Optimisation conjointe multicritère de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc étendu.....	87
6.3.1	Optimisation conjointe multicritère du niveau macro de la maintenance de type bloc étendu	87
6.3.2	Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type bloc étendu avec trois équipes.....	93
6.4	Conclusion	96
	CONCLUSION.....	97
	RECOMMANDATIONS	100
ANNEXE I	ORGANIGRAMME DE TRANSRAIL	101
ANNEXE II	COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNÉES DE LA MAINTENANCE DU PARC DE LOCOMOTIVES DE TRANSRAIL ET ESTIMATION DES PARAMÈTRES	104
ANNEXE III	MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MACRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE.....	113
ANNEXE IV	MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MICRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE.....	115
ANNEXE V	MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MACRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE CONJUGUANT AVEC LA DISPONIBILITÉ DU PERSONNEL DE MAINTENANCE ...	119
ANNEXE VI	MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MICRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE CONJUGUANT AVEC LA DISPONIBILITÉ DU PERSONNEL DE MAINTENANCE ...	121
ANNEXE VII	MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MACRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC	123
ANNEXE VIII	MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MICRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC	125
ANNEXE IX	MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MACRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC ÉTENDU	127
ANNEXE X	MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MICRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC ÉTENDU	130
	BIBLIOGRAPHIE.....	132

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 3.1	Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour le niveau macro	28
Tableau 3.2	Intervalle de confiance pour la disponibilité moyenne du niveau macro ..	29
Tableau 3.3	Intervalle de confiance pour le coût moyen du niveau macro	30
Tableau 3.4	Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour le niveau micro.....	31
Tableau 3.5	Intervalle de confiance pour la disponibilité moyenne du niveau micro...	32
Tableau 3.6	Intervalle de confiance pour le coût moyen du niveau micro	33
Tableau 3.7	Comparaison des valeurs réelles avec les résultats de la méthode expérimentale intégrant les équipements de rechange et le personnel de maintenance.....	34
Tableau 3.8	Comparaison des valeurs réelles avec les résultats de la méthode expérimentale n'intégrant ni les équipements de rechange, ni le personnel de maintenance	34
Tableau 3.9	Comparaison des valeurs réelles avec les résultats de la méthode expérimentale intégrant seulement les équipements de rechange.....	35
Tableau 3.10	Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau macro d'ARP	38
Tableau 3.11	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP	39
Tableau 3.12	Analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'ARP	41
Tableau 3.13	Optimisation multicritère du niveau macro d'ARP	42
Tableau 3.14	Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau micro ..	43
Tableau 3.15	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP	44
Tableau 3.16	Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP	45
Tableau 3.17	Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP	45

Tableau 3.18	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois	47
Tableau 3.19	Effets de la modification des durées de maintenance préventive	48
Tableau 3.20	Effets de la modification des durées de maintenance corrective	48
Tableau 3.21	Effets de la modification des coûts de commande	49
Tableau 3.22	Effets de la modification des coûts d'achat d'équipements	50
Tableau 3.23	Synthèse de l'analyse de sensibilité du niveau macro d'ARP	51
Tableau 3.24	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de visite de deux à trois	51
Tableau 3.25	Effets de la modification des durées des visites	52
Tableau 3.26	Effets de la modification du coût de commande	53
Tableau 3.27	Effets de la modification du coût d'achat d'équipements	54
Tableau 3.28	Synthèse de l'analyse de sensibilité du niveau micro	55
Tableau 3.29	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP avec trois équipes	56
Tableau 3.30	Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP avec trois équipes	56
Tableau 3.31	Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP avec trois équipes	57
Tableau 4.1	Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau macro d'ARP-PA	63
Tableau 4.2	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP-PA	64
Tableau 4.3	Analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'ARP-PA	65
Tableau 4.4	Optimisation multicritère du niveau macro d'ARP-PA	66
Tableau 4.5	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois	67
Tableau 4.6	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes	69

Tableau 4.7	Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes.....	69
Tableau 4.8	Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes	70
Tableau 5.1	Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau macro de BRP	75
Tableau 5.2	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro de BRP	76
Tableau 5.3	Analyse de la variance du coût moyen du niveau macro de BRP	77
Tableau 5.4	Optimisation multicritère du niveau macro de BRP.....	78
Tableau 5.5	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois	79
Tableau 5.6	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro de BRP	81
Tableau 5.7	Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro de BRP	81
Tableau 5.8	Optimisation multicritère du niveau micro de BRP avec trois équipes	82
Tableau 6.1	Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau macro d'EBRP	87
Tableau 6.2	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'EBRP	88
Tableau 6.3	Analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'EBRP	89
Tableau 6.4	Optimisation multicritère du niveau macro d'EBRP	90
Tableau 6.5	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois	92
Tableau 6.6	Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'EBRP avec trois équipes.....	93
Tableau 6.7	Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'EBRP avec trois équipes	94
Tableau 6.8	Optimisation multicritère du niveau micro d'EBRP avec trois équipes	94

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1	La structure du mémoire.	2
Figure 1.1	Cycle des visites (niveau micro de la maintenance des locomotives).	5
Figure 1.2	Cycle des révisions (niveau macro de la maintenance des locomotives).	5
Figure 1.3	Imbrication des niveaux micro et macro de la maintenance des locomotives.	7
Figure 2.1	Schéma de la stratégie de maintenance de type âge.	14
Figure 2.2	Schéma de la stratégie de maintenance de type bloc.	16
Figure 2.3	Schéma de la stratégie de maintenance de type bloc étendu.	18
Figure 3.1	Logigramme du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge.	25
Figure 3.2	Logigramme du niveau micro de la maintenance des locomotives.	27
Figure 3.3	Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour la disponibilité moyenne du niveau macro.	29
Figure 3.4	Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour le coût moyen du niveau macro.	30
Figure 3.5	Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour la disponibilité moyenne du niveau micro.	32
Figure 3.6	Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour le coût moyen du niveau micro.	33
Figure 3.7	Graphique des résidus sur échelle de probabilité normale pour la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP.	40
Figure 3.8	Graphique des résidus versus valeurs prédites pour la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP.	40
Figure 3.9	Optimisation multicritère du niveau macro d'ARP.	43
Figure 3.10	Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP.	46

Figure 3.11	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois.	47
Figure 3.12	Effets de la modification des durées de maintenance préventive.	48
Figure 3.13	Effets de la modification des durées de maintenance corrective.	49
Figure 3.14	Effets de la modification des coûts de commande.	50
Figure 3.15	Effets de la modification des coûts d'achat d'équipements.	50
Figure 3.16	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de visite de deux à trois.	52
Figure 3.17	Effets de la modification des durées des visites.	53
Figure 3.18	Effets de la modification du coût de commande.	53
Figure 3.19	Effets de la modification du coût d'achat d'équipements.	54
Figure 3.20	Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP avec trois équipes.	58
Figure 4.1	Logigramme du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance.	62
Figure 4.2	Optimisation multicritère du niveau macro d'ARP-PA.	67
Figure 4.3	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois.	68
Figure 4.4	Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes.	71
Figure 5.1	Logigramme du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc.	74
Figure 5.2	Optimisation multicritère du niveau macro de BRP.	79
Figure 5.3	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois.	80
Figure 5.4	Optimisation multicritère du niveau micro de BRP avec trois équipes.	83
Figure 6.1	Logigramme du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc étendu.	86
Figure 6.2	Optimisation multicritère du niveau macro d'EBRP.	91

Figure 6.3	Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois.	92
Figure 6.4	Optimisation multicritère du niveau micro d'EBRP avec trois équipes. ...	96

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AgeD	Âge actuel de la locomotive
ARP	Stratégie de maintenance de type âge
ARP-PA	Stratégie de maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance
AugRevM	Augmentation du revenu moyen annuel net de Transrail
BRP	Stratégie de maintenance de type bloc
CapMag	Capacité du magasin de stockage des équipements complémentaires pour révision intermédiaire
CDPM	Coefficient de la zone de vérification de la disponibilité du personnel de maintenance
CoûtM	Coût moyen annuel de maintenance du parc de locomotives de Transrail
CoûtVoy	Coût moyen d'un voyage
CPD	Coefficient du point de décision
CtAECRG	Coût d'achat d'un équipement complémentaire neuf pour révision générale
CtAECRI	Coût d'achat d'un équipement complémentaire neuf pour révision intermédiaire
CtAEV	Coût d'achat d'un équipement neuf pour visite complète ou visite générale
CtAVoy	Coût d'achèvement d'un voyage suite à une panne de locomotive
CtCRG	Coût de commande d'un lot d'équipements complémentaires pour révision générale
CtCRI	Coût de commande d'un lot d'équipements complémentaires pour révision intermédiaire
CtCV	Coût de commande d'un lot d'équipements pour visite complète ou visite générale
CtICRG	Coût d'inventaire de l'équipement complémentaire pour révision générale

CtICRI	Coût d'inventaire de l'équipement complémentaire pour révision intermédiaire
CtIV	Coût d'inventaire de l'équipement pour visite complète ou visite générale
CtJRev	Coût journalier de la main-d'œuvre pour une opération de révision en tenant compte des heures supplémentaires
CtJRevR	Coût journalier de la main-d'œuvre pour une opération de révision pour les heures régulières
CtJVis	Coût journalier de la main-d'œuvre pour une opération de visite en tenant compte des heures supplémentaires
CtJVisR	Coût journalier de la main-d'œuvre pour une opération de visite pour les heures régulières
CtMOCur	Coût de main-d'œuvre de la maintenance corrective
CtMOPrev	Coût de main-d'œuvre de la maintenance préventive
CtMt	Coût de maintenance
CtOuAmR	Coût d'outillage et de construction d'un espace de travail convenable pour une équipe de révision
CtOuAmV	Coût d'outillage et de construction d'un espace de travail convenable pour une équipe de visite
CtPPanne	Coût des pièces connexes endommagées suite à une panne
DCoût	Désirabilité du coût moyen annuel de maintenance du parc de locomotives de Transrail
DDisp	Désirabilité de la disponibilité moyenne annuelle du parc de locomotives de Transrail
DeIm	Moment de début d'immobilisation
DeLiv	Délai de livraison d'une commande d'équipements neufs
DGlob	Désirabilité globale
DIm	Durée d'immobilisation
Disp	Disponibilité du parc de locomotives de Transrail

DispM	Disponibilité moyenne annuelle du parc de locomotives de Transrail
DMtCur	Durée de la maintenance corrective
DMtPrev	Durée de la maintenance préventive
DRetAP	Durée du retour de la locomotive après la panne
DRG	Durée de la révision générale préventive
DRGC	Durée de la révision générale corrective
DRI	Durée de la révision intermédiaire préventive
DRICN	Durée de la révision intermédiaire corrective avec un équipement complémentaire neuf
DRICU	Durée de la révision intermédiaire corrective avec un équipement complémentaire usagé
DurVoy	Durée moyenne d'un voyage
DVC	Durée de la visite complète
DVG	Durée de la visite générale
DVL	Durée de la visite limitée
EBRP	Stratégie de maintenance de type bloc étendu
EcCoûtM	Écart entre le coût moyen annuel de maintenance réel et celui donné par la simulation
EcDispM	Écart entre la disponibilité moyenne annuelle réelle et celle donnée par la simulation
EmCRG	Équipement complémentaire pour révision générale
EmCRI	Équipement complémentaire pour révision intermédiaire
EmV	Équipement pour visite complète ou visite générale
ER	Équipe de révision
ER1	Première équipe de révision

ER2	Deuxième équipe de révision
EV	Équipe de visite
EV1	Première équipe de visite
EV2	Deuxième équipe de visite
FinIm	Moment de fin d'immobilisation
GrR	Groupe des équipes de révision
GrV	Groupe des équipes de visite
Indic	Indicateur du moment de maintenance préventive
MDec	Moment de décision
MDemont	Moment de démontage
MMont	Moment de montage
MPanne	Moment de la panne
MRev	Moment de la révision
MVis	Moment de la visite
NbAnSim	Nombre d'années à simuler
NbLocD	Nombre actuel de locomotives de Transrail
NIm	Nombre d'immobilisations
NivR	Niveau de la révision
NivV	Niveau de la visite
Ordre	Ordre de l'essai
PCRG	Point de commande de l'équipement complémentaire pour révision générale
PCRI	Point de commande de l'équipement complémentaire pour révision intermédiaire

PCV	Point de commande de l'équipement pour visite complète ou visite générale
PD	Point de décision
PEU	Passage de l'équipement complémentaire pour révision intermédiaire avec de l'usagé
PL	Passage de la locomotive
PosICRG	Position d'inventaire de l'équipement complémentaire pour révision générale
PosICRI	Position d'inventaire de l'équipement complémentaire pour révision intermédiaire
PosIV	Position d'inventaire de l'équipement pour visite complète ou visite générale
QCRG	Quantité commandée de l'équipement complémentaire pour révision générale
QCRI	Quantité commandée de l'équipement complémentaire pour révision intermédiaire
QCV	Quantité commandée de l'équipement pour visite complète ou visite générale
RevM	Revenu moyen annuel net de Transrail
RevVEU	Revenu de la vente de l'équipement usagé
RevVoy	Revenu moyen d'un voyage
RG	Révision générale
RI	Révision intermédiaire
RRG	Ressources de révision générale
RRI	Ressources de révision intermédiaire avec du neuf
RRICU	Ressources de révision intermédiaire corrective avec de l'usagé
RSTNUtil	Ratio de la somme des temps restants d'équipements complémentaires usagés pour révision intermédiaire
RV	Ressources de visite

RvVEUCRG	Revenu de la vente d'un équipement complémentaire usagé pour révision générale
RvVEUCRI	Revenu de la vente d'un équipement complémentaire usagé pour révision intermédiaire
SDeblm	Somme des moments de début d'immobilisation
STNUtil	Somme des temps restants d'équipements complémentaires usagés pour révision intermédiaire
TAtEV	Temps d'attente d'une équipe de visite
TAtRG	Temps d'attente des ressources de révision générale
TAtRI	Temps d'attente des ressources de révision intermédiaire avec du neuf
TAtRICU	Temps d'attente des ressources de révision intermédiaire corrective avec de l'usagé
TAtRV	Temps d'attente des ressources de visite
TAvPanne	Temps restant avant la panne
TAvVis	Temps restant avant la visite
TE	Temps écoulé
TIm	Temps total d'immobilisation
TImCour	Temps total des immobilisations en cours
TIndisp	Temps total d'indisponibilité
TNUtil	Temps restant de l'équipement complémentaire usagé pour révision intermédiaire
TPanne	Durée écoulée entre la fin de la dernière révision et le moment où la locomotive tombe en panne
TRef	Temps de référence
TRev	Temps entre deux révisions

TRMinSU	Temps restant minimal pour le stockage d'un équipement complémentaire usagé pour révision intermédiaire
TSim	Horizon considéré correspondant à la durée restante de la concession globale de Transrail (temps à simuler en régime permanent)
TTotal	Temps total
TUtil	Temps utilisé de l'équipement complémentaire usagé pour révision intermédiaire
TVis	Temps entre deux visites
VC	Visite complète
VG	Visite générale
VL	Visite limitée
w1	Poids de la désirabilité de la disponibilité moyenne annuelle
w2	Poids de la désirabilité du coût moyen annuel de maintenance
ZDPM	Zone de vérification de la disponibilité du personnel de maintenance

INTRODUCTION

Transrail, la société qui exploite présentement les chemins de fer entre Dakar (au Sénégal) et Bamako (au Mali) rencontre actuellement certaines difficultés dans la maintenance de son parc de locomotives. Notamment, la reprise de la planification de la maintenance suite à chaque panne de locomotive et souvent l'arrêt prolongé d'une locomotive en attente pour une opération de révision à cause de la longue durée des opérations de révision et/ou de l'indisponibilité des deux équipes de révision et/ou des équipements nécessaires.

Ce mémoire traite d'une manière générale l'intégration des deux contraintes de ressources que sont les équipements de rechange et les équipes de maintenance dans l'optimisation des stratégies de maintenance en utilisant conjointement la simulation, la planification et l'analyse statistique d'expérience. Dans le cas particulier auquel on s'intéresse, il s'agit de procéder à l'optimisation de la stratégie de maintenance du parc de locomotives de Transrail. La compétitivité créée par le bitumage de la route Dakar-Bamako impose à Transrail une amélioration de ses performances pour livrer les marchandises dans un délai de livraison concurrentiel et respecter le plus possible les délais de livraison prévus, tout en gardant des prix concurrentiels. Afin d'atteindre cet objectif, la stratégie de maintenance préventive doit être optimisée.

Plus précisément, le but de notre travail de recherche est de trouver le meilleur compromis entre la maximisation de la disponibilité moyenne annuelle et la minimisation du coût moyen annuel de maintenance. L'optimisation numérique, les fonctions de désirabilité et les surfaces de réponse seront utilisées pour faire cette optimisation. Après une revue des différentes stratégies de maintenance existantes, on effectuera ces différentes étapes pour quatre stratégies de maintenance : la stratégie de maintenance de type âge, la stratégie de maintenance de type bloc, la stratégie de maintenance de type bloc étendu et une quatrième stratégie de maintenance obtenue en intégrant la disponibilité du personnel de maintenance à la stratégie de maintenance de type âge.

On utilisera le langage flexible Visual SLAM et AweSim pour modéliser ces quatre stratégies de maintenance et faire nos simulations puis le logiciel STATGRAPHICS pour faire nos planifications et analyses statistiques d'expériences. La figure 1 ci-dessous présente la structure du mémoire.

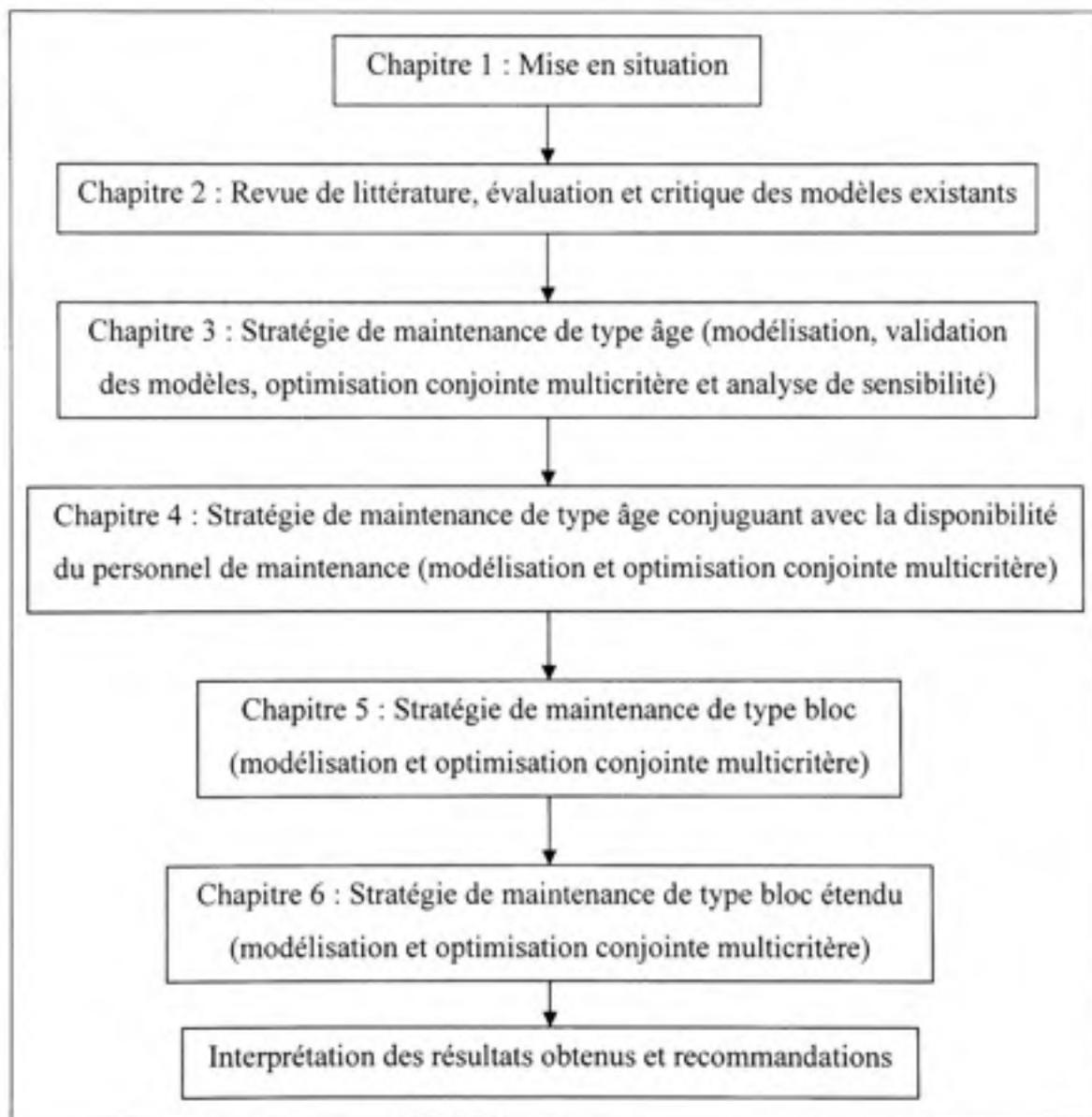


Figure 1 La structure du mémoire.

CHAPITRE 1

MISE EN SITUATION

1.1 Introduction

Ce premier chapitre vise d'abord à faire la présentation de Transrail; ensuite on fera une description de la maintenance de son parc de locomotives tout en parlant de la collecte de données et on exposera une étude de cette maintenance. Puis, on précisera la problématique de recherche et on définira le système à étudier ainsi que la question de recherche; enfin on expliquera la démarche de résolution.

1.2 Présentation de Transrail

Née de la concession globale de la Régie des chemins de fer du Mali et de la Société nationale de chemins de fer du Sénégal, Transrail S.A. est la société canadienne de droit malien qui exploite depuis le 1^{er} octobre 2003 la ligne de chemins de fer entre Bamako et Dakar, une voie métrique longue de 1 288 kilomètres. Le capital de Transrail S.A est de 22 750 000 dollar (9 100 000 000 de francs CFA). La durée de la concession globale est de 25 ans (donc une durée restante de 20ans) et Transrail fait essentiellement du transport de marchandises. Le transport de voyageurs étant laissé aux deux états que sont le Mali et le Sénégal.

Transrail S.A. dispose de deux ateliers centraux, le moins important à Bamako s'occupant des opérations de visite et le plus important à Thiès (à 70 kilomètres de Dakar) s'occupant des opérations de révision. En plus de ces deux ateliers centraux, la société dispose de dépôts aux différentes gares principales où l'on répare les pannes mineures en cours de trajet. Chacune des deux équipes de visite de Bamako est composée de 20 agents de différentes catégories et chacune des deux équipes de révision de Thiès est composée de 40 agents de différentes catégories.

La structure organisationnelle de Transrail S.A. est composée d'un conseil d'administration édictant la stratégie de la société à partir des objectifs fixés et de neuf directions, soient :

1. La direction générale s'occupant des questions stratégiques et de l'exécution de la stratégie édictée par le conseil d'administration;
2. La direction financière et comptable s'occupant de la tenue de la comptabilité et de l'élaboration des états financiers;
3. La direction commerciale s'occupant de toutes les dimensions vente et marketing;
4. La direction de l'exploitation s'occupant du plan de transport et des mouvements de trains;
5. La direction des ressources humaines s'occupant de la gestion des ressources humaines, de la formation et des problèmes administratifs;
6. La direction des installations fixes s'occupant de la voie ferrée et des ouvrages d'art;
7. La direction du matériel roulant s'occupant de la maintenance des locomotives et du matériel remorqué;
8. La direction des approvisionnements et des magasins s'occupant de l'approvisionnement en matériel roulant et équipements de rechange, ainsi que de la gestion des stocks d'équipements de rechange;
9. La direction de l'audit et du contrôle interne veillant au bon respect des règles de la société à tous les niveaux.

Ces neuf directions comprennent 27 services et unités opérationnelles, ainsi que quatre chargés de mission. L'organigramme présenté à l'annexe 1 donne plus de détail sur la structure organisationnelle de Transrail S.A.

1.3 Description de la maintenance du parc de locomotives de Transrail

La flotte de Transrail S.A. est composée présentement de 27 locomotives et le cycle de maintenance préventive systématique d'une locomotive comprend trois niveaux d'opérations de moyenne importance appelées «visites» faites à Bamako et deux niveaux d'opérations de grande importance appelées «révisions» effectuées à Thiès (au Sénégal). Le cycle de

maintenance préventive systématique d'une locomotive (voir figure 1.1 et figure 1.2) se présente ainsi :

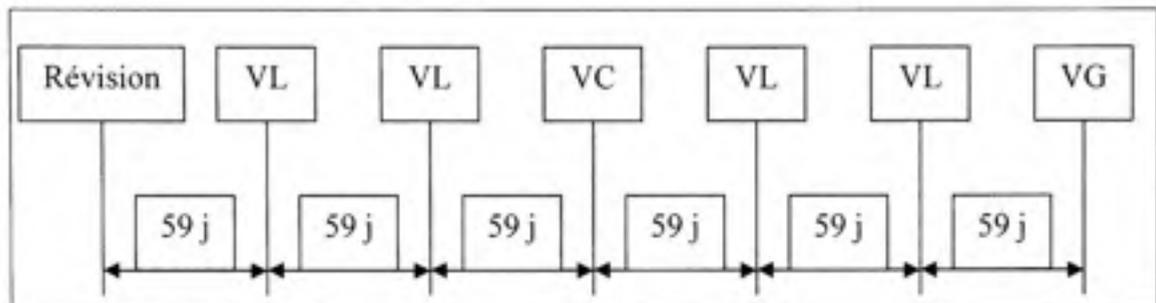


Figure 1.1 Cycle des visites (niveau micro de la maintenance des locomotives).

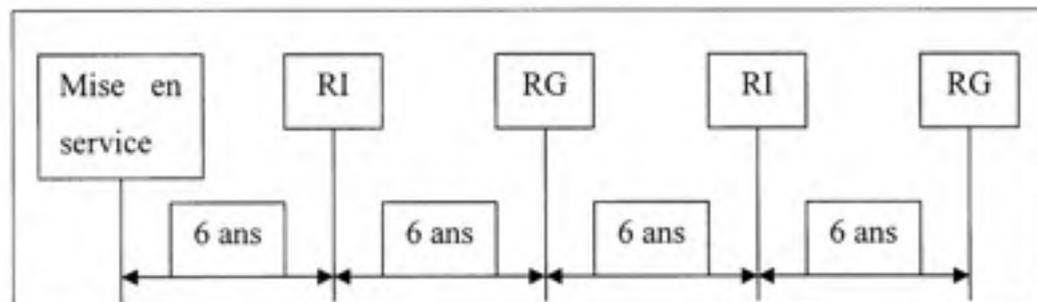


Figure 1.2 Cycle des révisions (niveau macro de la maintenance des locomotives).

1. La visite limitée (VL) : Elle consiste à effectuer l'inspection, la lubrification et le graissage de la locomotive. La visite limitée est effectuée chaque 59 jours et dure en moyenne 14 heures de travail.
2. La visite complète (VC) : Elle consiste à effectuer l'inspection, la lubrification et le graissage de la locomotive ainsi que le remplacement des balais du moteur de traction, des ampoules, des projecteurs, des joints et des éléments filtrants. La visite complète est effectuée après deux opérations de visite limitée succédant à une visite générale ou une révision et dure en moyenne 24 heures de travail.

3. La visite générale (VG) : Elle consiste à effectuer l'inspection profonde, la lubrification et le graissage de la locomotive ainsi que le remplacement des balais du moteur de traction, des ampoules, des projecteurs, des joints et des éléments filtrants. La visite générale est effectuée après deux opérations de visite limitée succédant à une visite complète et dure en moyenne 25 heures de travail.
4. La révision intermédiaire (RI) : Elle consiste à effectuer l'inspection profonde, la lubrification et le graissage de la locomotive ainsi que le remplacement d'un nombre important de pièces issues des parties électriques, mécaniques, thermiques et pneumatiques de la locomotive. La révision intermédiaire est effectuée six ans après la mise en service de la locomotive et ensuite à chaque 12 ans; ainsi qu'après une panne importante de la locomotive lorsque la prochaine opération de révision préventive est une révision intermédiaire. Elle dure en moyenne 360 heures de travail quand elle est effectuée de manière préventive.
5. La révision générale (RG) : Elle consiste à effectuer la réhabilitation de l'alternateur et la réhabilitation du moteur diesel ainsi que le remplacement d'autres pièces issues des parties électriques, mécaniques et pneumatiques de la locomotive. Lors de la révision générale, on fait aussi la tôlerie de la locomotive si cela est nécessaire et la peinture des parties ainsi réparées. La révision générale est effectuée 12 ans après la mise en service de la locomotive et ensuite à chaque 12 ans; ainsi qu'après une panne importante de la locomotive lorsque la prochaine opération de révision préventive est une révision générale. Elle dure en moyenne 480 heures de travail quand elle est effectuée de manière préventive.

Ces différentes opérations de visite et de révision sont imbriquées (voir figure 1.3) et sont effectuées respectivement par deux équipes de visite et deux équipes de révision. On a décidé de séparer les opérations bimensuelles à savoir les visites et les opérations pluriannuelles à savoir les révisions pour faciliter la compréhension, diminuer les bruits et clarifier les effets de chacune des variables de décision.

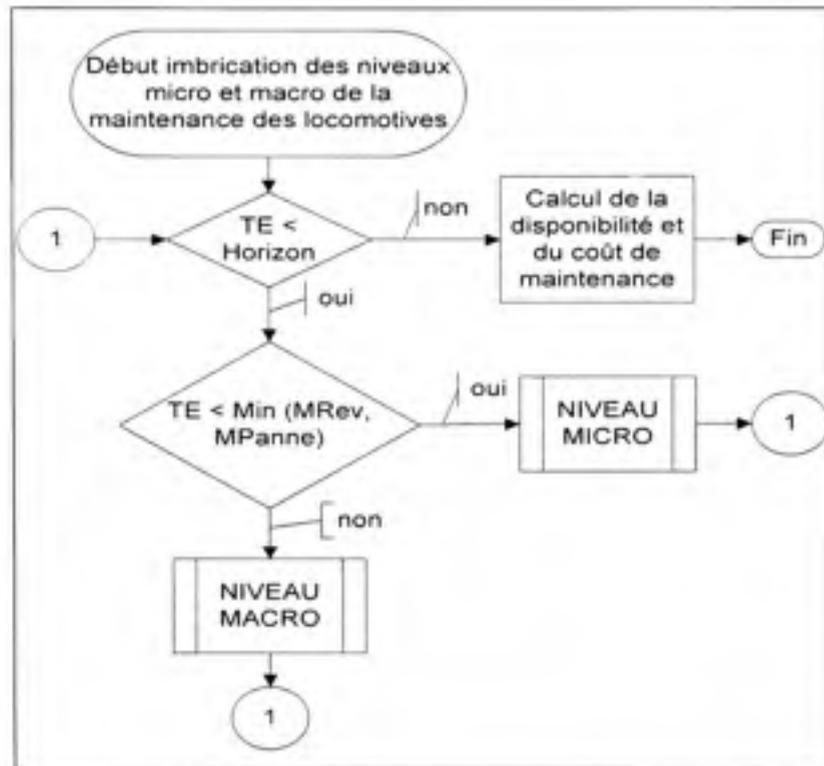


Figure 1.3 Imbrication des niveaux micro et macro de la maintenance des locomotives.

Ensuite en vérifiant l'atteinte du régime permanent, on a constaté que le modèle des visites entre en régime permanent à partir de deux fois la durée de l'horizon prévu; alors qu'il faut attendre jusqu'à six fois cette durée pour voir le modèle des révisions entrer en régime permanent. Ainsi pour la suite, on appellera l'ensemble des opérations de visite «niveau micro» et l'ensemble des opérations de révision «niveau macro» et ces deux niveaux seront séparés. L'imbrication des niveaux micro et macro de la maintenance des locomotives fait que lorsqu'on effectue une opération de niveau macro suite à une panne ou de manière préventive, le cycle du niveau micro est interrompu et un nouveau cycle commence après cette opération. En plus, une opération de niveau micro et une opération de niveau macro ne peuvent pas être effectuées simultanément sur la même locomotive. Ainsi un output du niveau macro, en l'occurrence sa périodicité (T_{Revopt}) et un de ses inputs à savoir sa distribution de probabilité de panne (T_{Panne}) deviennent des inputs du niveau micro.

Les autres informations importantes dont on doit tenir compte sont :

1. L'horaire de travail des équipes de visite et de révision : du lundi au jeudi de sept heures à 16 heures avec une pause de 12 heures à 12 heures 30 minutes et le vendredi de sept heures à 12 heures. Ce qui donne, du lundi au jeudi huit heures 30 minutes et le vendredi cinq heures de travail; soit un total de 39 heures de travail par semaine.
2. Si une opération de maintenance est en cours sur une locomotive à la descente le vendredi après-midi ou si le samedi matin à sept heures une locomotive doit être en attente pour une opération de maintenance, alors l'équipe en charge de ladite locomotive effectuerait le samedi un maximum de huit heures 30 minutes d'heures supplémentaires de sept heures à 16 heures avec une pause de 12 heures à 12 heures 30 minutes.
3. Pour chaque locomotive, les dates des opérations de maintenance déjà effectuées ainsi que les dates prévues pour les prochaines opérations de maintenance sont consignées dans son carnet de bord.
4. Le train n'est anormalement immobilisé que lorsque la locomotive tombe en panne; si c'est un matériel remorqué qui tombe en panne, il est réparé ou enlevé de la rame au prochain dépôt. Un agent est sur le train pour constater l'état du matériel tout au long du voyage.
5. Lorsqu'une locomotive tombe en panne sur le tronçon Dakar-Thiès, si une locomotive est disponible à Dakar et si le voyage est Dakar-Bamako, alors cette dernière fait quatre heures de nouveaux préliminaires (vérification et test du système freinage, pesée des plateformes et autres vérifications) puis quatre heures pour amener la locomotive en panne à Thiès et continuer avec le voyage victime de la panne. Sinon, si le voyage est Bamako-Dakar elle fait en moyenne quatre heures pour amener le train en panne à Dakar puis quatre heures pour amener la locomotive en panne à Thiès et continuer avec son propre voyage. Si aucune locomotive n'est disponible à Dakar, alors il faudra attendre au plus huit heures pour en avoir une. Cette opération n'engendre pas de coût

supplémentaire significatif car la distance Dakar-Thiès ne faisant que 70 kilomètres, l'opération ne provoquera qu'une légère diminution de la vitesse sur ce tronçon. Par contre, si la panne est arrivée sur le tronçon Bamako-Thiès alors la locomotive en panne est amenée à l'atelier de Thiès par le premier train qui quitte Bamako après la panne si l'information est reçue au moins deux heures avant son départ; sinon c'est le deuxième quittant huit heures après le premier qui le fera. On aura préalablement enlevé quatre conteneurs de la rame du train secoureur libérant ainsi une charge équivalente à la charge de la locomotive. En outre, une locomotive quitte Bamako ou Dakar dépendamment du trajet le plus court pour aller achever le voyage des matériels remorqués interrompu suite à la panne.

1.4 Démarche de collecte et de validation des données de la maintenance des locomotives de Transrail

Lors de la collecte des données de la maintenance du parc de locomotives de Transrail, on s'est principalement adressé au service du matériel roulant au Mali de la direction du matériel roulant de Transrail. On a alors collecté les données dont on a eu besoin en complétant la recherche documentaire par des entrevues avec le personnel de maintenance et les autres responsables de la société. Concernant la recherche documentaire, on a utilisé Doannio, A. D. A. H. et Pona, B. (1996), la documentation technique du constructeur «General Motor» accompagnant les locomotives, les carnets de bord des locomotives, la cédule de maintenance préventive systématique d'une locomotive (avec le détail des travaux effectués aux cours de chaque opération de maintenance), les rapports d'activités mensuelles du matériel moteur et plusieurs autres documents de la société.

On a dû calculer certaines données qui n'étaient pas directement disponibles et mettre de la fluctuation dans d'autres qui le nécessitaient alors que les agents de Transrail ont juste donné pour ces paramètres des valeurs approximatives sur la base de leur expérience et des réalités auxquelles sont confrontées le personnel de maintenance. Pour finir, on a validé les données en les soumettant à l'approbation du responsable de maintenance. Les données de la maintenance du parc de locomotives de Transrail sont présentées à l'annexe 2.

1.5 Étude de la maintenance du parc de locomotives de Transrail

En étudiant la maintenance du parc de locomotives de Transrail on a fait les constats suivants :

1. Les locomotives sont relativement vieilles. Leur âge varie entre 19 et 38 ans alors que l'âge d'amortissement d'une locomotive se situe aux alentours de 30 ans et Transrail n'a pas les moyens de renouveler dans un proche délai lesdites locomotives.
2. Les conditions climatiques, particulièrement la température dont la maximale journalière varie entre 30 et 48 degrés Celsius, contribuent à rendre les pannes des locomotives plus fréquentes.
3. La quasi-totalité des équipements de rechange est commandée à l'extérieur et le délai de livraison d'une commande varie entre 36 et 45 semaines.
4. Une équipe de visite ou de révision et les équipements nécessaires ne sont pas toujours disponibles lorsqu'une locomotive arrive à l'atelier pour une opération de visite ou une opération de révision.
5. La stratégie de maintenance préventive systématique de type âge actuellement appliquée par Transrail et caractérisée par les valeurs des paramètres données ci-dessous donne un revenu net (revenu des voyages - coût des voyages - coût de maintenance) de 68 236 000 dollars soit 27 294 400 000 FCFA, un coût de maintenance moyen annuel de 1 350 000 dollars soit 540 000 000 F CFA et une disponibilité moyenne annuelle de 0,8970 qui est insuffisante pour satisfaire la demande.

Les valeurs actuelles des paramètres sont : TRev = 6 ans (soit 2190 jours), PCRI = 4, QCRI = 4, PCRG = 3, QCRG = 3, PCV = 50 et QCV = 50.

1.6 Problématique

Les premiers modèles existant sur les stratégies de maintenance ne prennent pas en compte la disponibilité de la ressource de maintenance que sont les équipements de rechange et les modèles récents tenant compte de cette ressource ne prennent pas en compte la disponibilité de la ressource de maintenance que sont les équipes de maintenance en supposant que les durées d'exécution des maintenances préventive et corrective sont négligeables; ce qui les empêche de considérer la disponibilité dans l'optimisation conjointe. Alors que dans le cas particulier auquel on s'intéresse, suite à l'étude de la maintenance du parc de locomotives de Transrail (voir la section 4), on a conclu qu'on ne peut négliger la disponibilité de ces deux types de ressources de maintenance, vue la nécessité de considérer la disponibilité dans l'optimisation conjointe.

En plus, la maintenance préventive des locomotives de Transrail est une combinaison de plusieurs opérations qui sont d'une part d'importances différentes et d'autre part imbriquées; ce qui est une particularité non prise en compte par les modèles existant dans la littérature.

1.7 Définition du système à étudier et question de recherche

Le système à étudier est constitué par le parc de locomotives de Transrail et l'ensemble des opérations et procédures de maintenance appliquées. Les produits de ce système sont les revenus du transport de marchandises, majoritairement sous forme de conteneurs de Bamako à Dakar et de Dakar à Bamako. Les opérations générant les produits du système sont les trois voyages quotidiens.

La principale question de recherche est la détermination de la stratégie de maintenance optimale d'une flotte d'équipements et les mesures de performance du système sont la disponibilité moyenne annuelle de cette flotte d'équipements, son coût moyen annuel de maintenance et la désirabilité globale obtenue en donnant différents poids à chacune de ces deux premières mesures de performance. Donc, l'objectif spécifique de modélisation correspondant à la spécification du critère de comparaison des performances des

alternatives est la recherche du meilleur compromis entre la maximisation de la disponibilité moyenne annuelle et la minimisation du coût moyen annuel de maintenance.

1.8 Démarche

Pour résoudre cette problématique et atteindre les objectifs fixés, on a établi une méthodologie en cinq étapes :

1. Analyse du cas, collecte et traitement des données de la maintenance du parc de locomotives et estimation des paramètres;
2. Revue de la littérature, évaluation et critique des modèles existants;
3. Modélisation de chacune des stratégies de maintenance retenues, exécution, évaluation et validation du modèle;
4. Optimisation de la disponibilité moyenne annuelle, du coût moyen annuel de maintenance et de la désirabilité globale en utilisant successivement la planification d'expérience, la simulation, l'analyse statistique d'expérience et l'optimisation numérique pour chacune de ces stratégies; et
5. Interprétation des résultats obtenus et recommandations.

1.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre on a fait une mise en situation en précisant le contexte de ce mémoire et en annonçant les différentes étapes qui seront abordées dans les chapitres suivants. Dans le chapitre suivant, on fera la revue et la critique des principales stratégies de maintenance développées dans la littérature.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE, ÉVALUATION ET CRITIQUE DES MODÈLES EXISTANTS

2.1 Introduction

L'objectif de ce deuxième chapitre est de faire une étude des principales stratégies de maintenance afin de faire ressortir les insuffisances de chacune d'elles par rapport à la résolution de la problématique posée.

D'une part, la gestion de la maintenance d'une flotte d'équipements nécessite une planification précise. D'autre part, elle conduit à l'agrégation des stocks d'équipements de maintenance similaires et à une possibilité de sollicitation multiple simultanée de chacune des ressources de maintenance. On note ici que Transrail considère à chaque niveau de maintenance l'équipement de rechange comme un système mono composant.

On commence cette revue de littérature par les stratégies de maintenance de base qui sont les plus utilisées dans la pratique. Tout d'abord, on parlera de la stratégie de maintenance de type âge. Ensuite, on abordera la stratégie de maintenance de type bloc. Puis, on s'étalera sur la stratégie de maintenance de type bloc étendu. Enfin, on passera en revue les autres stratégies de maintenance qui ont été développées.

2.2 Stratégie de maintenance de type âge

La stratégie de maintenance de type âge consiste à remplacer l'équipement par un équipement neuf à un intervalle d'âge fixe pour la maintenance préventive et à le remplacer par un équipement neuf tout en remettant l'âge à zéro pour la maintenance corrective. La figure 2.1 ci-dessous est une schématisation de cette stratégie.

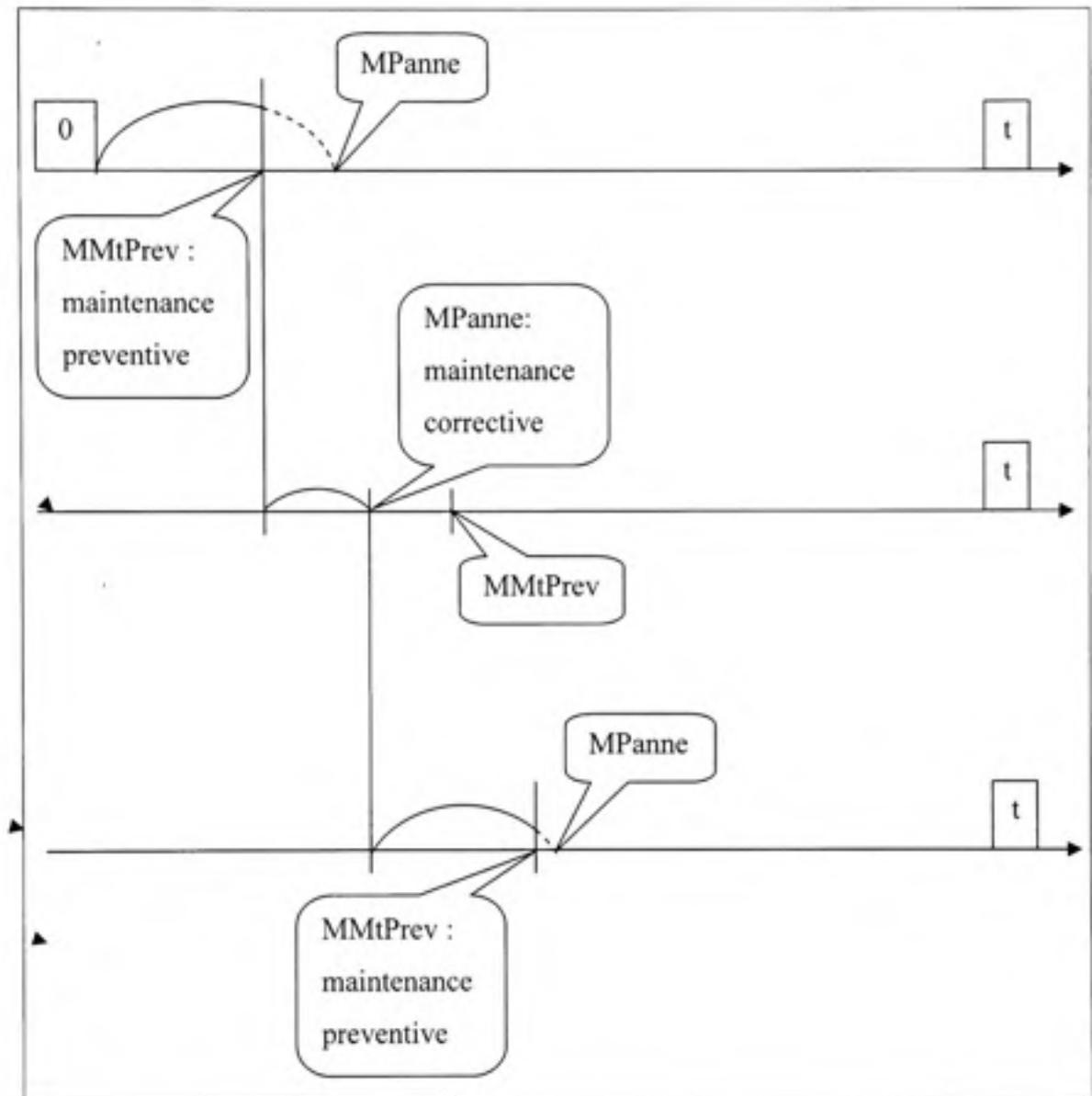


Figure 2.1 Schéma de la stratégie de maintenance de type âge.
Adaptée d'Andriamaharoso (1999, p.11)

Ces dernières décennies, plusieurs modèles de la stratégie de maintenance de type âge ont été développés dans la littérature scientifique pour répondre aux besoins de l'industrie à savoir minimiser le coût de production et/ou maximiser la disponibilité et la fiabilité des machines. Cependant, la plupart de ces modèles supposent que le délai de livraison des équipements de rechange et les durées d'exécution des maintenances préventive et corrective sont négligeables. Par exemple, on peut citer Barlow et Hunter (1960), Cox (1962), Barlow et

Proschan (1965), Jiang et Ji (2002). D'après Brezavscek et Hudoklin (2003), cela suppose que les équipements de rechange sont si moins chers que l'on peut en faire de grands stocks ou que le délai de livraison est négligeable; alors que cela ne reflète pas ce qui arrive généralement dans la pratique. C'est pourquoi, il est nécessaire d'optimiser conjointement la stratégie de maintenance et la stratégie d'approvisionnement en équipement de rechange; car selon Zohrul Kabir et Farrash (1996) une optimisation de chacun des deux séparément ne conduit pas à la stratégie de maintenance globale optimale.

Certains auteurs ont proposé des modèles d'optimisation conjointe de la stratégie de maintenance de type âge et de la gestion des stocks d'équipements de rechange, mais ces modèles présentent aussi certaines insuffisances les éloignant un peu du contexte industriel :

- durées d'exécution des maintenances préventive et corrective négligeables et non prise en compte de la disponibilité dans l'optimisation conjointe, par exemple Zohrul Kabir et Farrash (1996),
- restriction sur les variables de décision et/ou sur le nombre de composants du système, par exemple Mehrez et Stulman (1981), Armstrong et Atkins (1996).

2.3 Stratégie de maintenance de type bloc

La stratégie de maintenance de type bloc consiste à remplacer l'équipement par un équipement neuf au moment prévu pour faire la maintenance préventive et à le remplacer par un équipement neuf suite à une panne sans modifier le moment prévu pour faire la maintenance préventive. La figure 2.2 ci-dessous est une schématisation de cette stratégie.

Depuis quelques décennies, on a développé plusieurs modèles de la stratégie de maintenance de type bloc pour répondre aux besoins de l'industrie. Toutefois, la plupart de ces modèles aussi supposent que le délai de livraison des équipements de rechange et les durées d'exécution des maintenances préventive et corrective sont négligeables. Par exemple, on peut citer Cox (1962), Barlow et Proschan (1965).

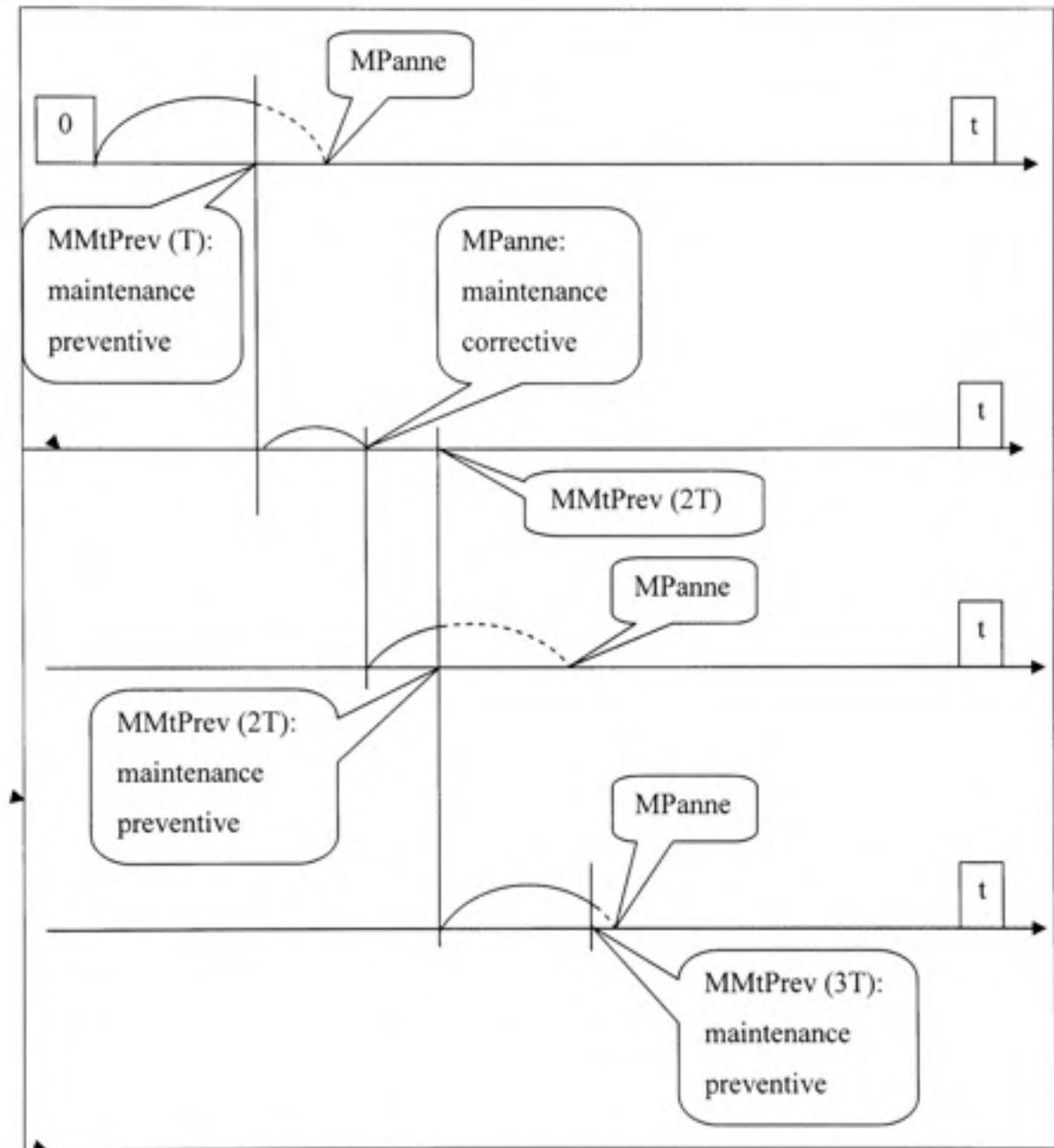


Figure 2.2 Schéma de la stratégie de maintenance de type bloc.

Adaptée d'Andriamaharosa (1999, p.14)

D'après Brezavscek et Hudoklin (2003), cela ne reflète pas ce qui arrive généralement dans la pratique. D'où selon Zohrul Kabir et Farrash (1996) la nécessité d'optimiser conjointement la stratégie de maintenance et la stratégie d'approvisionnement en équipement de rechange.

Certains auteurs ont proposé des modèles d'optimisation conjointe de la stratégie de maintenance de type bloc et de la gestion des stocks d'équipements de rechange, mais ces modèles présentent aussi certaines insuffisances les éloignant un peu du contexte industriel :

- délai de livraison des équipements de rechange négligeable, par exemple Acharya, Nagabhushanam et Alam (1986), Ait Kadi et Chelbi (2001),
- délai de livraison des équipements de rechange fixe, par exemple Brezavscek et Hudoklin (2003),
- durées d'exécution des maintenances préventive et corrective négligeable et non prise en compte de la disponibilité dans l'optimisation conjointe, par exemple Acharya, Nagabhushanam et Alam (1986), Ait Kadi et Chelbi (2001), Brezavscek et Hudoklin (2003), Boulet (2007), Huang et al. (2008).

2.4 Stratégie de maintenance de type bloc étendu

La stratégie de maintenance de type bloc étendu consiste à remplacer l'équipement par un équipement neuf au moment prévu pour faire la maintenance préventive et à le remplacer par un équipement neuf suite à une panne si celle-ci intervient avant le point de décision, sinon de remplacer l'équipement par un équipement usagé toujours sans modifier le moment prévu pour faire la maintenance préventive. Ledit point de décision étant le moment à partir duquel on a décidé d'effectuer le remplacement par un équipement usagé car n'étant plus très loin du moment prévu pour faire la maintenance préventive. La figure 2.3 ci-dessous est une schématisation de cette stratégie.

Dans le but d'améliorer la stratégie de maintenance de type bloc en diminuant le gaspillage d'équipements neufs souvent utilisés pour seulement une courte période, Bhat (1969) a proposé d'effectuer le remplacement suite à une panne par des équipements ayant fonctionné pendant un cycle T sans défaillance ni bris. Dans ce même objectif, Tango (1978) se basant sur la stratégie de maintenance établie par Bhat (1969) a introduit l'utilisation d'équipements usagés pour effectuer le remplacement si la panne intervient au-delà d'un point de décision (décrit ci-dessus). Tous ces deux modèles de maintenance supposent que les délais de

livraison des équipements de rechange neufs et usagés et les durées d'exécution des maintenances préventive, corrective avec du neuf et corrective avec de l'usagé sont négligeables.

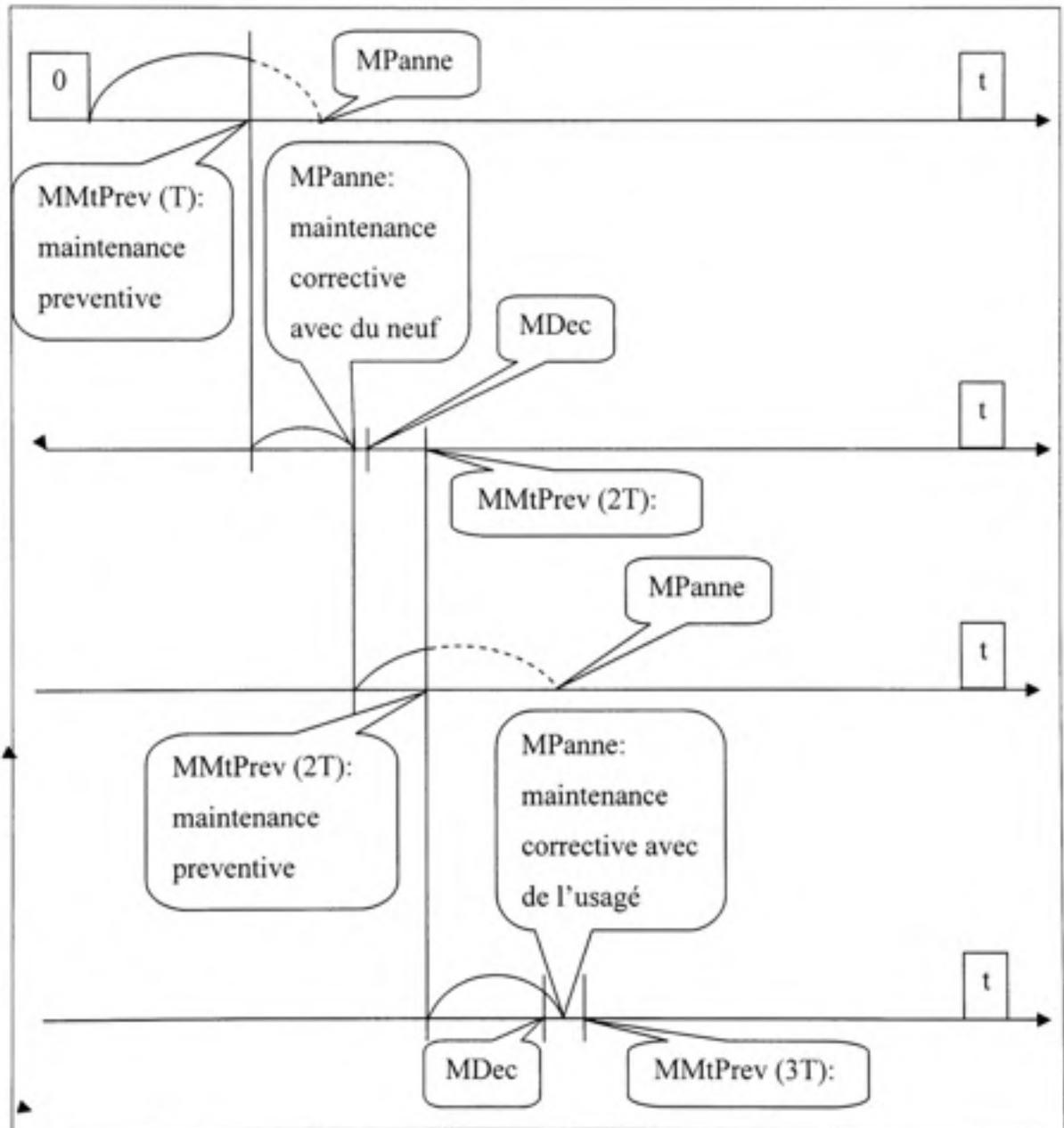


Figure 2.3 Schéma de la stratégie de maintenance de type bloc étendu.
Adaptée d'Andriamaharoso (1999, p.33)

2.5 Autres stratégies de maintenance

En plus des trois stratégies de maintenance de base, d'autres stratégies de maintenance ont été développées, citons entre autre : la stratégie de remplacement périodique avec réparation minimale, la stratégie de remplacement périodique avec période d'inactivité, la stratégie de maintenance imparfaite et la stratégie de maintenance préventive séquentielle.

2.5.1 La stratégie de remplacement périodique avec réparation minimale

Elle consiste à remettre le système en état d'opération suite à une panne sans affecter son taux de panne. Barlow et Hunter (1960) ont introduit la notion de remplacement périodique avec réparation minimale. Ils ont effectué une analyse des différentes caractéristiques de cette stratégie de maintenance et ont établi les conditions d'existence et d'unicité de la stratégie optimale t_0 maximisant l'efficacité limite sur un horizon infini. Barlow et Proschan (1965) se basant sur le modèle établi par Barlow et Hunter (1960) ont établi les conditions d'existence et d'unicité de la stratégie optimale T_0 minimisant le coût escompté par unité de temps sur un horizon infini. Nakagawa (1980) a proposé trois modèles de maintenance préventive imparfaite d'un système à une unité avec réparation minimale à la panne. Il a établi les conditions d'existence (pour chacun des modèles) et d'unicité (pour chacun des deux premiers modèles) de la stratégie optimale T^* finie minimisant le coût escompté par unité de temps sur un horizon infini. Boland et Proschan (1982) ont proposé un modèle de remplacement périodique avec des coûts croissants de réparation minimale à la panne et ont établi les conditions d'existence et d'unicité de la stratégie optimale T_0 minimisant le coût total escompté par unité de temps sur un horizon de temps infini. Encore, tous ces quatre modèles de maintenance supposent que les délais de livraison des équipements de rechange neufs et usagés et les durées d'exécution des maintenances préventive et corrective avec de l'usagé sont négligeables.

2.5.2 La stratégie de remplacement périodique avec période d'inactivité

Elle consiste à laisser le système inactif jusqu'au moment de maintenance préventive suite à une panne intervenue juste avant un des moments de maintenance préventive. Cox (1962) a déterminé le coût total moyen par unité de temps sur un horizon infini et a établi la condition dans laquelle il serait rentable de laisser s'écouler une période d'inactivité, pour toute distribution de durée de vie ayant un taux de panne croissant (avec le temps). Ici aussi, ce modèle de maintenance suppose que le délai de livraison des équipements de rechange et les durées d'exécution des maintenances préventive et corrective sont négligeables.

2.5.3 La stratégie de maintenance imparfaite

Elle consiste à améliorer l'état du système (le rajeunir) sans pour autant le rendre aussi bon qu'un système neuf. Nakagawa (1980) a proposé trois modèles de maintenance préventive imparfaite d'un système à une unité avec réparation minimale à la panne (voir les détails dans la sous-section 2.5.1). Brown et Proschan (1983) ont proposé un modèle de réparation imparfaite un peu rapproché du modèle de «réparation minimale à la panne». Ils ont établi la préservation des propriétés de vieillissement et des propriétés de monotonie. Cependant, tous ces deux modèles de maintenance aussi supposent que les délais de livraison des équipements de rechange neufs et usagés et les durées d'exécution des maintenances préventive et corrective avec de l'usagé sont négligeables. Pham et Wang (1996) ont examiné et résumé plusieurs méthodes de traitement et stratégies optimales de maintenance imparfaite. Ils ont aussi présenté plusieurs résultats importants pour la maintenance imparfaite.

2.5.4 La stratégie de maintenance préventive séquentielle

Elle consiste à évaluer les performances du système sur un horizon fini. Barlow et Proschan (1965) ont établi les conditions d'existence d'une valeur t_0 de la stratégie optimale $\{x_\tau; 0 \leq \tau \leq t\}$ minimisant le coût escompté sur un horizon de temps fixé $[0,t]$. Boland et Proschan (1982) ont proposé un modèle de remplacement périodique avec des coûts

croissants de réparation minimale à la panne et ont établi la condition d'existence de la stratégie optimale T_0 minimisant le coût total escompté sur un horizon de temps fixé $[0,t)$. Une fois encore, tous ces deux modèles de maintenance aussi supposent que le délai de livraison des équipements de rechange et les durées d'exécution des maintenances préventive et corrective sont négligeables.

Dans la section suivante, on parlera de l'applicabilité des modèles existant dans la littérature pour la résolution de la problématique concernant la maintenance de la flotte de locomotives de Transrail.

2.6 Applicabilité des modèles existants et approche de résolution proposée

En parcourant les différents modèles de maintenance existant dans la littérature, on a observé que les hypothèses posées pour l'établissement de ces modèles les empêchent de considérer la disponibilité du système et les limitent ainsi à la seule minimisation du coût de maintenance. Alors que, dans plusieurs domaines industriels, les décideurs s'intéressent autant à la maximisation de la disponibilité du système qu'à la minimisation du coût de maintenance. Ainsi, d'une part vue l'importance du revenu généré par une augmentation de disponibilité, d'où la nécessité de tenir compte de cette variable de réponse dans l'optimisation de la stratégie de maintenance. Et à cause des différentes hypothèses simplificatrices utilisées de part et d'autre pour établir les modèles, à savoir : délai de livraison des équipements de rechange fixe ou négligeable, durées d'exécution des opérations de maintenance négligeables et limitation de l'optimisation conjointe à la seule minimisation du coût de maintenance, restrictions sur les variables de décision et/ou sur le nombre de composants du système. D'autre part, constatant que l'imbrication des niveaux micro et macro de la maintenance des locomotives est une particularité non prise en compte par les modèles existants dans la littérature, alors on peut dire qu'aucun de ces modèles n'est applicable à la maintenance des locomotives de Transrail.

Les modèles ainsi établis sur la base d'hypothèses simplificatrices permettent de comprendre la complexité de la modélisation analytique de ces stratégies de maintenance si elles tiennent compte de toutes les ressources nécessaires à l'exécution pratique de la maintenance dans le contexte industriel. Ce mémoire explore donc certaines extensions des stratégies de maintenance de base pour résoudre la problématique d'une bonne prise en compte de la disponibilité dans l'optimisation conjointe multicritère de la stratégie de maintenance et de la gestion des stocks d'équipements de rechange. Ainsi de la connaissance de l'auteur, pour la première fois on fait une optimisation conjointe multicritère intégrant le personnel de maintenance. En plus, cette optimisation des performances est faite sans aucune restriction sur les variables de décision et le nombre de composants du système. Précisément, le but de ce travail de recherche est de trouver le meilleur compromis entre la maximisation de la disponibilité et la minimisation du coût de maintenance tout en déterminant la valeur optimale de chacune des variables de décision.

2.7 Approche de résolution

D'après Huang et al. (2008), généralement l'optimisation conjointe analytique de deux ou plusieurs activités est très complexe. Donc, afin de faire l'optimisation conjointe multicritère de cette stratégie de maintenance avec deux niveaux imbriqués et de la gestion des stocks d'équipements de rechange, on a décidé d'explorer une méthode expérimentale. Car ici on doit faire l'optimisation conjointe de trois activités avec cinq ou six variables de décision pour le niveau macro et en plus on veut faire une optimisation multicritère. Huang et al. (2008), ont dû prendre le niveau d'inventaire maximal comme seule variable de décision du modèle pour pouvoir déduire la condition d'existence et d'unicité d'un minimum pour le coût de maintenance.

La méthode expérimentale proposée pour résoudre la problématique posée et atteindre les objectifs fixés est basée sur la simulation, l'analyse statistique d'expérience et l'optimisation numérique. La mise en œuvre de cette approche se fera en sept étapes :

1. Détermination des variables de décision (facteurs);

2. Planification d'expérience permettant de séparer tous les effets principaux et toutes les interactions doubles;
3. Construction du modèle de simulation;
4. Validation du modèle de simulation;
5. Exécution de la simulation pour tous les points (combinaisons de facteurs) du plan d'expérience et collecte des résultats;
6. Analyse statistique d'expérience; et
7. Optimisation numérique de la disponibilité et du coût de maintenance individuellement et optimisation numérique multicritère avec utilisation des fonctions de désirabilité.

2.8 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, partant des limitations des modèles actuels et de la difficulté à lever ces limitations de façon analytique, on a jugé opportun d'explorer l'utilisation conjointe de la simulation, de la planification et de l'analyse statistique d'expérience pour l'optimisation des stratégies de maintenance. À ce titre, on a retenu trois stratégies de maintenance de base : la stratégie de maintenance de type âge, la stratégie de maintenance de type bloc, la stratégie de maintenance de type bloc étendu et une quatrième stratégie de maintenance obtenue en intégrant la disponibilité du personnel de maintenance à la stratégie de maintenance de type âge. Le prochain chapitre traitera l'application de la stratégie de type âge à la maintenance des locomotives de Transrail.

CHAPITRE 3

STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE

3.1 Introduction

En appliquant la stratégie ARP à la maintenance des locomotives de Transrail, on cherche à optimiser la stratégie déjà en place en déterminant la valeur optimale de chacune des variables de décision et les valeurs correspondantes des variables de réponse. Ces valeurs seront ensuite comparées aux valeurs actuelles.

On commence l'application de cette stratégie ARP par la modélisation de chacun des niveaux macro et micro. Ensuite, on abordera la validation des modèles. Puis, on s'étalera sur l'optimisation conjointe multicritère de chacun des deux niveaux macro et micro. Enfin, on effectuera l'analyse de sensibilité de chacun des deux niveaux.

3.2 Modélisation de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge

3.2.1 Modélisation du niveau macro de la maintenance de type âge

Pour faciliter la compréhension de la stratégie de maintenance de type âge que Transrail applique présentement pour le niveau macro, on présente ci-dessous son logigramme qui montre toute la logique suivie dans son application à la maintenance des locomotives. Ce logigramme se résume en huit étapes :

1. Vérification de l'atteinte de l'horizon planifié;
2. Génération du temps de panne;
3. Vérification de la nature de la maintenance à faire (corrective ou préventive);
4. Vérification du niveau de la maintenance à faire;
5. Vérification de la disponibilité des ressources de maintenance nécessaires;
6. Exécution de la maintenance et planification de la prochaine maintenance préventive;
7. Retour au niveau micro; et

8. Calcul de la disponibilité et du coût de maintenance lorsque l'horizon est atteint.

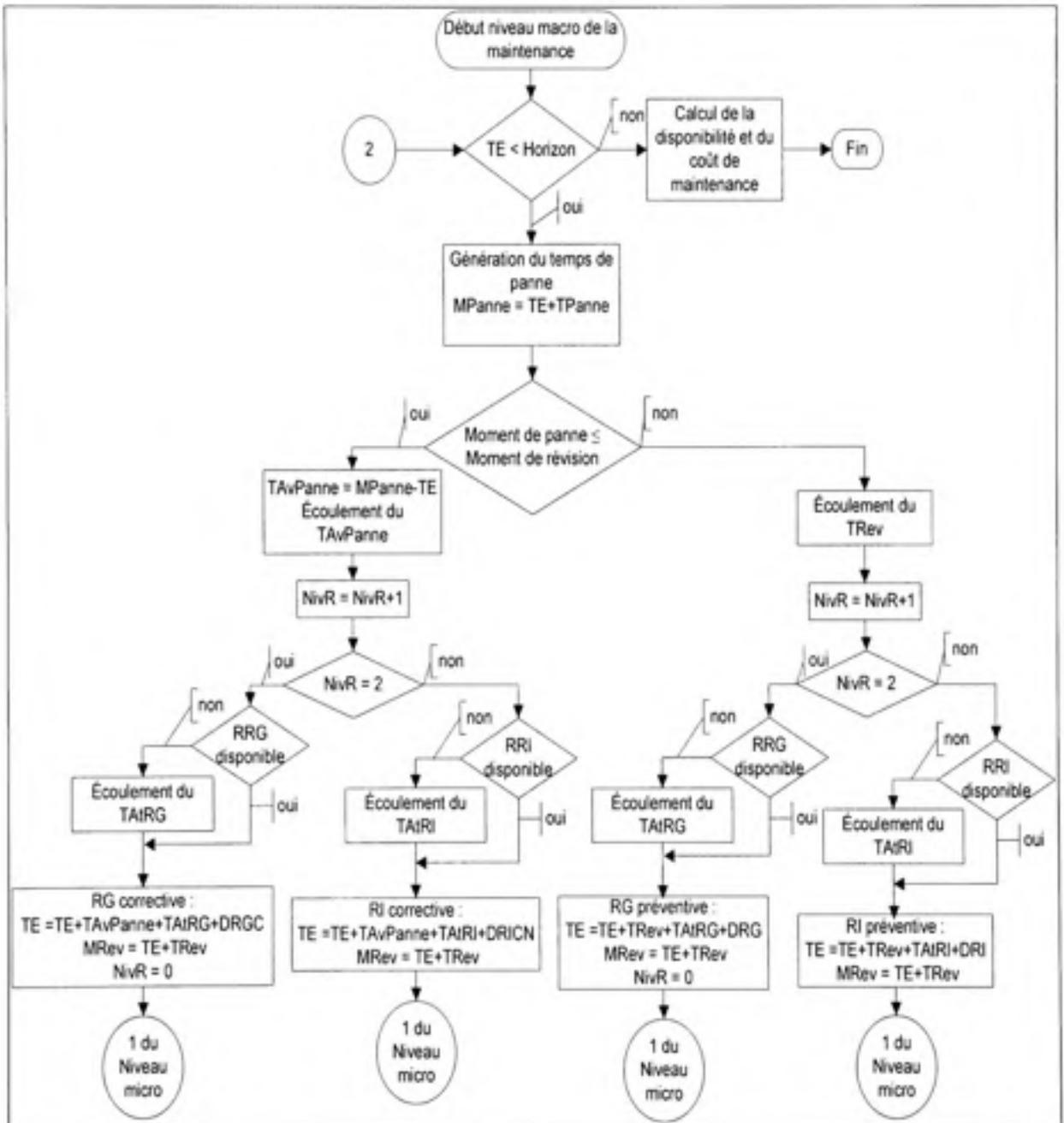


Figure 3.1 Logigramme du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge.

On a utilisé le langage Visual SLAM et AweSim de Pritsker, A. A. B. et O'Reilly, J. J. (1999) pour programmer ce logigramme et faire les simulations (voir annexe 3).

Afin d'augmenter la précision de la valeur obtenue, on a effectué pour chaque essai 999 réplifications et on a fait la moyenne pour chacune des mesures de performance. Ayant trouvé le meilleur équilibre précision des résultats - durée de simulation en exprimant les durées en jours, alors on a décidé de prendre le jour comme unité de temps.

3.2.2 Modélisation du niveau micro de la maintenance

Pour faciliter la compréhension du niveau micro de la maintenance des locomotives de Transrail, on présente ci-dessous son logigramme qui montre toute la logique suivie dans son application. Ce logigramme se résume en sept étapes :

1. Vérification de l'atteinte de l'horizon planifié;
2. Vérification de l'atteinte du moment d'une maintenance préventive ou corrective de niveau macro;
3. Si oui, envoi au niveau macro;
4. Sinon, vérification du niveau de la maintenance micro à faire;
5. Vérification de la disponibilité des ressources de maintenance nécessaires;
6. Exécution de la maintenance; et
7. Calcul de la disponibilité et du coût de maintenance lorsque l'horizon est atteint.

On a utilisé le langage Visual SLAM et AweSim pour programmer ce logigramme et faire les simulations (voir annexe 4 pour le niveau micro d'ARP).

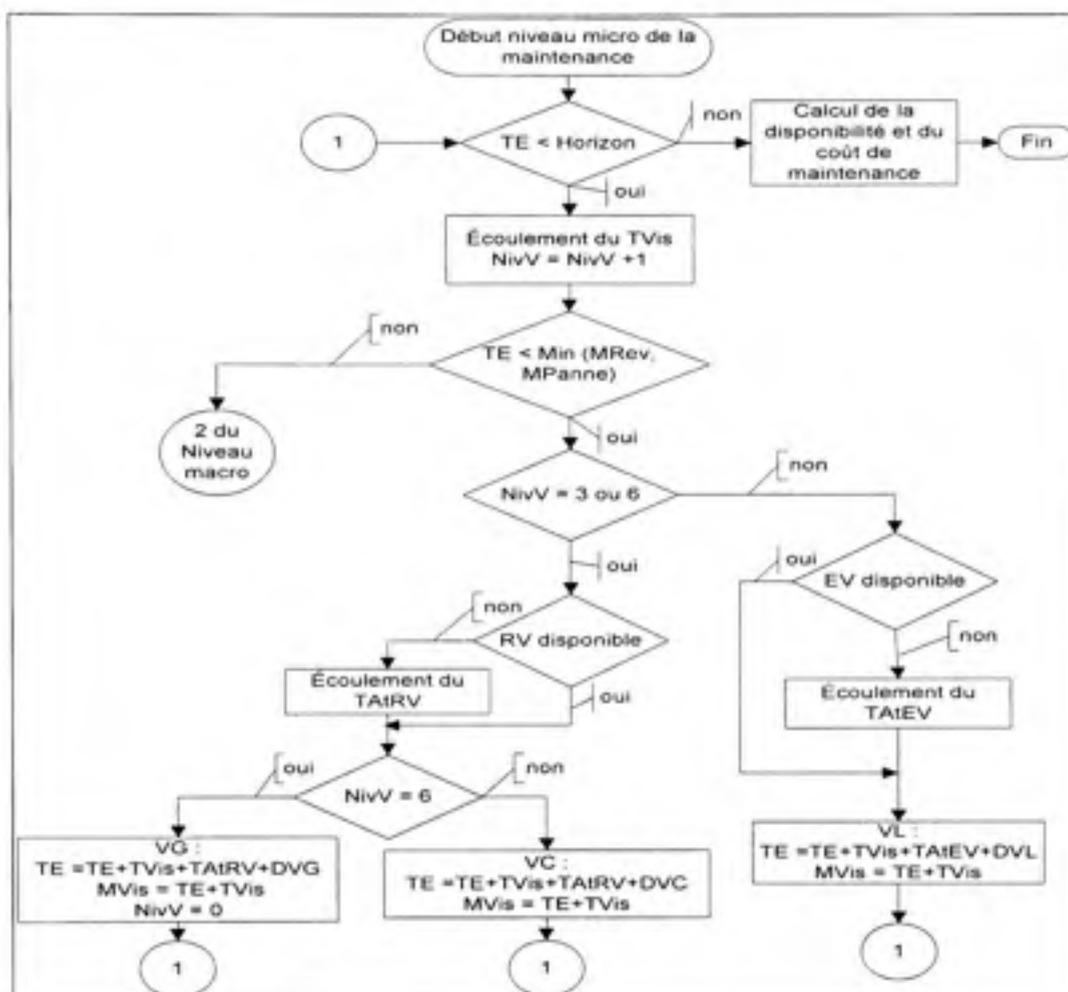


Figure 3.2 Logigramme du niveau micro de la maintenance des locomotives.

3.3 Régime permanent, intervalles de confiance et validation du modèle de la maintenance des locomotives

Pour chacun des deux modèles macro et micro, on a d'abord fait la vérification du programme et la correction des erreurs avec le rapport des étapes intermédiaires et le rapport d'erreurs. On a ensuite vérifié l'atteinte du régime permanent et la précision de l'intervalle de confiance pour la disponibilité et le coût de maintenance. Puis on a validé le modèle global regroupant ces deux modèles en comparant successivement les valeurs actuelles réelles de la disponibilité et du coût de maintenance aux résultats de la méthode expérimentale du modèle intégrant les équipements de rechange et le personnel de maintenance, du modèle n'intégrant

aucune de ces deux ressources et du modèle intégrant seulement les équipements de rechange.

3.3.1 Régime permanent et intervalles de confiance du modèle du niveau macro de la maintenance

Pour vérifier l'atteinte du régime permanent et déterminer le temps de simulation nécessaire en régime transitoire, on a calculé les valeurs des mesures de performance du niveau macro (pour les valeurs actuelles des variables de décision) à des temps multiples du temps à simuler en régime permanent (voir tableau 3.1 ci-dessous). On a ensuite déduit que le régime permanent est atteint à partir du moment où ces valeurs ne varient plus de manière significative.

Tableau 3.1 Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour le niveau macro

n*TSim	DispM	CoûtM (\$)
1	0,9593	884218
2	0,9520	922460
3	0,9515	922363
4	0,9515	920502
5	0,9515	920776
6	0,9512	921336
7	0,9512	921654
8	0,9517	920215
9	0,9515	920768
10	0,9515	921903
Moy =	0,9514	921175
Max =	0,9517	921903
Min =	0,9512	920215
Max - Min =	0,0005	1687
Max - Min en % de Moy =	0,05%	0,18%

On a d'abord tracé le graphique de la DispM du niveau macro en fonction du temps (sous forme de multiples du temps à simuler).

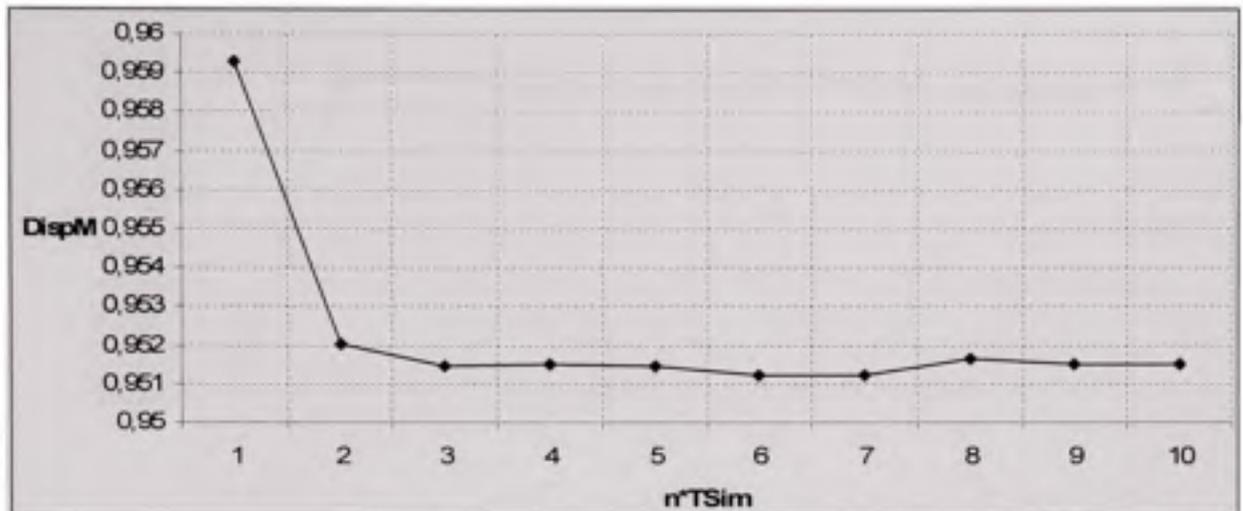


Figure 3.3 Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour la disponibilité moyenne du niveau macro.

La figure 3.3 ci-dessus illustre la variation de la DispM du niveau macro en fonction du temps. On a ensuite calculé l'intervalle de confiance de la moyenne de la disponibilité du niveau macro afin de déterminer sa précision (voir tableau 3.2 ci-dessous).

Tableau 3.2 Intervalle de confiance pour la disponibilité moyenne du niveau macro

Alpha = 1-Niveau de confiance =	1-95% =	0,05	
Moyenne μ =	0,9510		
Ecart type =	0,0054		
Distance d =	0,0003		
Intervalle de confiance = $\mu \pm d$ =	0,9510	\pm	0,0003
L'intervalle de confiance est:	0,9507	$\leq \mu \leq$	0,9513

Puis, on a tracé le graphique du CoûtM du niveau macro en fonction du temps (toujours sous forme de multiples du temps à simuler).

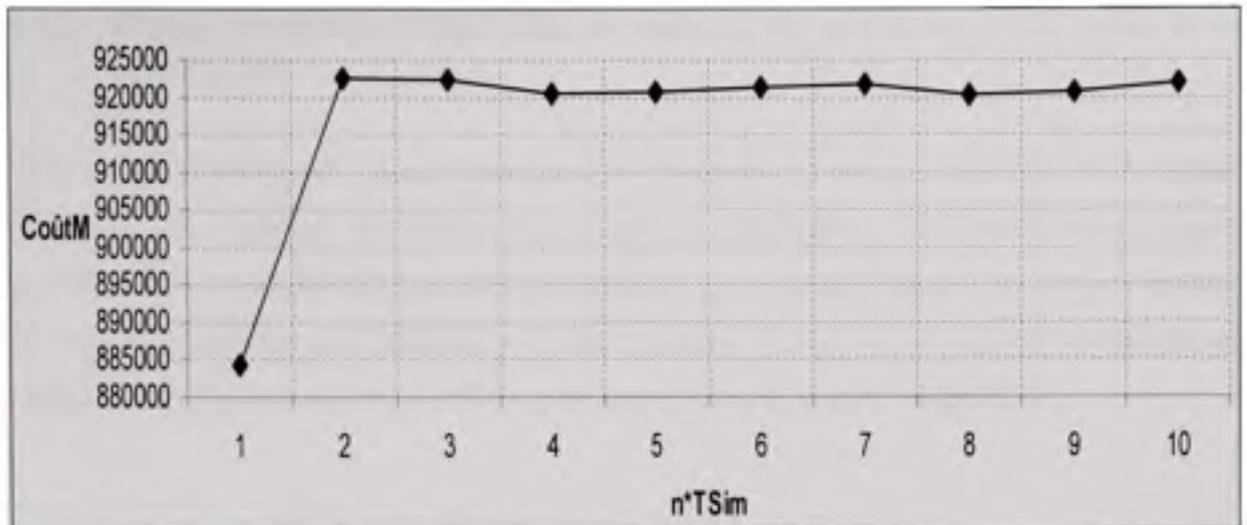


Figure 3.4 Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour le coût moyen du niveau macro.

La figure 3.4 ci-dessus illustre la variation du CoûtM du niveau macro en fonction du temps. Et on a calculé l'intervalle de confiance de la moyenne du coût du niveau macro afin de déterminer sa précision (voir tableau 3.3 ci-dessous).

Tableau 3.3 Intervalle de confiance pour le coût moyen du niveau macro

Alpha = 1-Niveau de confiance =	1-95% =	0,05	
Moyenne μ =	920737		
Ecart type =	23852		
Distance d =	1478		
Intervalle de confiance = $\mu \pm d$ =	920737	\pm	1478
L'intervalle de confiance est:	919259	$\leq \mu \leq$	922215

On constate à partir des figures 3.3 et 3.4 que le régime permanent du niveau macro est atteint à partir de 6*TSim. La précision des intervalles de confiance pour la disponibilité moyenne et le coût moyen du niveau macro montre que les résultats sont suffisamment précis.

3.3.2 Régime permanent et intervalles de confiance du modèle du niveau micro de la maintenance

Pour vérifier l'atteinte du régime permanent et déterminer le temps de simulation en régime transitoire, on a calculé les valeurs des mesures de performance du niveau micro (encore pour les valeurs actuelles des variables de décision) à des temps multiples du temps à simuler en régime permanent (voir tableau 3.4). On a ensuite déduit que le régime permanent est atteint à partir du moment où ces valeurs ne varient plus de manière significative.

Tableau 3.4 Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour le niveau micro

n*TSim	DispM	CoûtM
1	0,9491	428948
2	0,9484	426457
3	0,9484	426369
4	0,9483	426150
5	0,9483	426439
Moy =	0,94835	426354
Max =	0,9484	426457
Min =	0,9483	426150
Max - Min =	1E-04	307
Max - Min en % de Moy =	0,01%	0,07%

On a d'abord tracé le graphique de la DispM du niveau micro en fonction du temps (encore sous forme de multiples du temps à simuler). La figure 3.5 ci-dessous illustre la variation de la DispM du niveau micro en fonction du temps. Ensuite, on a calculé l'intervalle de confiance de la moyenne de la disponibilité du niveau micro afin de déterminer sa précision (voir tableau 3.5 ci-dessous).

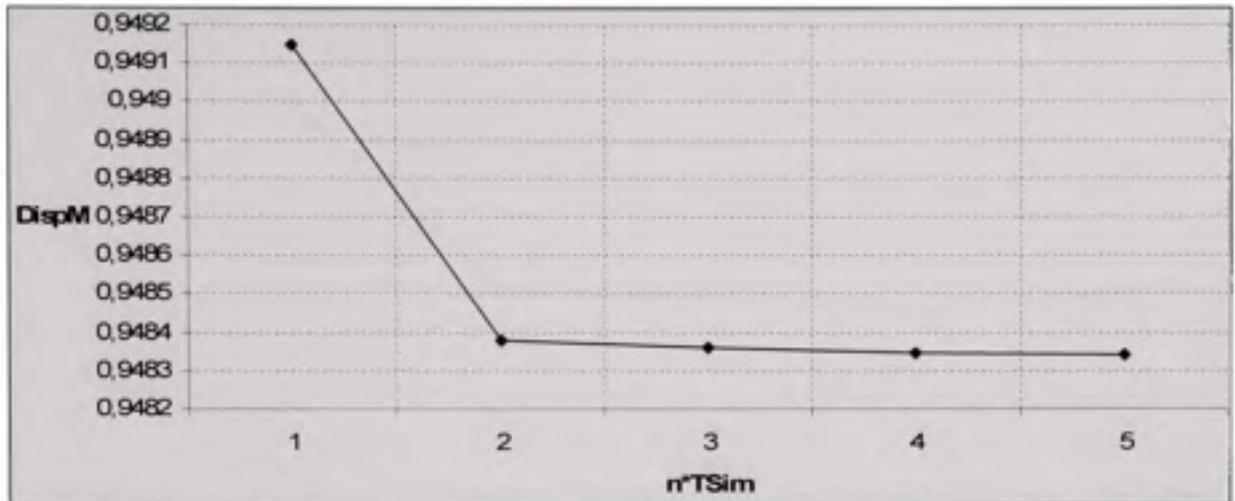


Figure 3.5 Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour la disponibilité moyenne du niveau micro.

Tableau 3.5 Intervalle de confiance pour la disponibilité moyenne du niveau micro

Alpha = 1-Niveau de confiance =	1-95% =	0,05	
Moyenne μ =	0,9483		
Ecart type =	0,0009		
Distance d =	5E-05		
Intervalle de confiance = $\mu \pm d$ =	0,9483	\pm	5E-05
L'intervalle de confiance est:	0,94825	$\leq \mu \leq$	0,94835

Puis, on a tracé le graphique du CoûtM du niveau micro en fonction du temps (toujours sous forme de multiples du temps à simuler). La figure 3.3 ci-dessous illustre la variation du CoûtM du niveau micro en fonction du temps. Et on a calculé l'intervalle de confiance de la moyenne du coût pour le modèle du niveau micro afin de déterminer sa précision (voir tableau 3.6 ci-dessous).

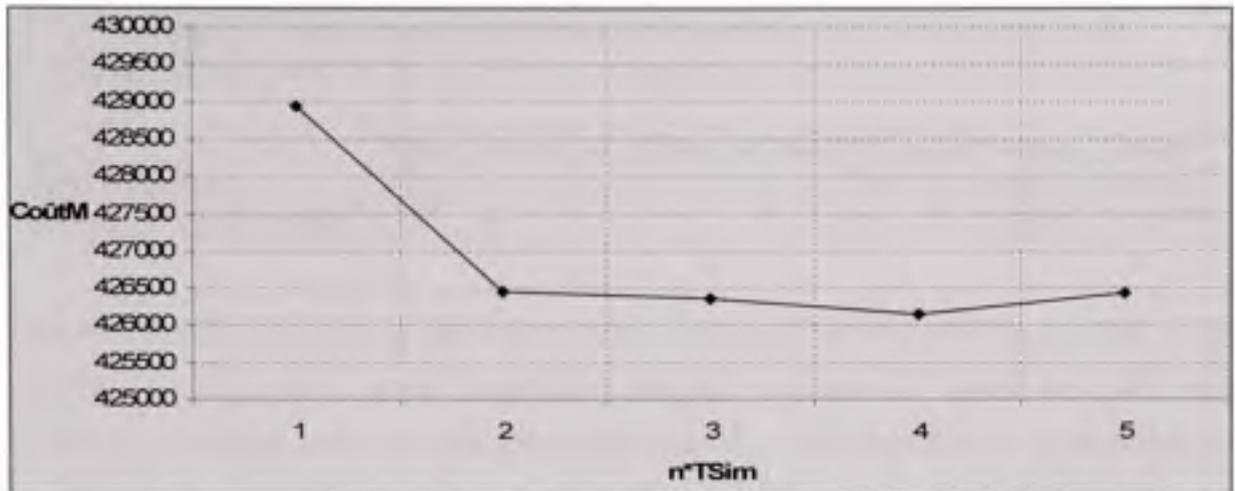


Figure 3.6 Détermination du moment d'atteinte du régime permanent pour le coût moyen du niveau micro.

Tableau 3.6 Intervalle de confiance pour le coût moyen du niveau micro

Alpha = 1-Niveau de confiance =	1-95% =	0,05	
Moyenne μ =	426440		
Ecart type =	1152		
Distance d =	71		
Intervalle de confiance = $\mu \pm d$ =	426440	\pm	71
L'intervalle de confiance est:	426369	$\leq \mu \leq$	426511

On constate à partir des figures 3.5 et 3.6 que le régime permanent du niveau micro est atteint à partir de $2 \cdot \text{TSim}$. La précision des intervalles de confiance pour la disponibilité moyenne et le coût moyen du niveau micro montre que les résultats sont suffisamment précis.

3.3.3 Validation du modèle globale de la maintenance des locomotives

Pour valider le modèle global, on a comparé successivement les valeurs actuelles réelles des variables de réponse de Transrail aux résultats de la méthode expérimentale des différents modèles. Pour cela, on a simulé la stratégie de maintenance préventive de type âge actuellement appliquée par la société et caractérisée par les valeurs des paramètres données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.7 Comparaison des valeurs réelles avec les résultats de la méthode expérimentale intégrant les équipements de rechange et le personnel de maintenance

	TRev	PCRI	QCRI	PCRG	QCRG	PCV	QCV	DispM	CoûtM
Valeurs réelles	2190	4	4	3	3	50	50	0,8970	1350000
Méthode expérimentale	2190	4	4	3	3	50	50	0,8993	1347177

Après avoir effectué quelques ajustements pour obtenir un bon niveau de concordance, on constate qu'on a un écart sur la disponibilité moyenne annuelle (EcDispM) de 0,0023 soit 0,26% et un écart sur le coût moyen annuel (EcCoût) de 2 823\$ soit 0,21%. La disponibilité moyenne donnée par la simulation est légèrement supérieure à la disponibilité moyenne réelle à cause du fait que les arrêts mineurs exceptionnels ne sont pas pris en compte dans le modèle de simulation. Le coût moyen de maintenance donné par la simulation est légèrement inférieur au coût moyen de maintenance réel à cause du fait que les dépenses mineures irrégulières (vis, rondelles ou lampes remplacées prématurément,...) ne sont pas prises en compte dans le modèle de simulation. On a donc conclu que les valeurs obtenues sont très proches des valeurs réelles et on a jugé le modèle valide.

Pour faire ressortir l'importance d'intégrer le personnel de maintenance et les équipements de rechange au modèle, on va comparer les valeurs réelles des performances du système avec celles d'un modèle de simulation s'inspirant du modèle de Barlow et Hunter (1960).

Tableau 3.8 Comparaison des valeurs réelles avec les résultats de la méthode expérimentale n'intégrant ni les équipements de rechange, ni le personnel de maintenance

	TRev	PCRI	QCRI	PCRG	QCRG	PCV	QCV	DispM	CoûtM
Valeurs réelles	2190	4	4	3	3	50	50	0,8970	1350000
Méthode expérimentale	2190	4	4	3	3	50	50	0,9348	1232989

On constate qu'en n'intégrant aucune de ces deux ressources au modèle de simulation on a un écart sur la disponibilité moyenne annuelle (EcDispM) de 0,0378 soit 4,21% et un écart sur le coût moyen annuel (EcCoût) de 117 011\$ soit 8,67%. La disponibilité moyenne donnée par la simulation est alors significativement supérieure à la disponibilité moyenne

réelle à cause du fait que tous les temps d'attente du personnel de maintenance et tous les temps d'attente des équipements de rechange sont supprimés dans ce cas. Le coût moyen de maintenance donné par la simulation est assez inférieur au coût moyen de maintenance réel à cause du fait que dans ce cas il n'y a ni coût de stockage, ni coût de commande. On a donc conclu que les valeurs obtenues s'éloignent des valeurs réelles et on a jugé que ce modèle n'est pas représentatif du système.

Pour faire ressortir l'importance d'intégrer le personnel de maintenance au modèle, on va comparer les valeurs réelles des performances du système avec celles d'un modèle de simulation semblable à celui de Boulet (2007) introduisant la variabilité du délai de livraison dans le modèle de Brezavscek et Hudoklin (2003).

Tableau 3.9 Comparaison des valeurs réelles avec les résultats de la méthode expérimentale intégrant seulement les équipements de rechange

	TRev	PCRI	QCRI	PCRG	QCRG	PCV	QCV	DispM	CoûtM
Valeurs réelles	2190	4	4	3	3	50	50	0,8970	1350000
Méthode expérimentale	2190	4	4	3	3	50	50	0,9317	1366652

On constate qu'en n'intégrant pas le personnel de maintenance au modèle de simulation on a un écart sur la disponibilité moyenne annuelle (EcDispM) de 0,0347 soit 3,87% et un écart sur le coût moyen annuel (EcCoût) de 16 652\$ soit 1,23%. La disponibilité moyenne donnée par la simulation est alors significativement supérieure à la disponibilité moyenne réelle à cause du fait que tous les temps d'attente du personnel de maintenance sont supprimés dans ce cas. Le coût moyen de maintenance donné par la simulation est légèrement supérieur au coût moyen de maintenance réel à cause du fait que dans ce cas il y a une légère augmentation de la consommation d'équipements de rechange. On a donc conclu que les valeurs obtenues s'éloignent un peu des valeurs réelles et on a jugé que ce modèle n'est pas suffisamment représentatif du système.

3.4 Optimisation conjointe multicritère de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge

3.4.1 Désirabilité et optimisation multicritère

A cause de sa simplicité et de son application facile, on a choisi l'approche de la désirabilité pour faire l'optimisation conjointe multicritère. Harrington (1965), Derringer et Suich (1980) et Derringer (1994) donnent suffisamment de détails sur cette approche d'optimisation multicritère.

Pour chaque point du plan d'expérience utilisé pour faire cette optimisation conjointe multicritère, les différentes désirabilités globales ont été déterminées de la manière suivante :

1. On cherche à maximiser la disponibilité moyenne annuelle, alors sa désirabilité est obtenue par :

$$DDisp = \frac{DispM - DispM_{min}}{DispM_{max} - DispM_{min}} \quad (1.1)$$

2. On cherche à minimiser le coût moyen annuel de maintenance, alors sa désirabilité est obtenue par :

$$DCoût = \frac{CoûtM_{max} - CoûtM}{CoûtM_{max} - CoûtM_{min}} \quad (1.2)$$

3. Chacune des désirabilités globales est obtenue en faisant le produit pondéré de la désirabilité de la disponibilité moyenne annuelle par la désirabilité du coût moyen annuel de maintenance :

$$DGlob w1 / w2 = \left(DDisp^{w1} * DCoût^{w2} \right)^{1/(w1+w2)} \quad (1.3)$$

On déterminera toujours la meilleure combinaison de poids de la désirabilité globale en calculant à chaque fois l'augmentation de revenu moyen annuel potentielle lorsqu'on passe d'une combinaison à une autre combinaison et on utilisera la formule suivante pour cela :

$$\text{AugRevM} = (\text{RevVoy} - \text{CoûtVoy}) * \text{NbLocD} * 365 * (\text{DispM}_2 - \text{DispM}_1) / \text{DurVoy} + \text{CoûtM}_1 - \text{CoûtM}_2 \quad (1.4)$$

On parle d'augmentation de revenu moyen annuel potentielle car toute augmentation de disponibilité n'entraîne pas forcément une augmentation du nombre de voyages effectués à cause de la fluctuation de la demande de Transrail. Alors après application numérique on a :

$$\text{AugRevM} = 78\,438\,395 * (\text{DispM}_2 - \text{DispM}_1) + \text{CoûtM}_1 - \text{CoûtM}_2 \quad (1.5)$$

Concernant le passage de la stratégie actuelle à une nouvelle stratégie, on utilisera la formule suivante pour le calcul de l'augmentation de revenu moyen annuel potentielle (M étant mis pour indiquer le niveau macro et m le niveau micro) :

$$\begin{aligned} \text{AugRevM} = & (\text{RevVoy} - \text{CoûtVoy}) * \text{NbLocD} * 365 * (\text{DispM}(M) + \text{DispM}(m) - 1 \\ & - \text{EcDispM} - \text{DispM}_{\text{act}}) / \text{DurVoy} + \text{CoûtM}_{\text{act}} - \text{EcCoût} \\ & - \text{CoûtM}(M) - \text{CoûtM}(m) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Alors après application numérique on a :

$$\begin{aligned} \text{AugRevM} = & 78\,438\,395 * (\text{DispM}(M) + \text{DispM}(m) - 1,8993) + 1\,347\,177 \\ & - \text{CoûtM}(M) - \text{CoûtM}(m) \end{aligned} \quad (1.7)$$

3.4.2 Optimisation conjointe multicritère du niveau macro de la maintenance de type âge

On a fixé le domaine d'expérience du niveau macro d'ARP après plusieurs essais pilotes afin de cibler la zone convenable pour l'optimisation conjointe des variables de réponse. Le domaine d'expérience utilisé pour l'optimisation conjointe du niveau macro d'ARP est défini par les niveaux respectifs de chacune des variables de décision.

Tableau 3.10 Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau macro d'ARP

Variable de décision	Limite inférieure	Point milieu	Limite supérieure
TRev (x_1)	1460	1825	2190
PCRI (x_2)	4	5	6
QCRI (x_3)	2	3	4
PCRG (x_4)	2	3	4
QCRG (x_5)	1	2	3

Les modèles du premier ordre avec et sans interaction présentant une grande courbure et n'ajustant pas bien les valeurs obtenues par simulation, alors on a adopté les modèles du deuxième ordre avec interaction. On a donc utilisé un plan factoriel fractionnaire 3^{5-1} plus cinq points au centre, pour un total de 86 essais permettant de séparer tous les effets principaux et toutes les interactions doubles, tout en améliorant la précision de l'estimation des effets. Après avoir fait la simulation du niveau macro d'ARP, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis pour chaque point on a utilisé les variables de codage (entre -1 et +1) de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour les analyses statistiques. Les échelles des variables de décision sont alors identiques, ce qui permet d'avoir une bonne interprétation de l'importance de chacune d'elles sur la variable réponse en examinant les valeurs des coefficients de l'équation de prédiction. X étant la variable de codage associée à la variable x , alors :

$$c = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \quad (1.8)$$

$$d = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \quad (1.9)$$

$$X = \frac{x - c}{d} \quad (1.10)$$

$$x = c + (d * X) \quad (1.11)$$

On a ensuite fait des transformations, jusqu'à obtenir les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté les plus élevés; on a ainsi fait les analyses statistiques du niveau macro d'ARP avec DispM^{130} et $\text{CoûtM}^{1/4}$.

Tableau 3.11 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₁:TRev	1,75681E-8	1	1,75681E-8	0,31	0,5817
X₂:PCRI	0,0000319766	1	0,0000319766	557,88	0,0000
X₃:QCRI	7,343E-7	1	7,343E-7	12,81	0,0007
X₄:PCRG	0,00000505145	1	0,00000505145	88,13	0,0000
X₅:QCRG	2,49288E-7	1	2,49288E-7	4,35	0,0410
X₁X₁	0,000100056	1	0,000100056	1745,63	0,0000
X₁X₂	0,00000173405	1	0,00000173405	30,25	0,0000
X₁X₃	1,46007E-8	1	1,46007E-8	0,25	0,6155
X₁X₄	0,00000108854	1	0,00000108854	18,99	0,0000
X₁X₅	8,10351E-8	1	8,10351E-8	1,41	0,2388
X₂X₂	0,00000249033	1	0,00000249033	43,45	0,0000
X₂X₃	4,33403E-7	1	4,33403E-7	7,56	0,0077
X₂X₄	5,99334E-7	1	5,99334E-7	10,46	0,0019
X₂X₅	6,57068E-8	1	6,57068E-8	1,15	0,2883
X₃X₃	0,00000110121	1	0,00000110121	19,21	0,0000
X₃X₄	1,45669E-9	1	1,45669E-9	0,03	0,8738
X₃X₅	4,66944E-11	1	4,66944E-11	0,00	0,9773
X₄X₄	8,14879E-7	1	8,14879E-7	14,22	0,0004
X₄X₅	5,4096E-7	1	5,4096E-7	9,44	0,0031
X₅X₅	8,94949E-11	1	8,94949E-11	0,00	0,9686
Erreur totale	0,00000372569	65	5,73182E-8		
Total (corr.)	0,000162798	85			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP montre que tous les facteurs principaux (sauf TRev qui est gardé car étant dans des interactions significatives) ainsi que certaines interactions doubles sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression des interactions non significatives on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9761 et un R^2 ajusté de 0,9714. Enfin, on a fait l'analyse des résidus avec le graphique des résidus sur échelle de probabilité normale et le graphique des résidus versus valeurs prédites.

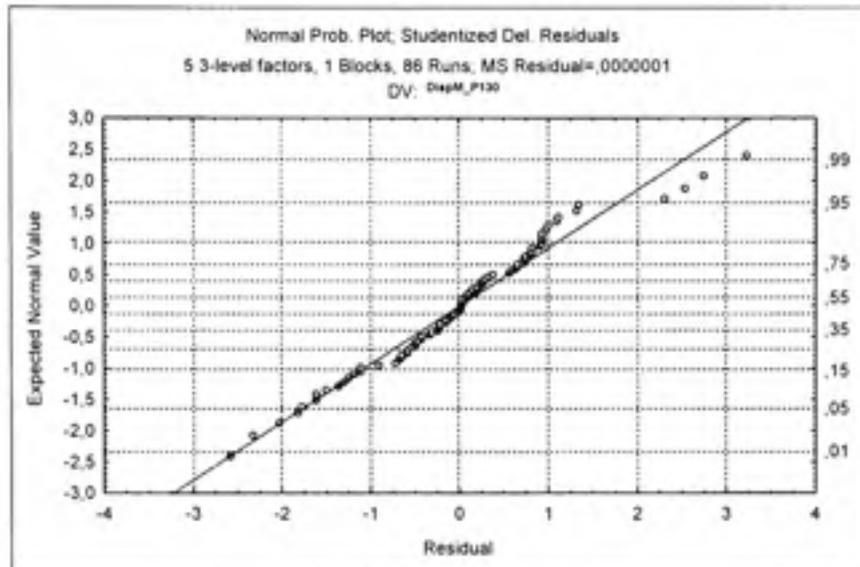


Figure 3.7 Graphique des résidus sur échelle de probabilité normale pour la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP.

La distribution gaussienne des résidus est acceptable : l'alignement des points le long de la droite est satisfaisant.

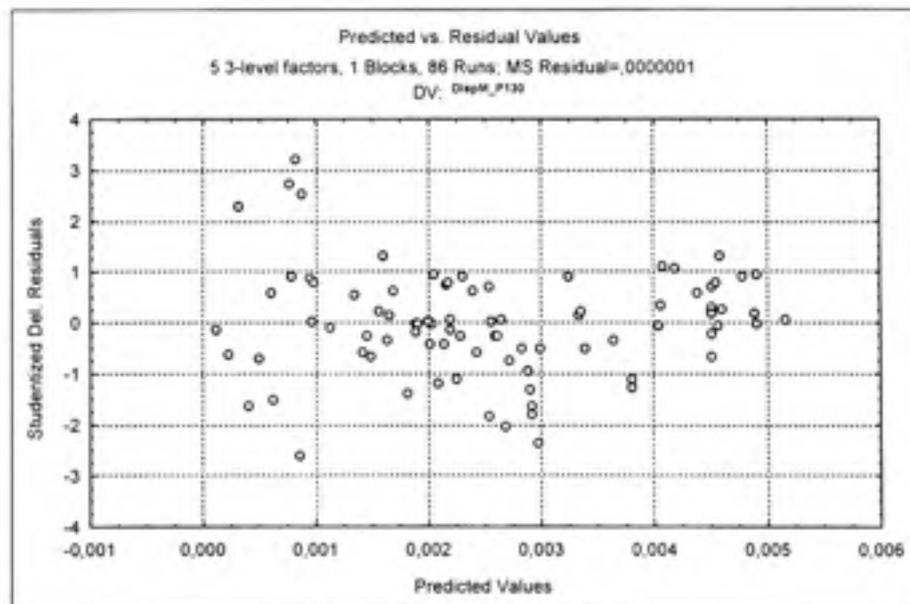


Figure 3.8 Graphique des résidus versus valeurs prédites pour la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP.

Les résidus ont un comportement acceptable : on constate une absence de tendance entre les résidus et les valeurs prédites et on constate aussi qu'il n'existe pas d'observation suspecte car toutes les valeurs t se situent entre $-3,5$ et $+3,5$. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\begin{aligned} \text{DispM} = & (10^{-7}(449,281 + 1,8037X_1 + 76,9519X_2 + 11,6611X_3 + 30,5852X_4 + 6,79444X_5 \\ & - 226,918X_1^2 - 21,9472X_1X_2 + 17,3889X_1X_3 - 35,785X_2^2 - 10,9722X_2X_3 \\ & + 12,9028X_2X_4 - 23,7906X_2^3 - 20,4628X_3^4 - 12,2583X_4X_5) + \varepsilon) \end{aligned} \quad (1.12)$$

ε étant l'erreur expérimentale.

Tableau 3.12 Analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'ARP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₁:TRev	14,0863	1	14,0863	25318,73	0,0000
X₂:PCRI	0,464501	1	0,464501	834,89	0,0000
X₃:QCRI	0,0228413	1	0,0228413	41,05	0,0000
X₄:PCRG	1,81225	1	1,81225	3257,33	0,0000
X₅:QCRG	0,135551	1	0,135551	243,64	0,0000
X₁X₁	4,50549	1	4,50549	8098,15	0,0000
X₁X₂	0,0017598	1	0,0017598	3,16	0,0800
X₁X₃	0,000359103	1	0,000359103	0,65	0,4247
X₁X₄	0,00765625	1	0,00765625	13,76	0,0004
X₁X₅	0,00388337	1	0,00388337	6,98	0,0103
X₂X₂	0,00513098	1	0,00513098	9,22	0,0034
X₂X₃	0,0032852	1	0,0032852	5,90	0,0179
X₂X₄	0,0000540225	1	0,0000540225	0,10	0,7563
X₂X₅	0,0000413878	1	0,0000413878	0,07	0,7859
X₃X₃	0,000872404	1	0,000872404	1,57	0,2150
X₃X₄	0,0000424669	1	0,0000424669	0,08	0,7832
X₃X₅	0,0000143136	1	0,0000143136	0,03	0,8731
X₄X₄	0,000504431	1	0,000504431	0,91	0,3445
X₄X₅	0,000531302	1	0,000531302	0,95	0,3321
X₅X₅	0,00513676	1	0,00513676	9,23	0,0034
Erreur totale	0,0361634	65	0,00055636		
Total (corr.)	21,2222	85			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'ARP montre que tous les facteurs principaux ainsi que certaines interactions doubles sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression des interactions non significatives on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9979 et un R^2 ajusté de 0,9976. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\begin{aligned} \text{CoûtM} = & (10^{-3}(31002,9 - 510,743X_1 + 92,7463X_2 + 20,5667X_3 + 183,194X_4 + 50,1019X_5 \\ & + 480,543X_1^2 + 14,5833X_1X_4 + 10,3861X_1X_5 - 17,2679X_2^2 - 9,55278X_2X_3 \\ & + 15,2432X_2^2) + \varepsilon)^4 \end{aligned} \quad (1.13)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics (qui fait appel aux fonctions de désirabilité pour l'optimisation multicritère) a donné les résultats suivants :

Tableau 3.13 Optimisation multicritère du niveau macro d'ARP

Macro ARP	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max	DGlob3/1 max	DGlob4/1 max
	0,9603	878838	0,8159	0,8614	0,8351	0,8184	0,8155
DispM			0,9582	0,9594	0,9601	0,9602	0,9603
CoûtM (\$)			890774	913266	932814	939231	943232
AugRevM				71634	35359	1427	3843
R ²	0,9761	0,9979					
R ² ajusté	0,9714	0,9976					
TRev opt	1824	1970	1915	1897	1878	1866	1860
PCRI opt	5,96	4,22	5,29	5,69	5,97	6	6
QCRI opt	2,97	3,52	3	2,99	2,97	2,98	2,98
PCRG opt	3,93	2,07	2	2,83	3,54	3,76	3,9
QCRG opt	1,05	1,9	1,69	1,3	1	1	1

Le tableau des résultats de l'optimisation conjointe du niveau macro de la stratégie ARP donne les valeurs optimales de chacune des mesures de performance et les niveaux optimaux respectifs de chacune des variables de décision. La maximisation des désirabilités globales du niveau macro d'ARP identifie DGlob4/1 comme sa meilleure combinaison et la valeur du TRev opt correspondant soit **1860 jours** sera utilisé comme input de son niveau micro.

Ci-dessous, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales du niveau macro d'ARP montre que la disponibilité moyenne maximale est atteinte pour DGlob4/1 alors que le coût moyen de maintenance minimal n'a pas encore atteint sa valeur maximale.

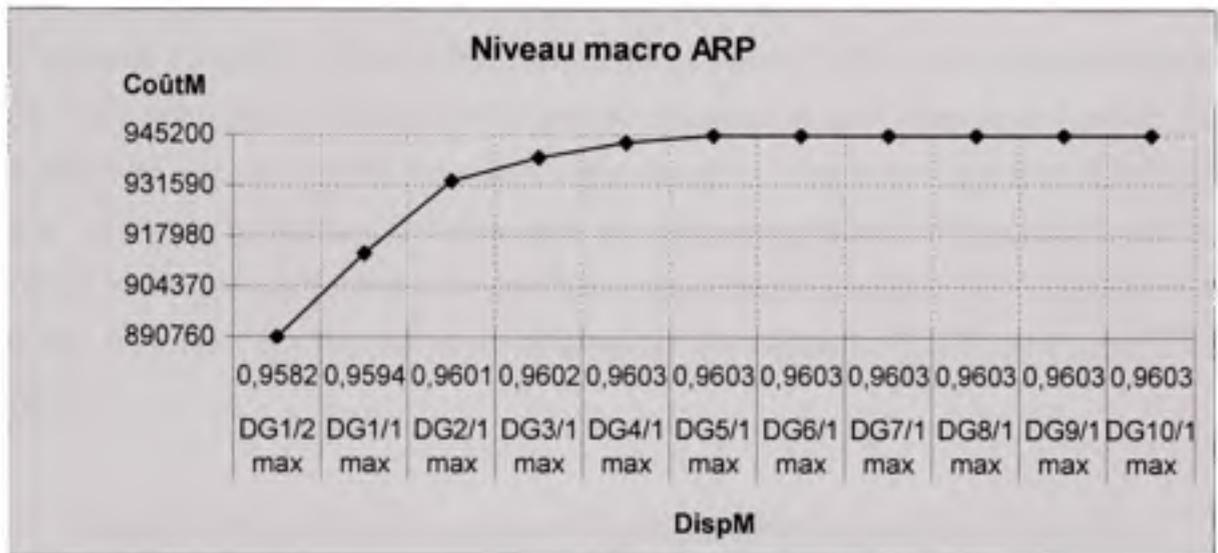


Figure 3.9 Optimisation multicritère du niveau macro d'ARP.

3.4.3 Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type âge

On a fixé le domaine d'expérience du niveau micro après plusieurs essais pilotes afin de cibler la zone convenable pour l'optimisation conjointe des variables de réponse.

Tableau 3.14 Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau micro

Variable de décision	Limite inférieure	Point milieu	Limite supérieure
PCV (x_7)	35	40	45
QCV (x_8)	15	30	45

Le domaine d'expérience utilisé pour l'optimisation du niveau micro est défini par les niveaux respectifs de chacune des variables de décision. Les modèles du premier ordre avec et sans interaction présentant une grande courbure et n'ajustant pas bien les valeurs obtenues par simulation, alors on a adopté les modèles du deuxième ordre avec interaction. On a donc utilisé un plan factoriel complet 3^2 , pour un total de 13 essais permettant de séparer tous les effets principaux et toutes les interactions doubles, tout en améliorant la précision de l'estimation des effets. Après la simulation du niveau micro d'ARP, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis on a utilisé les variables de codage de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour les analyses statistiques. On a ensuite fait des transformations, jusqu'à obtenir les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté les plus élevés; on a ainsi fait les analyses statistiques du niveau macro d'ARP avec DispM^{100} et CoûtM .

Tableau 3.15 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X_7 :PCV	0,0000234393	1	0,0000234393	2964,01	0,0000
X_8 :QCV	0,00000125858	1	0,00000125858	159,15	0,0000
X_7X_7	0,00000525675	1	0,00000525675	664,74	0,0000
X_7X_8	7,93881E-7	1	7,93881E-7	100,39	0,0000
X_8X_8	4,66622E-9	1	4,66622E-9	0,59	0,4675
Erreur totale	5,53558E-8	7	7,90798E-9		
Total (corr.)	0,0000318413	12			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP montre que tous les facteurs principaux ainsi que l'interaction sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon avec un coefficient de détermination R^2 de 0,9981 et un R^2 ajusté de 0,9972. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{DispM} = (10^{-4}(44,6743 + 19,765X_7 + 4,58X_8 - 13,9526X_7^2 - 4,455X_7X_8) + \varepsilon)^{100} \quad (1.14)$$

Tableau 3.16 Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X_7 :PCV	1,1346E9	1	1,1346E9	20437,83	0,0000
X_8 :QCV	3,16297E7	1	3,16297E7	569,76	0,0000
X_7X_7	1,64343E8	1	1,64343E8	2960,37	0,0000
X_7X_8	54990,3	1	54990,3	0,99	0,3528
X_8X_8	1,11266E7	1	1,11266E7	200,43	0,0000
Erreur totale	388601	7	55514,5		
Total (corr.)	1,33381E9	12			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP montre que tous les facteurs principaux sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression de l'interaction non significative on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9997 et un R^2 ajusté de 0,9995. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{CoûtM} = 409487 + 13751,3X_7 + 2296X_8 - 7713,86X_7^2 + 2007,14X_8^2 + \varepsilon \quad (1.15)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics a donné les résultats suivants :

Tableau 3.17 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP

Micro ARP	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max	DGlob3/1 max	DGlob4/1 max
	0,9487	387792	0,5218	0,6092	0,5105	0,4664	0,4431
DispM			0,9405	0,9439	0,9464	0,9473	0,9478
CoûtM (\$)			393502	399920	406264	409380	411201
AugRevM				260273	189752	67479	37398
R^2	0,9981	0,9997					
R^2 ajusté	0,9972	0,9995					
PCV opt	43,11	35,03	35,32	36,76	38,53	39,63	40,42
QCV opt	32,46	26,99	43,43	40,51	36,96	34,81	33,33

Tableau 3.17 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP (suite)

Micro ARP	DGlob5/1 max	DGlob6/1 max	DGlob7/1 max	DGlob8/1 max	DGlob9/1 max	DGlob10/1 max
Micro ARP	0,4301	0,423	0,4195	0,4182	0,4182	0,4182
DispM	0,9481	0,9483	0,9484	0,9485	0,9485	0,9485
CoûtM (\$)	412364	413143	413677	414050	414144	414144
AugRevM	22369	14909	7310	7471	-94	0
PCV opt	41,02	41,48	41,84	42,11	42,17	42,17
QCV opt	32,28	31,56	31,10	30,87	30,85	30,85

Le tableau des résultats de l'optimisation du niveau micro d'ARP donne les valeurs optimales de chacune des mesures de performance et les niveaux optimaux respectifs de chacune des variables de décision. La maximisation des désirabilités globales du niveau micro d'ARP identifie DGlob8/1 comme sa meilleure combinaison. Ci-dessous, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales du niveau micro d'ARP montre que la disponibilité moyenne maximale possible est atteinte pour DGlob8/1 alors que le coût moyen de maintenance minimal n'a pas encore atteint sa valeur maximale.

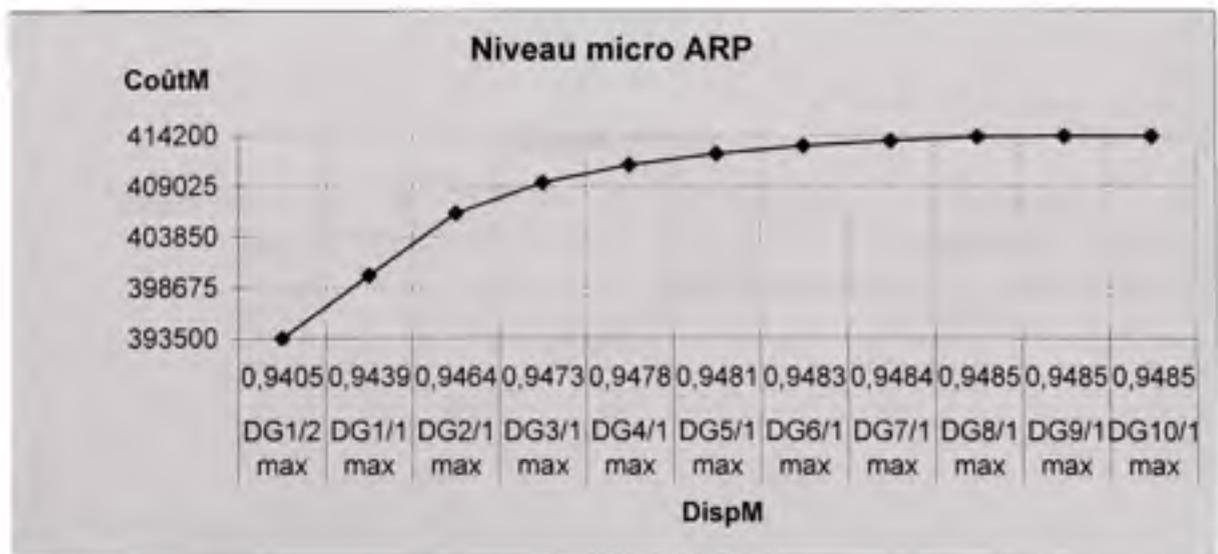


Figure 3.10 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP.

3.5 Analyse de sensibilité des modèles de la maintenance des locomotives

3.5.1 Analyse de sensibilité du modèle du niveau macro de la maintenance

Comme première partie de la deuxième étape de validation du modèle, on a effectué l'analyse de sensibilité du modèle du niveau macro en augmentant puis diminuant les valeurs des paramètres importants utilisés dans le modèle.

Tableau 3.18 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois

Niveau macro	DispM max	CoûtM min (\$)
ARP	0,9603	878838
ARP_3ER	0,9626	1195692

L'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois provoque une augmentation de la DispM max, une augmentation du CoûtM mini et globalement une diminution de RevM annuel potentielle estimée sommairement à 136 446\$. La figure 3.11 ci-dessous illustre la variation de la DispM et du CoûtM lorsqu'on augmente le nombre d'équipe de deux à trois.

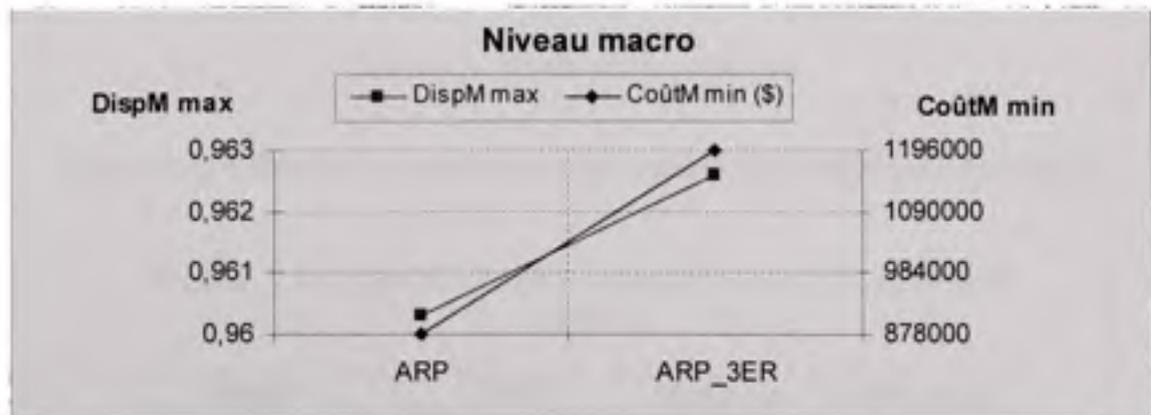


Figure 3.11 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois.

Tableau 3.19 Effets de la modification des durées de maintenance préventive

DRI	DRG	DispM max	CoûtM min (\$)
DRI = 36,6667	DRG = 51,6667	0,9664	851829
DRI = 45	DRG = 60	0,9603	878838
DRI = 53,3333	DRG = 68,3333	0,9547	892643

L'augmentation des durées de maintenance préventive provoque une diminution de la DispM max et une augmentation du CoûtM mini, tandis qu'une diminution de ces paramètres provoque un effet contraire. La figure 3.12 ci-dessous illustre les variations de la DispM et du CoûtM lorsqu'on augmente ou diminue les durées de maintenance préventive.

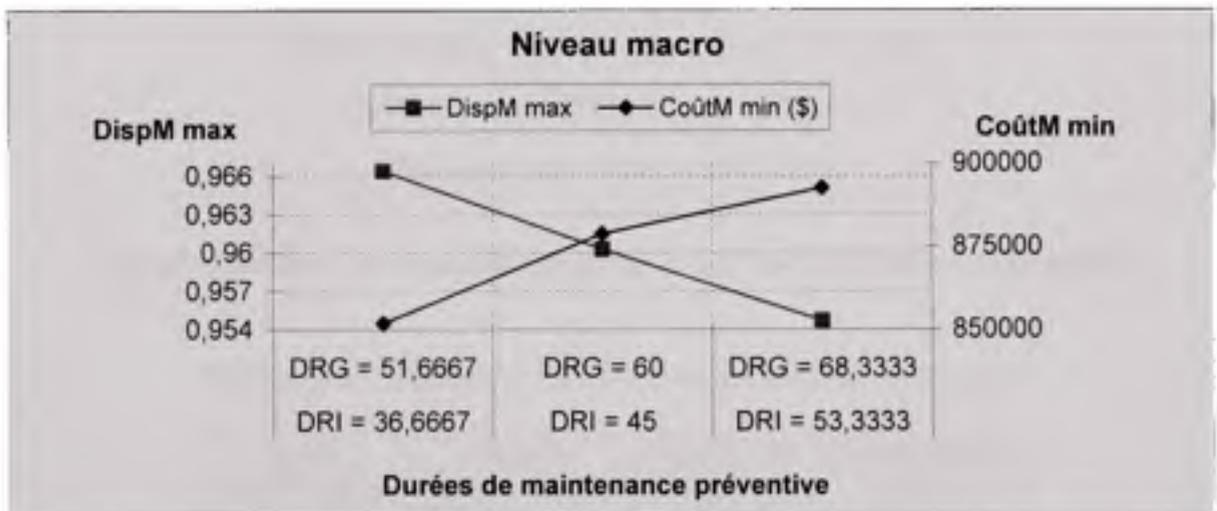


Figure 3.12 Effets de la modification des durées de maintenance préventive.

Tableau 3.20 Effets de la modification des durées de maintenance corrective

DRICN	DRGC	DispM max	CoûtM min (\$)
DRICN = 61,6667	DRGC = 76,6667	0,9611	859556
DRICN = 70	DRGC = 85	0,9603	878838
DRICN = 78,3333	DRGC = 93,3333	0,9593	890593

L'augmentation des durées de maintenance corrective provoque une diminution de la DispM max et une augmentation du CoûtM min, tandis qu'une diminution de ces paramètres provoque un effet contraire. La figure 3.13 ci-dessous illustre les variations de la DispM et du CoûtM lorsqu'on augmente ou diminue les durées de maintenance corrective.

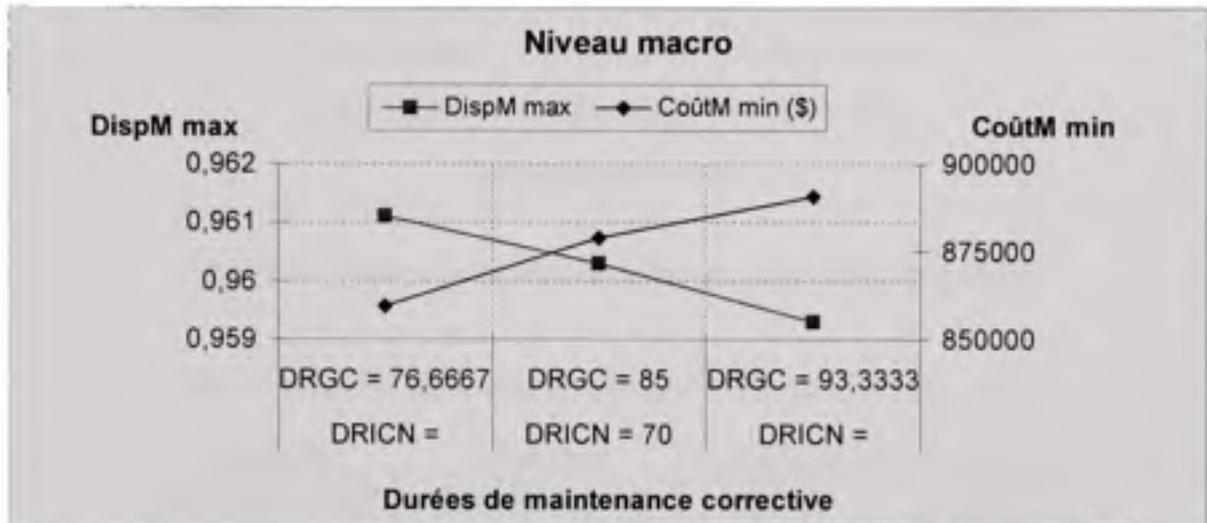


Figure 3.13 Effets de la modification des durées de maintenance corrective.

Tableau 3.21 Effets de la modification des coûts de commande

CtCRI	CtCRG	DispM max	CoûtM min (\$)
CtCRI = 2000	CtCRG = 2500	0,9603	867872
CtCRI = 4000	CtCRG = 5000	0,9603	878838
CtCRI = 8000	CtCRG = 10000	0,9603	894820

L'augmentation des coûts de commande d'équipements provoque une augmentation du CoûtM mini, tandis qu'une diminution de ces paramètres provoque un effet contraire. La figure 3.14 ci-dessous illustre la variation du CoûtM lorsqu'on augmente ou diminue les coûts de commande.

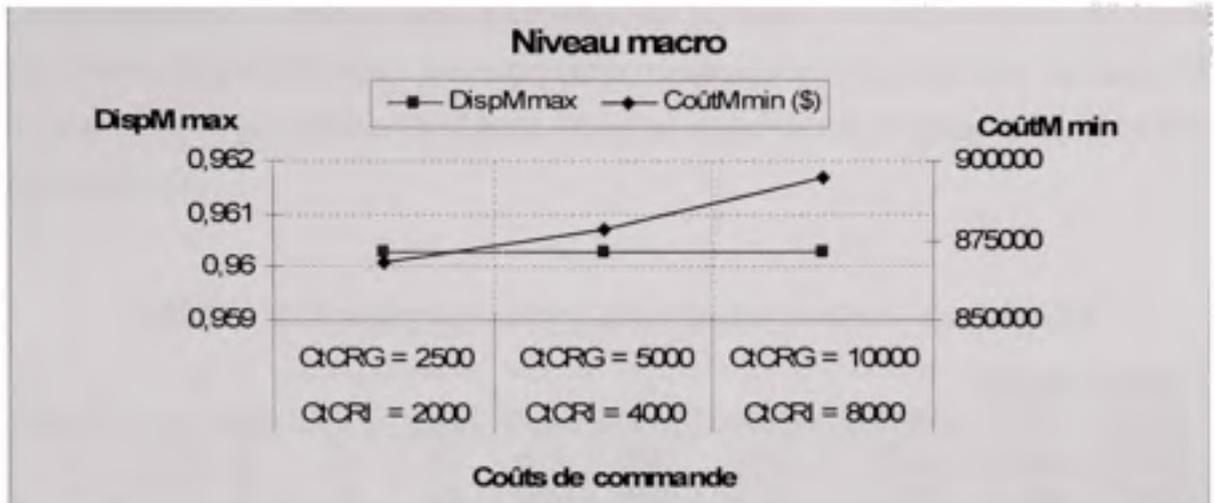


Figure 3.14 Effets de la modification des coûts de commande.

Tableau 3.22 Effets de la modification des coûts d'achat d'équipements

CtAECRI	CtAECRG	DispM max	CoûtM min (\$)
CtAECRI = 33000	CtAECRG = 81000	0,9603	748352
CtAECRI = 44000	CtAECRG = 108000	0,9603	878838
CtAECRI = 55000	CtAECRG = 135000	0,9603	1002430

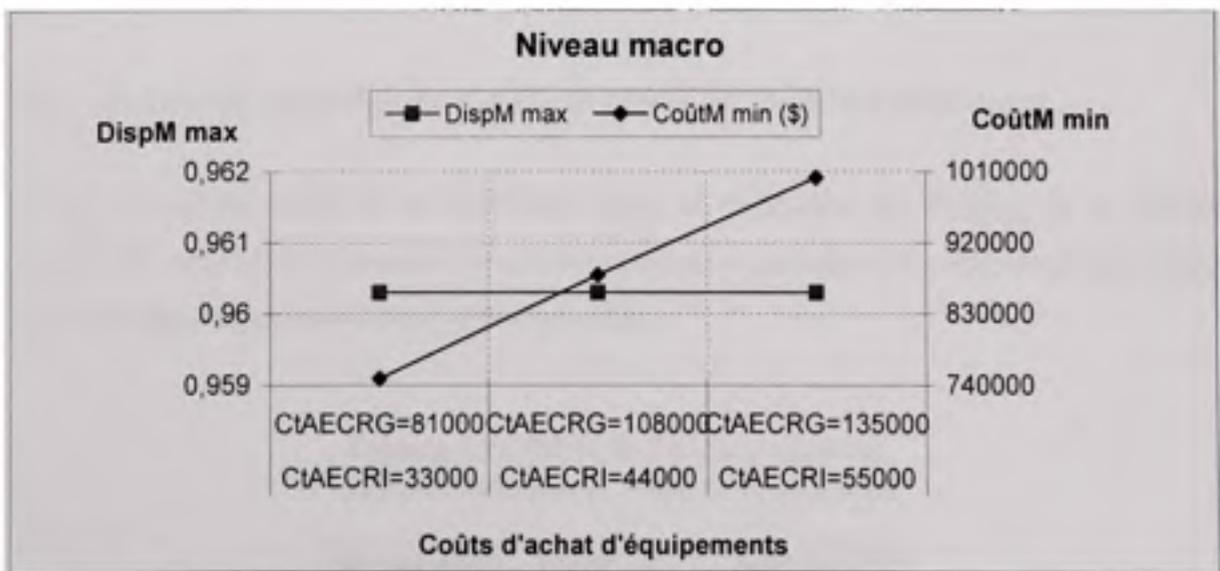


Figure 3.15 Effets de la modification des coûts d'achat d'équipements.

L'augmentation des coûts d'achat d'équipements provoque une augmentation du CoûtM mini, tandis qu'une diminution de ces paramètres provoque un effet contraire. La figure 3.15 ci-dessus illustre la variation du CoûtM lorsqu'on augmente ou diminue les coûts d'achat d'équipements.

Tableau 3.23 Synthèse de l'analyse de sensibilité du niveau macro d'ARP

NBER	DRI	DRG	DRICN	DRGC	CtCRI	CtCRG	CtAECRI	CtAECRG	DispM max	CoûtM min (\$)
2	45	60	70	85	4000	5000	44000	108000	0,9603	878838
3	45	60	70	85	4000	5000	44000	108000	0,9626	1195692
2	53,33	68,33	70	85	4000	5000	44000	108000	0,9547	892643
2	36,67	51,67	70	85	4000	5000	44000	108000	0,9664	851829
2	45	60	78,33	93,33	4000	5000	44000	108000	0,9593	890593
2	45	60	61,67	76,67	4000	5000	44000	108000	0,9611	859556
2	45	60	70	85	8000	10000	44000	108000	0,9603	894820
2	45	60	70	85	2000	2500	44000	108000	0,9603	867872
2	45	60	70	85	4000	5000	55000	135000	0,9603	1002430
2	45	60	70	85	4000	5000	33000	81000	0,9603	748352

L'analyse de sensibilité du niveau macro d'ARP montre qu'en modifiant les valeurs des paramètres, les résultats du modèle évoluent dans le sens attendu.

3.5.2 Analyse de sensibilité du modèle du niveau micro de la maintenance

Comme deuxième partie de la deuxième étape de validation du modèle, on a effectué l'analyse de sensibilité du modèle du niveau micro en augmentant puis diminuant les valeurs des paramètres importants utilisés dans le modèle.

Tableau 3.24 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de visite de deux à trois

Niveau micro	DispM max	CoûtM min (\$)
ARP	0,9487	387792
ARP_3EV	0,9535	544345

L'augmentation du nombre d'équipes du niveau micro de deux à trois provoque une augmentation de la DispM max, une augmentation du CoûtM mini et globalement une augmentation de RevM annuel potentielle estimée sommairement à 197 150\$. La figure 3.16 ci-dessous illustre la variation de la DispM et du CoûtM lorsqu'on augmente le nombre d'équipe de deux à trois.

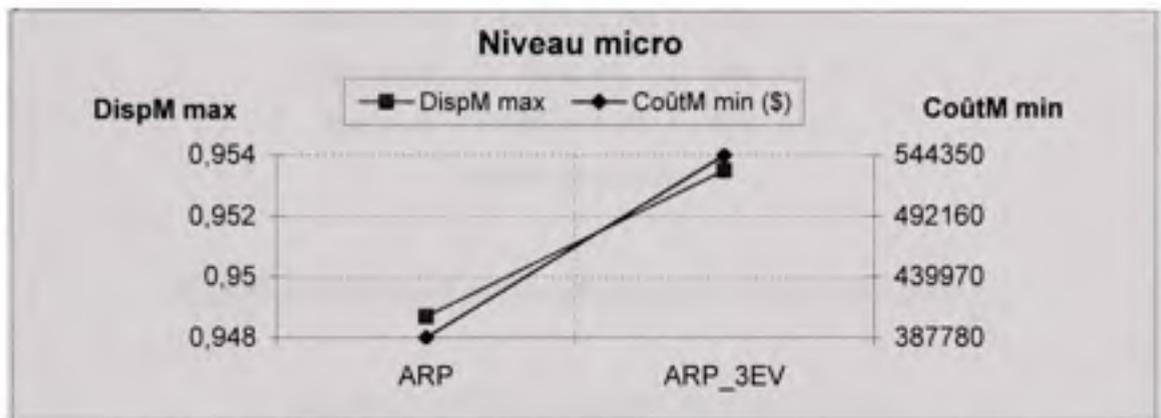


Figure 3.16 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de visite de deux à trois.

Tableau 3.25 Effets de la modification des durées des visites

DVL	DVC	DVG	DispM max	CoûtM min (\$)
DVL = 1	DVC = 2,25	DVG = 2,375	0,9728	331476
DVL = 1,75	DVC = 3	DVG = 3,125	0,9487	387792
DVL = 2,5	DVC = 3,75	DVG = 3,875	0,9381	443855

L'augmentation des durées des visites provoque une diminution de la DispM max et une augmentation du CoûtM mini, tandis qu'une diminution de ces paramètres provoque un effet contraire. La figure 3.17 ci-dessous illustre les variations de la DispM et du CoûtM lorsqu'on augmente ou diminue les durées de visites.

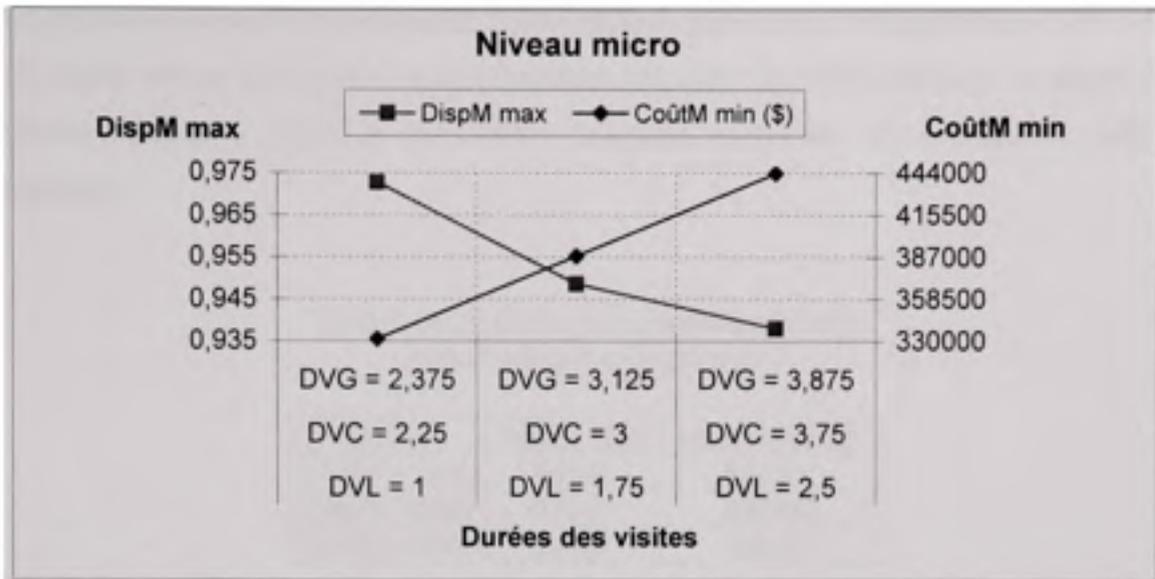


Figure 3.17 Effets de la modification des durées des visites.

Tableau 3.26 Effets de la modification du coût de commande

CtCV	DispM max	CoûtM min (\$)
CtCV = 1500	0,9487	382895
CtCV = 3000	0,9487	387792
CtCV = 6000	0,9487	392788

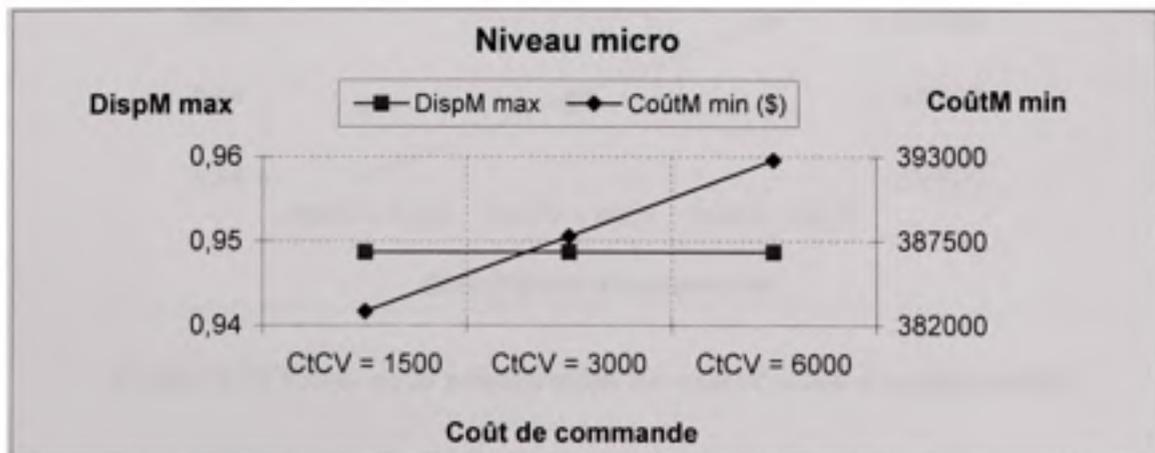


Figure 3.18 Effets de la modification du coût de commande.

L'augmentation du coût de commande d'équipements provoque une augmentation du CoûtM mini, tandis qu'une diminution de ce paramètre provoque un effet contraire. La figure 3.18 ci-dessus illustre la variation du CoûtM lorsqu'on augmente ou diminue le coût de commande.

Tableau 3.27 Effets de la modification du coût d'achat d'équipements

CtAEV	DispM max	CoûtM min (\$)
CtAEV = 3000	0,9487	336552
CtAEV = 4000	0,9487	387792
CtAEV = 5000	0,9487	438304

L'augmentation du coût d'achat d'équipements provoque une augmentation du CoûtM mini, tandis qu'une diminution de ce paramètre provoque un effet contraire. La figure 3.19 ci-dessous illustre la variation du CoûtM lorsqu'on augmente ou diminue le coût d'achat d'équipements.

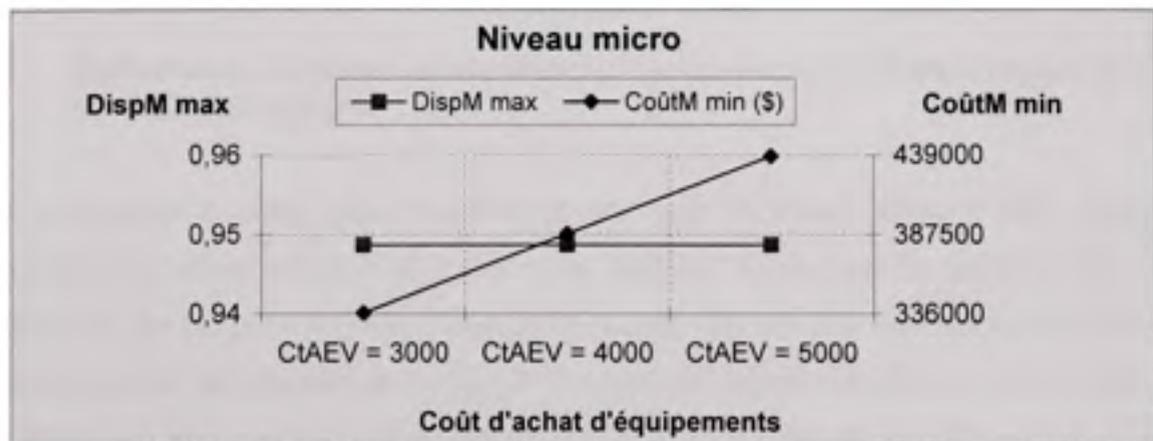


Figure 3.19 Effets de la modification du coût d'achat d'équipements.

Tableau 3.28 Synthèse de l'analyse de sensibilité du niveau micro

NbEV	DVL	DVC	DVG	CtCV	CtAEV	DispM max	CoûtM min (\$)
2	1,75	3	3,125	3000	4000	0,9487	387792
3	1,75	3	3,125	3000	4000	0,9535	544345
2	2,5	3,75	3,875	3000	4000	0,9381	443855
2	1	2,25	2,375	3000	4000	0,9728	331476
2	1,75	3	3,125	6000	4000	0,9487	392788
2	1,75	3	3,125	1500	4000	0,9487	382895
2	1,75	3	3,125	3000	5000	0,9487	438304
2	1,75	3	3,125	3000	3000	0,9487	336552

L'analyse de sensibilité du niveau micro montre qu'en modifiant les valeurs des paramètres, les résultats du modèle évoluent dans le sens attendu. Vue l'augmentation significative de la DispM due à l'augmentation du nombre d'équipes du niveau micro de deux à trois sans une très grande augmentation du CoûtM, le tout résultant globalement en une augmentation de RevM annuel potentielle estimée sommairement à 197 150\$, on a décidé de faire l'optimisation conjointe multicritère détaillée du niveau micro d'ARP avec trois équipes. Transrail devra ainsi mettre sur pied une troisième équipe du niveau micro qui sera outillée et pour qui on construira un espace de travail convenable avec les aménagements nécessaires.

3.6 Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type âge avec trois équipes

On a conservé le même plan d'expérience que pour le niveau micro d'ARP. Après la simulation du niveau micro d'ARP avec trois équipes, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis on a utilisé les variables de codage de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour l'analyse statistique. On a ensuite fait des transformations, jusqu'à obtenir les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté les plus élevés; on a ainsi fait les analyses statistiques du niveau macro d'ARP avec DispM⁶⁰ et CoûtM.

Tableau 3.29 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP avec trois équipes

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X ₇ :PCV	0,0022704	1	0,0022704	9377,83	0,0000
X ₈ :QCV	0,000176768	1	0,000176768	730,14	0,0000
X ₇ X ₇	0,000269776	1	0,000269776	1114,30	0,0000
X ₇ X ₈	0,000101526	1	0,000101526	419,35	0,0000
X ₈ X ₈	1,60667E-7	1	1,60667E-7	0,66	0,4421
Erreur totale	0,00000169472	7	2,42103E-7		
Total (corr.)	0,00287202	12			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP avec trois équipes montre que tous les facteurs principaux ainsi que l'interaction sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon avec un coefficient de détermination R^2 de 0,9994 et un R^2 ajusté de 0,9990. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{DispM} = (10^{-7}(47,0866 + 19,4525X_7 + 5,42783X_8 - 9,97507X_7^2 - 5,038X_7X_8) + \varepsilon)^{1/60} \quad (1.16)$$

Tableau 3.30 Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP avec trois équipes

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X ₇ :PCV	1,4686E9	1	1,4686E9	6618,95	0,0000
X ₈ :QCV	4,41622E7	1	4,41622E7	199,04	0,0000
X ₇ X ₇	1,36057E8	1	1,36057E8	613,21	0,0000
X ₇ X ₈	350464	1	350464	1,58	0,2491
X ₈ X ₈	1,46017E7	1	1,46017E7	65,81	0,0001
Erreur totale	1,55314E6	7	221877		
Total (corr.)	1,65117E9	12			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP avec trois équipes montre que tous les facteurs principaux sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression de l'interaction non significative on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9988 et un R^2 ajusté de 0,9983. Le tableau des

coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{CoûtM} = 567488 + 15645X_7 + 2713X_8 - 7018,69X_7^2 - 6,98492 * 10^{-10} X_7 X_8 + 2299,31X_8^2 + \varepsilon \quad (1.17)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics a donné les résultats suivants :

Tableau 3.31 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP avec trois équipes

Micro	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max	DGlob3/1 max	DGlob4/1 max
ARP_3EV	0,9535	544345	0,5478	0,6153	0,497	0,4381	0,4038
DispM			0,9422	0,9457	0,9491	0,9507	0,9516
CoûtM (\$)			549837	555892	563546	567806	570373
AugRevM				268479	259037	121241	68028
R ²	0,9994	0,9988					
R ² ajusté	0,999	0,9983					
PCV opt	44,47	35,02	35	36,07	37,65	39,27	40,48
QCV opt	42,47	25,36	45	45	44,88	39,81	36,02

Tableau 3.31 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP avec trois équipes (suite)

Micro	DGlob5/1 max	DGlob6/1 max	DGlob7/1 max	DGlob8/1 max	DGlob9/1 max	DGlob10/1 max
ARP_3EV	0,3821	0,368	0,3592	0,355	0,3527	0,3527
DispM	0,9521	0,9525	0,9529	0,9532	0,9532	0,9532
CoûtM (\$)	572097	573350	574341	575326	575329	575332
AugRevM	37495	30122	30384	22547	-3	-3
PCV opt	41,47	42,37	43,31	45	45	45
QCV opt	32,9	30,09	27,18	22,2	22,33	22,46

Le tableau des résultats de l'optimisation du niveau micro d'ARP avec trois équipes donne les valeurs optimales de chacune des mesures de performance et les niveaux optimaux respectifs de chacune des variables de décision. La maximisation des désirabilités globales du niveau micro d'ARP avec trois équipes identifie DGlob8/1 comme sa meilleure

combinaison. Ci-dessous, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales du niveau micro avec trois équipes montre que la disponibilité moyenne maximale est atteinte pour DGlob8/1 et en même temps le coût moyen de maintenance minimal atteint sa valeur maximale.

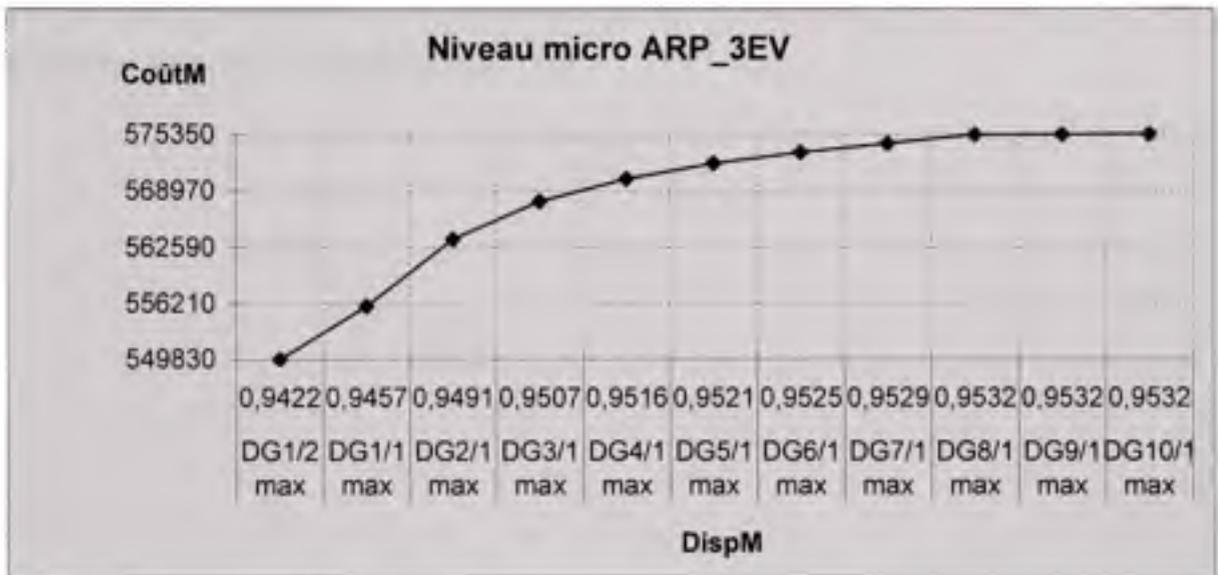


Figure 3.20 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP avec trois équipes.

Vue l'augmentation de RevM annuel potentielle de 197 150\$ due à l'augmentation du nombre d'équipes du niveau micro de deux à trois, on a décidé de prendre trois équipes pour le niveau micro de chacune des autres stratégies de maintenance.

3.7 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, on a déterminé pour la stratégie ARP la valeur optimale de chacune des cinq variables de décision du niveau macro ainsi que celle des deux variables de décision du niveau micro correspondant aux valeurs optimales des deux variables de réponse. On constate que la stratégie ARP qui est celle présentement appliquée par Transrail peut être améliorée avec une augmentation de la disponibilité du niveau micro de 0,9483 à 0,9532 et une augmentation de la disponibilité du niveau macro de 0,9510 à 0,9603 provoquant une

augmentation des coûts de maintenance respectivement de 426 440 à 575 326\$ et de 920 737 à 943 232\$. Ce qui entraîne globalement une augmentation de revenu moyen annuel potentielle de l'optimisation multicritère d'ARP (niveau macro + niveau micro) maximale de 942 444\$, soit 1,38% du revenu moyen annuel net actuel de Transrail. Dans le chapitre suivant on explorera l'application à la maintenance des locomotives de Transrail d'une extension de la stratégie de maintenance de type âge afin de diminuer l'impact du personnel de maintenance sur la disponibilité moyenne.

CHAPITRE 4

STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE CONJUGUANT AVEC LA DISPONIBILITÉ DU PERSONNEL DE MAINTENANCE

4.1 Introduction

Partant du constat qu'une équipe de révision n'est pas toujours disponible lorsqu'une locomotive arrive à l'atelier pour une opération de révision, on a eu l'idée d'explorer la conjugaison de la disponibilité de cette ressource avec la décision concernant le moment d'envoyer une locomotive en révision. Il s'agit en fait de voir si cette mesure permettra de relaxer un peu ce goulot d'étranglement et par conséquent d'augmenter d'avantage la DispM de Transrail; l'ajout d'une troisième équipe ayant été écarté au chapitre précédent car entraînant une diminution du revenu moyen annuel net de Transrail.

On commence l'application de la stratégie de maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance par la définition de cette nouvelle stratégie de maintenance. Ensuite, on abordera la modélisation de son niveau macro. Enfin, on s'étalera sur l'optimisation conjointe multicritère de chacun des deux niveaux macro et micro.

4.2 Définition de la stratégie de maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance (ARP-PA)

Cette stratégie de maintenance qu'on propose consiste à améliorer celle de type âge en étalant le moment de maintenance sur un intervalle de temps afin de diminuer l'impact de la disponibilité du personnel de maintenance sur la disponibilité moyenne annuelle du parc de locomotives. Ainsi, d'une part on anticipe la maintenance lorsque toutes les équipes de maintenance (actuellement deux) sont disponibles dès que le moment «avancé» de maintenance préventive est atteint et d'autre part on la retarde lorsqu'aucune équipe de maintenance n'est disponible tant que le moment «retardé» de maintenance préventive n'est pas atteint. Après des essais pilotes et afin de bien optimiser, on a décidé de prendre comme

variable de décision supplémentaire un coefficient relatif à cet intervalle autour du moment de maintenance prévu.

4.3 Modélisation du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance

Dans le but de faciliter la compréhension de la nouvelle stratégie de maintenance proposée, on présente à la figure 4.1 ci-dessous son logigramme qui montre toute la logique suivie dans son application au niveau macro de la maintenance des locomotives. La seule différence de ce logigramme par rapport à celui d'ARP c'est que cette fois au lieu de vérifier seulement si la révision est corrective ou préventive, on vérifie plutôt si elle est corrective, préventive «avancé», préventive «normale» ou préventive «retardée». On a utilisé le langage Visual SLAM et AweSim pour programmer ce logigramme et faire les simulations (voir annexe 5). Le modèle de simulation de son niveau micro est quant à lui présenté à l'annexe 6.

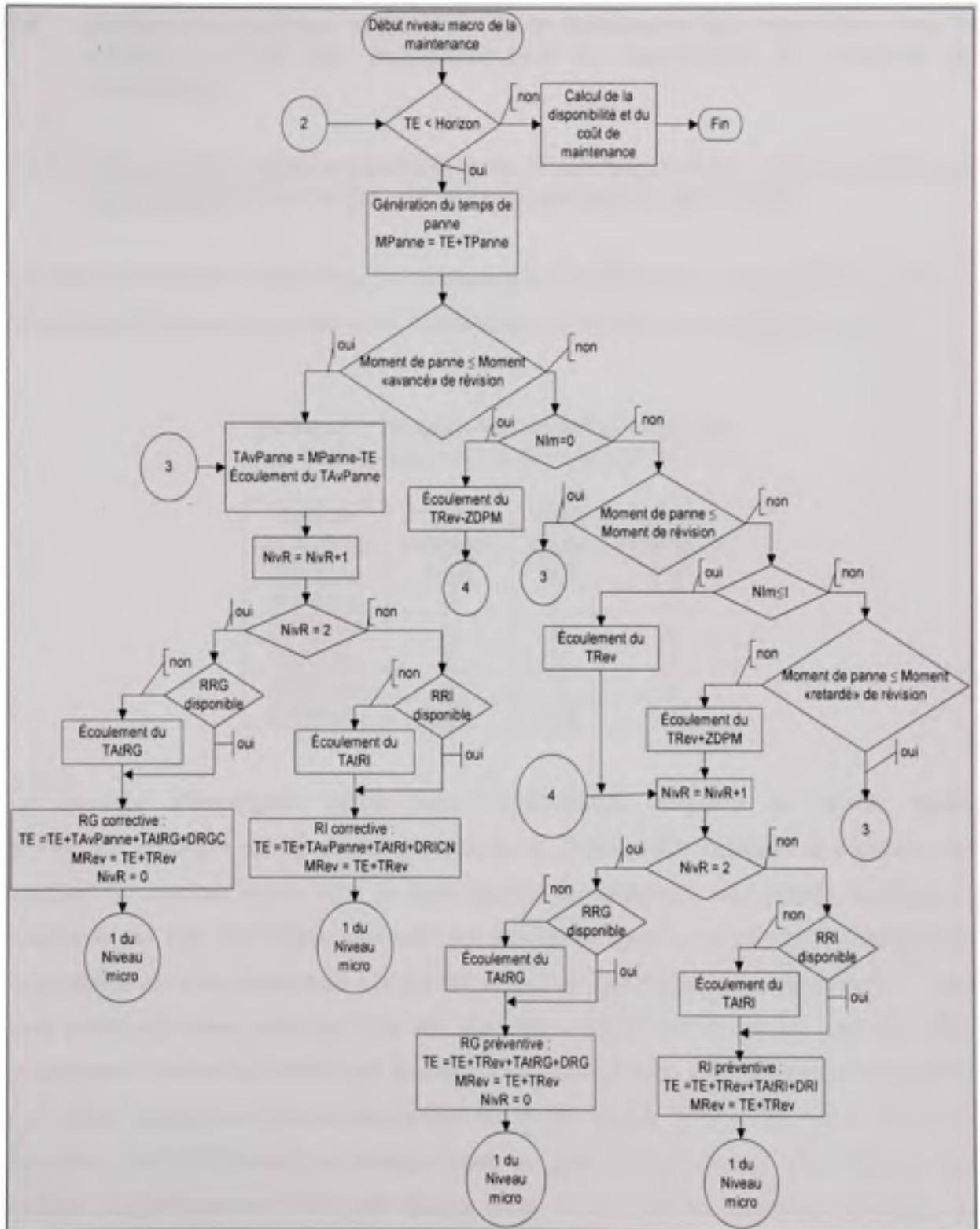


Figure 4.1 Logigramme du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance.

4.4 Optimisation conjointe multicritère de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance

4.4.1 Optimisation conjointe multicritère du niveau macro de la maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance

On a fixé le domaine d'expérience du niveau macro d'ARP-PA après plusieurs essais pilotes afin de cibler la zone convenable pour l'optimisation conjointe des variables de réponse.

Tableau 4.1 Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau macro d'ARP-PA

Variable de décision	Limite inférieure	Point milieu	Limite supérieure
TRev (x_1)	1460	1825	2190
PCRI (x_2)	4	5	6
QCRI (x_3)	2	3	4
PCRG (x_4)	2	3	4
QCRG (x_5)	1	2	3
CDPM (x_6)	0,02	0,09	0,16

Le domaine d'expérience utilisé pour l'optimisation conjointe du niveau macro d'ARP-PA est défini par les niveaux respectifs de chacune des variables de décision. Les modèles du premier ordre avec et sans interaction présentant une grande courbure et n'ajustant pas bien les valeurs obtenues par simulation, alors on a adopté les modèles du deuxième ordre avec interaction. On a donc utilisé un plan factoriel fractionnaire 3^{6-1} plus cinq points au centre, pour un total de 248 essais permettant de séparer tous les effets principaux et toutes les interactions doubles, tout en améliorant la précision de l'estimation des effets. Après avoir fait la simulation du niveau macro d'ARP-PA, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis pour chaque point on a utilisé les variables de codage de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour les analyses statistiques. DispM et CoûtM donnant des coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté satisfaisants, on les a gardés pour faire les analyses statistiques du niveau macro d'ARP-PA.

Tableau 4.2 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP-PA

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X ₁ :TRev	0,000819675	1	0,000819675	447,99	0,0000
X ₂ :PCRI	0,00040076	1	0,00040076	219,03	0,0000
X ₃ :QCRI	0,000019845	1	0,000019845	10,85	0,0012
X ₄ :PCRG	0,000358227	1	0,000358227	195,79	0,0000
X ₅ :QCRG	0,0000312928	1	0,0000312928	17,10	0,0001
X ₆ :CDPM	0,0000126114	1	0,0000126114	6,89	0,0093
X ₁ X ₁	0,00164462	1	0,00164462	898,85	0,0000
X ₁ X ₂	0,000133333	1	0,000133333	72,87	0,0000
X ₁ X ₃	0,00000564898	1	0,00000564898	3,09	0,0803
X ₁ X ₄	0,00000872676	1	0,00000872676	4,77	0,0300
X ₁ X ₅	7,5E-7	1	7,5E-7	0,41	0,5227
X ₁ X ₆	0,000474601	1	0,000474601	259,39	0,0000
X ₂ X ₂	0,0000729388	1	0,0000729388	39,86	0,0000
X ₂ X ₃	0,0000181712	1	0,0000181712	9,93	0,0019
X ₂ X ₄	2,13333E-7	1	2,13333E-7	0,12	0,7331
X ₂ X ₅	1,33333E-8	1	1,33333E-8	0,01	0,9320
X ₂ X ₆	0,00000120333	1	0,00000120333	0,66	0,4183
X ₃ X ₃	0,00000335104	1	0,00000335104	1,83	0,1773
X ₃ X ₄	4,08333E-8	1	4,08333E-8	0,02	0,8814
X ₃ X ₅	2,31481E-7	1	2,31481E-7	0,13	0,7224
X ₃ X ₆	1,79259E-7	1	1,79259E-7	0,10	0,7546
X ₄ X ₄	0,0000657972	1	0,0000657972	35,96	0,0000
X ₄ X ₅	0,0000366334	1	0,0000366334	20,02	0,0000
X ₄ X ₆	0,0000171204	1	0,0000171204	9,36	0,0025
X ₅ X ₅	0,00000404185	1	0,00000404185	2,21	0,1386
X ₅ X ₆	0,00000133333	1	0,00000133333	0,73	0,3942
X ₆ X ₆	2,57539E-7	1	2,57539E-7	0,14	0,7079
Erreur totale	0,000402532	220	0,00000182969		
Total (corr.)	0,00461899	247			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'ARP-PA montre que tous les facteurs principaux ainsi que certaines interactions doubles sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est bon et après suppression des interactions non significatives on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9091 et un R^2 ajusté de 0,9032. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\begin{aligned} \text{DispM} = 10^{-4} & (9631,6 + 22,4938X_1 + 15,7284X_2 + 3,5X_3 + 14,8704X_4 + 4,39506X_5 \\ & - 2,79012X_6 - 54,4442X_1^2 - 11,1111X_1X_2 - 2,84259X_1X_3 + 20,963X_1X_4 \\ & - 11,5923X_2^2 - 4,10185X_2X_3 - 11,0183X_3^2 - 5,82407X_4X_5 + 3,98148X_4X_6) + \varepsilon \end{aligned} \quad (1.18)$$

Tableau 4.3 Analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'ARP-PA

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₁:TRev	5,64096E11	1	5,64096E11	22235,61	0,0000
X₂:PCRI	1,94661E10	1	1,94661E10	767,32	0,0000
X₃:QCRI	8,5312E8	1	8,5312E8	33,63	0,0000
X₄:PCRG	8,92226E10	1	8,92226E10	3516,99	0,0000
X₅:QCRG	7,00042E9	1	7,00042E9	275,94	0,0000
X₆:CDPM	9,79704E7	1	9,79704E7	3,86	0,0507
X₁X₁	1,35181E11	1	1,35181E11	5328,60	0,0000
X₁X₂	5,72903E8	1	5,72903E8	22,58	0,0000
X₁X₃	2,61209E6	1	2,61209E6	0,10	0,7486
X₁X₄	2,18897E8	1	2,18897E8	8,63	0,0037
X₁X₅	1,26321E7	1	1,26321E7	0,50	0,4812
X₁X₆	4,32506E9	1	4,32506E9	170,49	0,0000
X₂X₂	1,01448E8	1	1,01448E8	4,00	0,0468
X₂X₃	6,03846E7	1	6,03846E7	2,38	0,1243
X₂X₄	349184	1	349184	0,01	0,9067
X₂X₅	201934	1	201934	0,01	0,9290
X₂X₆	1,09063E8	1	1,09063E8	4,30	0,0393
X₃X₃	2,07005E7	1	2,07005E7	0,82	0,3673
X₃X₄	1916,9	1	1916,9	0,00	0,9931
X₃X₅	78678	1	78678	0,00	0,9556
X₃X₆	1,90378E7	1	1,90378E7	0,75	0,3873
X₄X₄	1,34545E8	1	1,34545E8	5,30	0,0222
X₄X₅	1,76346E7	1	1,76346E7	0,70	0,4053
X₄X₆	6,92785E7	1	6,92785E7	2,73	0,0999
X₅X₅	1,42875E8	1	1,42875E8	5,63	0,0185
X₅X₆	1,8213E6	1	1,8213E6	0,07	0,7890
X₆X₆	3,50583E8	1	3,50583E8	13,82	0,0003
Erreur totale	5,58119E9	220	2,5369E7		
Total (corr.)	8,28916E11	247			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'ARP-PA montre que tous les facteurs principaux (sauf CDPM qui est gardé car étant dans des interactions significatives) ainsi que certaines interactions doubles sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif

du modèle statistique est très bon et après suppression des interactions non significatives on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9930 et un R^2 ajusté de 0,9926. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\begin{aligned} \text{CoûtM} = & 934890 - 59009,1X_1 + 10961,8X_2 + 2294,81X_3 + 23468,2X_4 + 6573,62X_5 \\ & + 777,66X_6 + 49235,1X_1^2 - 2303,19X_1X_2 - 5,82077 * 10^{-10} X_1X_3 - 1423,67X_1X_4 \\ & - 2,32831 * 10^{-10} X_1X_5 + 6328,26X_1X_6 - 1327,77X_2^2 - 4,07454 * 10^{-10} X_2X_3 \\ & - 5,82077 * 10^{-10} X_2X_4 + 1004,91X_2X_6 + 2,32831 * 10^{-10} X_3^2 + 4,65661 * 10^{-10} X_3X_6 \\ & - 1532,2X_4^2 - 1,74623 * 10^{-10} X_4X_5 + 2,32831 * 10^{-10} X_4X_6 + 1620,41X_5^2 \\ & + 8,14907 * 10^{-10} X_5X_6 + 2526,73X_6^2 + \varepsilon \end{aligned} \quad (1.19)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics a donné les résultats suivants :

Tableau 4.4 Optimisation multicritère du niveau macro d'ARP-PA

Macro	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max
ARP-PA	0,9637	882252	0,8786	0,9086	0,9028
DispM			0,9602	0,9624	0,9637
CoûtM (\$)			889784	907454	921680
AugRevM				154894	87744
R²	0,9091	0,9930			
R² ajusté	0,9032	0,9926			
TRev opt	1909	2080	1987	1972	1991
PCRI opt	5,29	4,16	4,52	4,85	4,87
QCRI opt	2,86	2,49	4	4	4
PCRG opt	3,12	2,16	2	2,34	3,02
QCRG opt	2,11	1,13	1,89	2,47	1,49
CDPM opt	0,0541	0,0712	0,0683	0,0872	0,1506

Le tableau de l'optimisation du niveau macro d'ARP-PA donne les valeurs optimales de chacune des mesures de performance et les niveaux optimaux respectifs de chacune des variables de décision. La maximisation des désirabilités globales du niveau macro d'ARP-PA identifie DGlob2/1 comme sa meilleure combinaison et la valeur du TRev opt correspondant

soit **1991 jours** sera utilisé comme input de son niveau micro. Ci-dessous, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales du niveau macro de la stratégie ARP-PA montre que la disponibilité moyenne maximale est atteinte pour DGlob2/1 et en même temps le coût moyen de maintenance minimal atteint sa valeur maximale.

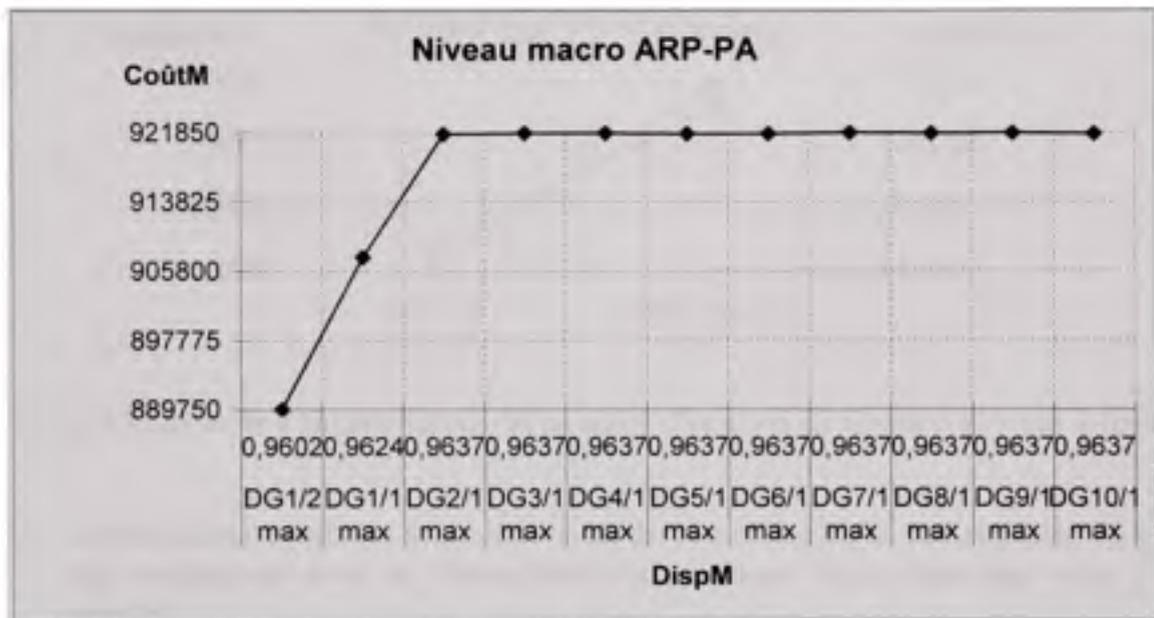


Figure 4.2 Optimisation multicritère du niveau macro d'ARP-PA.

On n'a pas jugé nécessaire de refaire l'analyse de sensibilité pour le modèle du niveau macro d'ARP-PA car les paramètres sont les mêmes que ceux du modèle du niveau macro d'ARP. On a juste décidé de voir si une augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois serait bénéfique.

Tableau 4.5 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois

Niveau macro	DispM max	CoûtM min (\$)
ARP-PA	0,9637	882252
ARP-PA_3ER	0,9644	1197020

L'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois provoque une augmentation de la DispM max, une augmentation du CoûtM mini et globalement une diminution de RevM annuel potentielle estimée sommairement à 259 861\$. La figure 4.3 ci-dessous illustre la variation de la DispM et du CoûtM lorsqu'on augmente le nombre d'équipe de deux à trois.

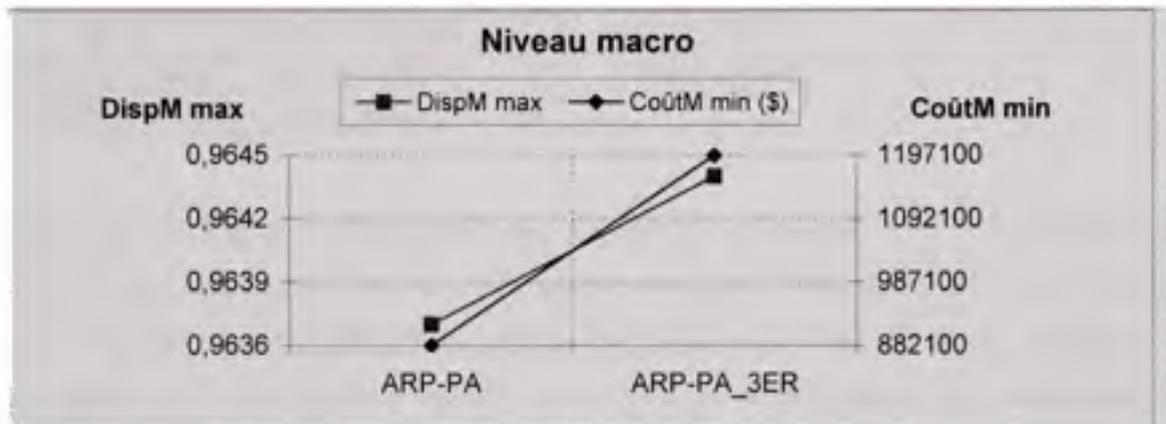


Figure 4.3 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois.

4.4.2 Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance avec trois équipes

On a conservé le même plan factoriel que pour le niveau micro d'ARP. Après avoir fait la simulation du niveau micro avec trois équipes, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis pour chaque point on a utilisé les variables de codage de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour l'analyse statistique. On a ensuite fait des transformations, jusqu'à obtenir les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté les plus élevés; on a ainsi fait les analyses statistiques du niveau macro d'ARP avec DispM⁴⁰ et CoûtM.

Tableau 4.6 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₇:PCV	0,0133298	1	0,0133298	1706,11	0,0000
X₈:QCV	0,00113143	1	0,00113143	144,81	0,0000
X₇X₇	0,00250374	1	0,00250374	320,46	0,0000
X₇X₈	0,000760022	1	0,000760022	97,28	0,0000
X₈X₈	0,00000961239	1	0,00000961239	1,23	0,3040
Erreur totale	0,0000546909	7	0,00000781299		
Total (corr.)	0,0183542	12			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes montre que tous les facteurs principaux ainsi que l'interaction sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon avec un coefficient de détermination R^2 de 0,9965 et un R^2 ajusté de 0,9947. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{DispM} = (10^{-2}(13,3515 + 4,71342X_7 + 1,37322X_8 - 3,08193X_7^2 - 1,37842X_7X_8) + \varepsilon)^{1/40} \quad (1.20)$$

Tableau 4.7 Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₇:PCV	1,02702E9	1	1,02702E9	8967,88	0,0000
X₈:QCV	3,73152E7	1	3,73152E7	325,84	0,0000
X₇X₇	1,66461E8	1	1,66461E8	1453,53	0,0000
X₇X₈	606062	1	606062	5,29	0,0550
X₈X₈	1,19101E7	1	1,19101E7	104,00	0,0000
Erreur totale	801651	7	114522		
Total (corr.)	1,23471E9	12			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes montre que tous les facteurs principaux sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression de l'interaction non significative on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9989 et un R^2 ajusté de 0,9983. Le tableau des

coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{CoûtM} = 566495 + 13083,2X_7 + 2493,83X_8 - 7763,4X_7^2 + 4,07454 \cdot 10^{-10} X_7 X_8 + 2076,6X_8^2 + \varepsilon \quad (1.21)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics a donné les résultats suivants :

Tableau 4.8 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes

Micro	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max	DGlob3/1 max	DGlob4/1 max
ARP-PA_3EV	0,954	544932	0,5555	0,6243	0,5099	0,4538	0,422
DispM			0,9396	0,9436	0,9482	0,9503	0,9516
CoûtM (\$)			550143	554752	561438	564988	567236
AugRevM				309145	354131	161171	99722
R ²	0,9965	0,9989					
R ² ajusté	0,9947	0,9983					
PCV opt	44,01	35	35	35,83	37,23	38,42	39,51
QCV opt	32,68	21,66	44,83	45	45	42,21	38,54

Tableau 4.8 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes (suite)

Micro	DGlob5/1 max	DGlob6/1 max	DGlob7/1 max	DGlob8/1 max	DGlob9/1 max	DGlob10/1 max
ARP-PA_3EV	0,403	0,3926	0,3918	0,3909	0,3901	0,3893
DispM	0,9524	0,9537	0,9537	0,9537	0,9537	0,9537
CoûtM (\$)	568749	571066	571066	571066	571066	571101
AugRevM	61238	99653	0	0	0	-35
PCV opt	40,43	45	45	45	45	44,92
QCV opt	35,43	20,95	20,94	20,93	20,92	21,22

Le tableau des résultats de l'optimisation du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes donne les valeurs optimales de chacune des mesures de performance et les niveaux optimaux respectifs de chacune des variables de décision. La maximisation des désirabilités globales du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes identifie DGlob6/1 comme sa meilleure

combinaison. Ci-dessous, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes montre que la disponibilité moyenne maximale est atteinte pour DGlob6/1 et en même temps le coût moyen de maintenance minimal atteint sa valeur maximale.

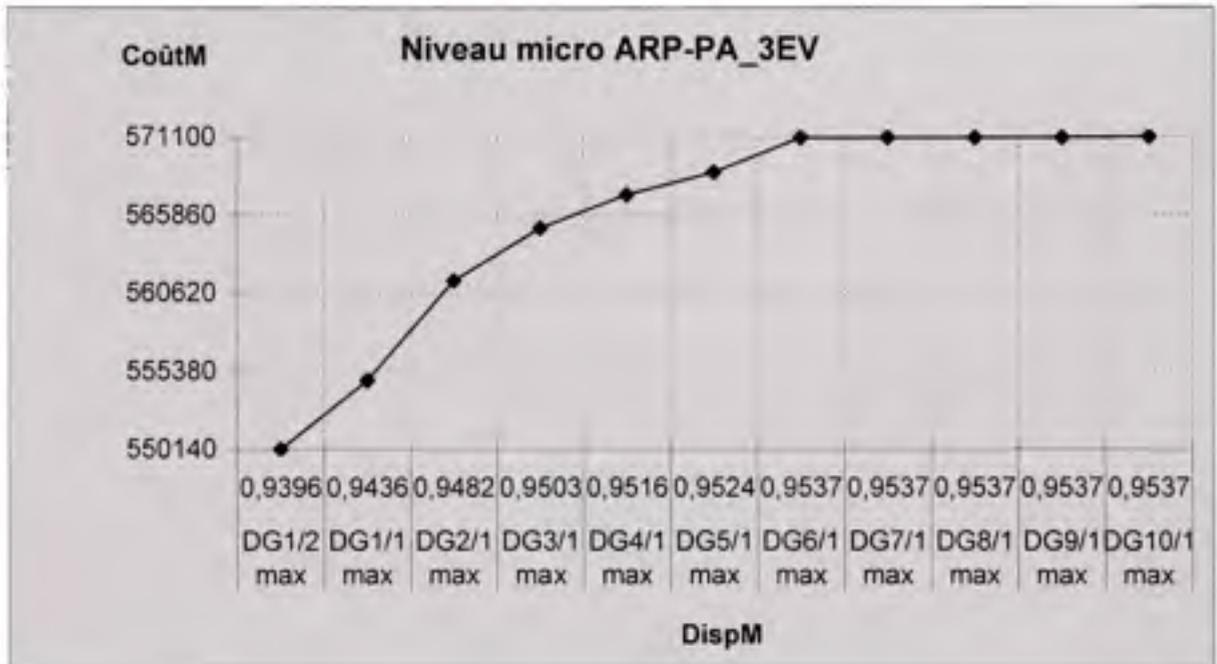


Figure 4.4 Optimisation multicritère du niveau micro d'ARP-PA avec trois équipes.

4.5 Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, on a déterminé pour la stratégie ARP-PA la valeur optimale de chacune des six variables de décision du niveau macro ainsi que celle des deux variables de décision du niveau micro correspondant aux valeurs optimales des deux variables de réponse. On constate que l'optimisation de la stratégie ARP-PA permet d'améliorer d'avantage les performances de Transrail que celle de la stratégie ARP avec une augmentation de la disponibilité du niveau micro de 0,9483 à 0,9537 et une augmentation de la disponibilité du niveau macro de 0,9510 à 0,9637 provoquant une augmentation des coûts de maintenance respectivement de 426 440 à 571 066\$ et de 920 737 à 921 680\$. Ce qui entraîne

globalement une augmentation de revenu moyen annuel potentielle de l'optimisation multicritère d'ARP-PA (niveau macro + niveau micro) maximale de 1 274 166\$, soit 1,87% du revenu moyen annuel net actuel de Transrail. Le prochain chapitre s'étendra sur l'application de la stratégie de type bloc à la maintenance des locomotives de Transrail.

CHAPITRE 5

STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC

5.1 Introduction

La stratégie BRP étant plus facile à appliquer que la stratégie ARP, il serait donc intéressant de voir s'il est possible d'améliorer les performances de Transrail en appliquant cette stratégie à la maintenance de ses locomotives. L'application de la stratégie BRP comprendra la modélisation de son niveau macro et l'optimisation conjointe multicritère de chacun des deux niveaux macro et micro.

5.2 Modélisation du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc

Afin de faciliter la compréhension de l'application de la stratégie de type bloc au niveau macro de la maintenance des locomotives de Transrail, on a établi son logigramme présenté à la figure 5.1. La seule différence de ce logigramme par rapport à celui d'ARP c'est que cette fois suite à une panne, le niveau de la révision et la planification de la prochaine révision préventive restent inchangés et on procède à une révision intermédiaire corrective. On a utilisé le langage Visual SLAM et AweSim pour programmer ce logigramme et faire les simulations (voir annexe 7). Le modèle de simulation de son niveau micro est quant à lui présenté à l'annexe 8.

5.3 Optimisation conjointe multicritère de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc

5.3.1 Optimisation conjointe multicritère du niveau macro de la maintenance de type bloc

On a fixé le domaine d'expérience du niveau macro de BRP après plusieurs essais pilotes afin de cibler la zone convenable pour l'optimisation conjointe des variables de réponse.

Tableau 5.1 Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau macro de BRP

Variable de décision	Limite inférieure	Point milieu	Limite supérieure
TRev (x_1)	1277,5	1642,5	2007,5
PCRI (x_2)	5	6	7
QCRI (x_3)	2	3	4
PCRG (x_4)	2	3	4
QCRG (x_5)	1	2	3

Le domaine d'expérience utilisé pour l'optimisation conjointe du niveau macro de BRP est défini par les niveaux respectifs de chacune des variables de décision. Les modèles du premier ordre avec et sans interaction présentant une grande courbure et n'ajustant pas bien les valeurs obtenues par simulation, alors on a adopté les modèles du deuxième ordre avec interaction. On a donc utilisé un plan factoriel fractionnaire 3^{5-1} plus cinq points au centre, pour un total de 86 essais permettant de séparer tous les effets principaux et toutes les interactions doubles, tout en améliorant la précision de l'estimation des effets. Après avoir fait la simulation du niveau macro de BRP, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis pour chaque point on a utilisé les variables de codage de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour les analyses statistiques. On a ensuite fait des transformations, jusqu'à obtenir les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté les plus élevés; on a ainsi fait les analyses statistiques du niveau macro d'ARP avec DispM^{100} et $\text{CoûtM}^{1/2}$.

Tableau 5.2 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro de BRP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X ₁ :TRev	0,0000226683	1	0,0000226683	338,81	0,0000
X ₂ :PCRI	0,000100502	1	0,000100502	1502,16	0,0000
X ₃ :QCRI	0,0000032086	1	0,0000032086	47,96	0,0000
X ₄ :PCRG	0,00000303977	1	0,00000303977	45,43	0,0000
X ₅ :QCRG	1,17227E-7	1	1,17227E-7	1,75	0,1902
X ₁ X ₁	0,00164143	1	0,00164143	24533,63	0,0000
X ₁ X ₂	1,04006E-7	1	1,04006E-7	1,55	0,2169
X ₁ X ₃	4,82562E-7	1	4,82562E-7	7,21	0,0092
X ₁ X ₄	4,66944E-7	1	4,66944E-7	6,98	0,0103
X ₁ X ₅	1,00278E-9	1	1,00278E-9	0,01	0,9029
X ₂ X ₂	0,0000133105	1	0,0000133105	198,95	0,0000
X ₂ X ₃	0,00000117	1	0,00000117	17,49	0,0001
X ₂ X ₄	4,61494E-7	1	4,61494E-7	6,90	0,0108
X ₂ X ₅	3,25201E-8	1	3,25201E-8	0,49	0,4882
X ₃ X ₃	8,58955E-7	1	8,58955E-7	12,84	0,0006
X ₃ X ₄	2,209E-9	1	2,209E-9	0,03	0,8564
X ₃ X ₅	2,66944E-9	1	2,66944E-9	0,04	0,8423
X ₄ X ₄	6,80104E-7	1	6,80104E-7	10,17	0,0022
X ₄ X ₅	5,92387E-7	1	5,92387E-7	8,85	0,0041
X ₅ X ₅	6,36475E-8	1	6,36475E-8	0,95	0,3330
Erreur totale	0,00000434885	65	6,69054E-8		
Total (corr.)	0,00189637	85			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro de BRP montre que tous les facteurs principaux (sauf QCRG qui est gardé car X₄X₅ est significative) ainsi que certaines interactions doubles sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression des interactions non significatives on a un coefficient de détermination R² de 0,9976 et un R² ajusté de 0,9971.

Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\begin{aligned} \text{DispM} = & (10^{-5}(1395,44 + 64,7907X_1 + 136,424X_2 + 24,3759X_3 + 23,7259X_4 + 4,65926X_5 \\ & - 918,705X_1^2 + 11,5778X_1X_2 - 11,3889X_1X_4 - 82,3166X_2^2 - 18,0278X_2X_3 \\ & + 11,3222 X_2X_4 - 20,5721X_3^2 - 18,2555X_4^2 - 12,8278X_4X_5) + \varepsilon)^{1000} \end{aligned} \quad (1.22)$$

Tableau 5.3 Analyse de la variance du coût moyen du niveau macro de BRP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X ₁ :TRev	64391,7	1	64391,7	63042,89	0,0000
X ₂ :PCRI	1913,76	1	1913,76	1873,67	0,0000
X ₃ :QCRI	32,9285	1	32,9285	32,24	0,0000
X ₄ :PCRG	6249,88	1	6249,88	6118,97	0,0000
X ₅ :QCRG	395,504	1	395,504	387,22	0,0000
X ₁ X ₁	49774,1	1	49774,1	48731,48	0,0000
X ₁ X ₂	10,4739	1	10,4739	10,25	0,0021
X ₁ X ₃	0,555522	1	0,555522	0,54	0,4635
X ₁ X ₄	0,255362	1	0,255362	0,25	0,6188
X ₁ X ₅	25,942	1	25,942	25,40	0,0000
X ₂ X ₂	29,5581	1	29,5581	28,94	0,0000
X ₂ X ₃	10,1846	1	10,1846	9,97	0,0024
X ₂ X ₄	0,149382	1	0,149382	0,15	0,7034
X ₂ X ₅	1,27238	1	1,27238	1,25	0,2685
X ₃ X ₃	4,63953	1	4,63953	4,54	0,0369
X ₃ X ₄	0,170156	1	0,170156	0,17	0,6845
X ₃ X ₅	0,0381551	1	0,0381551	0,04	0,8473
X ₄ X ₄	0,482265	1	0,482265	0,47	0,4944
X ₄ X ₅	0,25368	1	0,25368	0,25	0,6199
X ₅ X ₅	25,5581	1	25,5581	25,02	0,0000
Erreur totale	66,3907	65	1,02139		
Total (corr.)	124684	85			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau macro de BRP montre que tous les facteurs principaux ainsi que certaines interactions doubles sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression des interactions non significatives on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9994 et un R^2 ajusté de 0,9994. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\begin{aligned} \text{CoûtM} = & (10^{-1}(9989,99 - 345,317X_1 + 59,5315X_2 + 7,80889X_3 + 107,582X_4 + 27,0631X_5 \\ & + 506,027X_1^2 - 5,39389X_1X_2 + 8,48889X_1X_3 - 12,4594X_2^2 - 5,31889X_3X_4 \\ & + 4,76167X_3^2 + 11,3444X_5^2) + \varepsilon)^2 \end{aligned} \quad (1.23)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics a donné les résultats suivants :

Tableau 5.4 Optimisation multicritère du niveau macro de BRP

Macro	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max	DGlob3/1 max	DGlob4/1 max
Macro BRP	0,9586	963811	0,9519	0,9584	0,9367	0,9275	0,9262
DispM			0,9577	0,958	0,9582	0,9585	0,9585
CoûtM (\$)			964546	970877	978978	992257	998590
AugRevM				17201	7587	10253	-6333
R ²	0,9976	0,9994					
R ² ajusté	0,9971	0,9994					
TRev opt	1653	1757	1717	1700	1684	1677	1675
PCRI opt	6,68	5,81	6,05	6,43	6,59	6,68	6,72
QCRI opt	2,76	3,74	3,18	3,24	3,27	3,25	3,25
PCRG opt	3,23	2,13	2	2	2,12	2,75	3,06
QCRG opt	1,84	1	1,12	1,46	2	1,61	1,26

Tableau 5.4 Optimisation multicritère du niveau macro de BRP (suite)

Macro	DGlob5/1 max	DGlob6/1 max	DGlob7/1 max	DGlob8/1 max	DGlob9/1 max	DGlob10/1 max
Macro BRP	0,9262	0,9262	0,9262	0,9262	0,9262	0,9262
DispM	0,9585	0,9585	0,9585	0,9585	0,9585	0,9585
CoûtM (\$)	998590	998590	998590	998590	998590	998590
AugRevM	0	0	0	0	0	0
TRev opt	1675	1675	1675	1675	1675	1675
PCRI opt	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72
QCRI opt	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
PCRG opt	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06
QCRG opt	1,26	1,26	1,27	1,24	1,26	1,24

Le tableau des résultats de l'optimisation du niveau macro de BRP donne les valeurs optimales de chacune des mesures de performance et les niveaux optimaux respectifs de chacune des variables de décision. La maximisation des désirabilités globales du niveau macro de BRP identifie DGlob3/1 comme sa meilleure combinaison et la valeur du TRev opt correspondant soit **1677 jours** sera utilisé comme input de son niveau micro. Ci-dessous, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales

de la stratégie BRP montre que la disponibilité moyenne maximale est atteinte pour DGlob3/1 alors que le coût moyen de maintenance minimal n'a pas encore atteint sa valeur maximale.

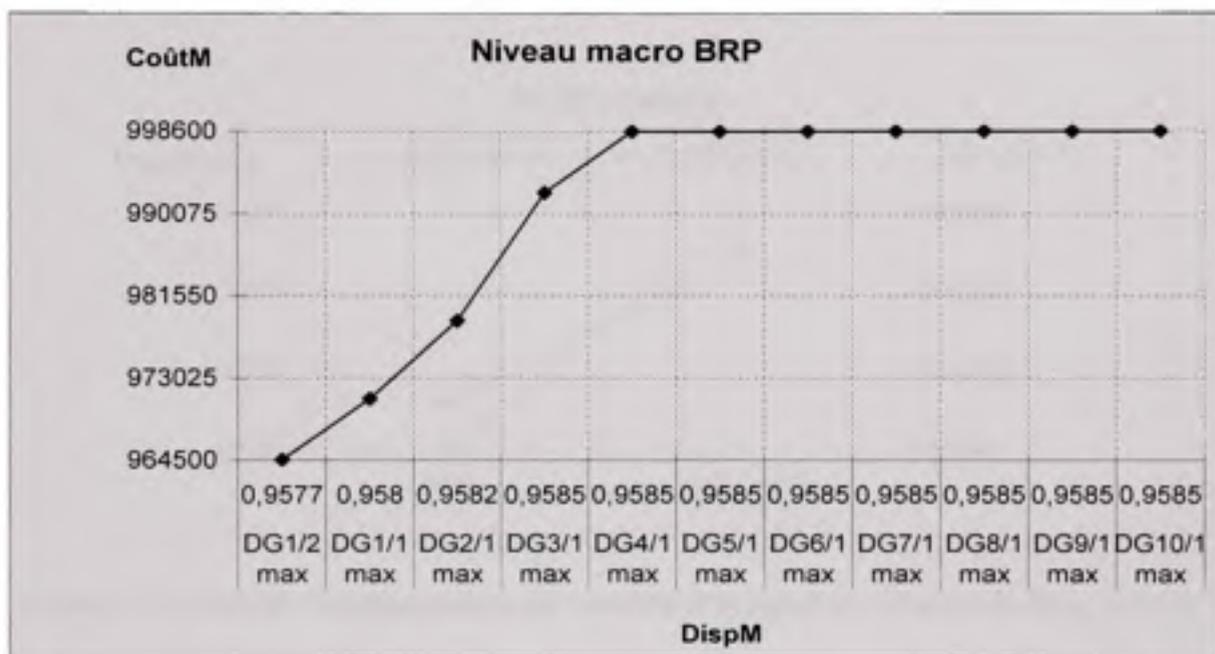


Figure 5.2 Optimisation multicritère du niveau macro de BRP.

On n'a pas jugé nécessaire de refaire l'analyse de sensibilité pour le modèle du niveau macro de BRP car les paramètres sont les mêmes que ceux du modèle du niveau macro d'ARP. On a juste décidé de voir si une augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois serait bénéfique.

Tableau 5.5 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois

Niveau macro	DispM max	CoûtM min (\$)
BRP	0,9588	943467
BRP_3ER	0,9605	1280552

L'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois provoque une augmentation de la DispM max, une augmentation du CoûtM mini et globalement une diminution de RevM annuel potentielle estimée sommairement à 259 861\$. La figure 5.3 ci-dessous illustre la variation de la DispM et du CoûtM lorsqu'on augmente le nombre d'équipe de deux à trois.

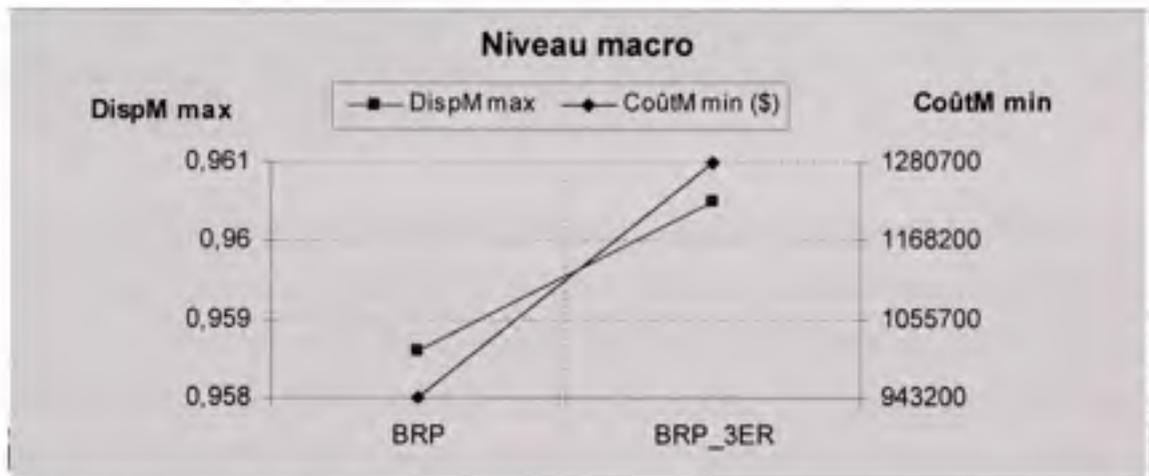


Figure 5.3 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois.

5.3.2 Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type bloc avec trois équipes

On a conservé le même plan factoriel que pour le niveau micro d'ARP. Après avoir fait la simulation du niveau micro avec trois équipes, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis pour chaque point on a utilisé les variables de codage de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour les analyses statistiques. On a ensuite fait des transformations, jusqu'à obtenir les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté les plus élevés; on a ainsi fait les analyses statistiques du niveau macro d'ARP avec DispM⁴⁰ et CoûtM.

Tableau 5.6 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro de BRP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₇:PCV	0,0100254	1	0,0100254	7521,60	0,0000
X₈:QCV	0,000885857	1	0,000885857	664,62	0,0000
X₇X₇	0,00100922	1	0,00100922	757,17	0,0000
X₇X₈	0,00049049	1	0,00049049	367,99	0,0000
X₈X₈	0,0000235666	1	0,0000235666	17,68	0,0040
Erreur totale	0,00000933018	7	0,00000133288		
Total (corr.)	0,0127566	12			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro de BRP avec trois équipes montre que tous les facteurs principaux ainsi que l'interaction sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon avec un coefficient de détermination R^2 de 0,9993 et un R^2 ajusté de 0,9987. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{DispM} = (10^{-3}(129,074 + 40,8767X_7 + 12,1508X_8 - 19,1156X_7^2 - 11,0735X_7X_8 - 2,92109X_8^2) + \varepsilon)^{1/40} \quad (1.24)$$

Tableau 5.7 Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro de BRP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₇:PCV	1,79346E9	1	1,79346E9	3396,27	0,0000
X₈:QCV	5,11E7	1	5,11E7	96,77	0,0000
X₇X₇	1,52249E8	1	1,52249E8	288,31	0,0000
X₇X₈	444889	1	444889	0,84	0,3892
X₈X₈	1,08104E7	1	1,08104E7	20,47	0,0027
Erreur totale	3,69647E6	7	528067		
Total (corr.)	2,00328E9	12			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau micro de BRP avec trois équipes montre que tous les facteurs principaux sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression de l'interaction non significative on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9979 et un R^2 ajusté de 0,9969. Le tableau des

coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{CoûtM} = 567474 + 17289X_1 + 2918,33X_2 - 7424,59X_3^2 + 2,91038 \cdot 10^{-10} X_1 X_2 + 1978,41X_3^2 + \varepsilon \quad (1.25)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics a donné les résultats suivants :

Tableau 5.8 Optimisation multicritère du niveau micro de BRP avec trois équipes

Micro	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max	DGlob3/1 max	DGlob4/1 max
BRP_3EV	0,9537	541685	0,5583	0,62	0,4977	0,4384	0,4039
DispM			0,9412	0,9444	0,9485	0,9504	0,9514
CoûtM (\$)			547316	553430	562736	567539	570435
AugRevM				244889	312291	144230	75542
R ²	0,9993	0,9979					
R ² ajusté	0,9987	0,9969					
PCV opt	44,01	35	35	35,94	38,01	39,45	40,52
QCV opt	32,68	18,94	44,24	45	41,33	37,78	35,15

Tableau 5.8 Optimisation multicritère du niveau micro de BRP avec 3 équipes (suite)

Micro	DGlob5/1 max	DGlob6/1 max	DGlob7/1 max	DGlob8/1 max	DGlob9/1 max	DGlob10/1 max
BRP_3EV	0,3822	0,3683	0,3598	0,3564	0,3564	0,3564
DispM	0,9522	0,9527	0,9531	0,9537	0,9537	0,9537
CoûtM (\$)	572387	573808	574932	576466	576466	576466
AugRevM	60799	37798	30251	45529	0	0
PCV opt	41,4	42,18	42,96	45	45	45
QCV opt	32,98	31,04	29,08	23,74	23,74	23,74

Le tableau des résultats de l'optimisation du niveau micro de BRP avec trois équipes donne les valeurs optimales de chacune des mesures de performance et les niveaux optimaux respectifs de chacune des variables de décision. La maximisation des désirabilités globales du niveau micro de BRP avec trois équipes identifie DGlob8/1 comme sa meilleure

combinaison. Ci-dessous, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales du niveau micro de BRP avec trois équipes montre que la disponibilité moyenne maximale est atteinte pour DGlob8/1 et en même temps le coût moyen de maintenance minimal atteint sa valeur maximale.

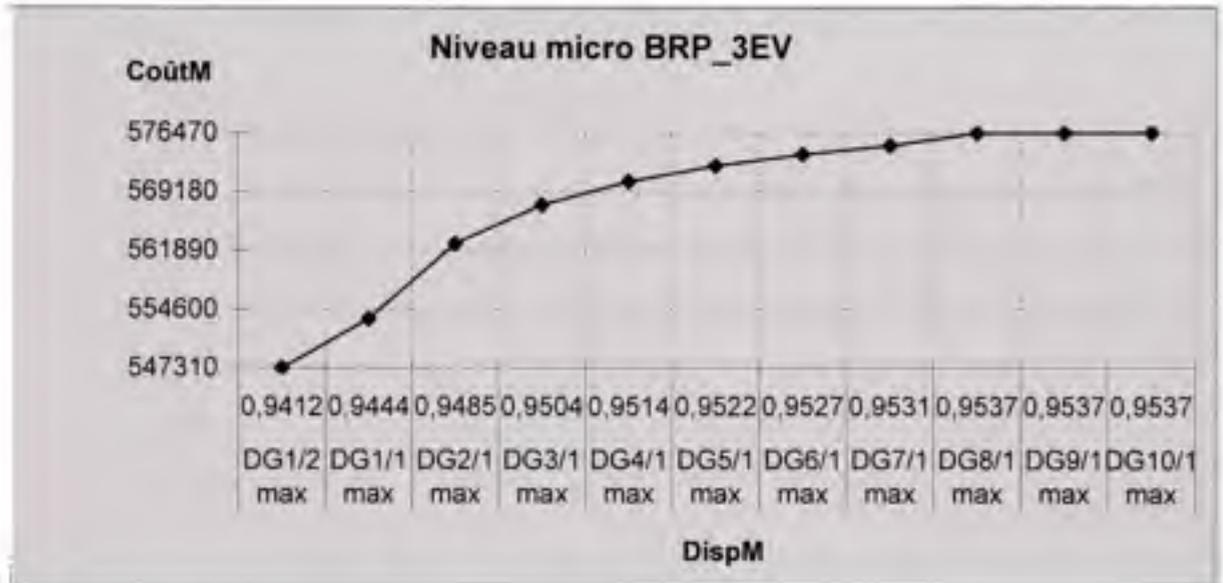


Figure 5.4 Optimisation multicritère du niveau micro de BRP avec trois équipes.

5.4 Conclusion

Dans ce cinquième chapitre, on a déterminé pour la stratégie BRP la valeur optimale de chacune des cinq variables de décision du niveau macro ainsi que celle des deux variables de décision du niveau micro correspondant aux valeurs optimales des deux variables de réponse. On constate qu'il est possible d'améliorer les performances de Transrail en appliquant la stratégie BRP avec une augmentation de la disponibilité du niveau micro de 0,9483 à 0,9537 et une augmentation de la disponibilité du niveau macro de 0,9510 à 0,9585 provoquant une augmentation des coûts de maintenance respectivement de 426 440 à 576 466\$ et de 920 737 à 992 257\$. Ce qui entraîne globalement une augmentation de revenu moyen annuel potentielle de l'optimisation multicritère de BRP (niveau macro + niveau micro) maximale de 790 309\$, soit 1,16% du revenu moyen annuel net actuel de Transrail. Le prochain

chapitre traitera l'application de la stratégie de type bloc étendu à la maintenance des locomotives de Transrail.

CHAPITRE 6

STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC ÉTENDU

6.1 Introduction

La stratégie EBRP améliorant la stratégie BRP en diminuant le gaspillage d'équipements neufs, on voudrait donc savoir si l'application de cette stratégie à la maintenance des locomotives de Transrail apportera une amélioration significative par rapport à la stratégie BRP. Surtout que cette maintenance utilise de gros équipements ayant une durée de vie pluriannuelle. L'application de la stratégie EBRP comprendra la modélisation de son niveau macro et l'optimisation conjointe multicritère de chacun des deux niveaux macro et micro.

6.2 Modélisation du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc étendu

Pour faciliter la compréhension de l'application de la stratégie de type bloc étendu au niveau macro de la maintenance des locomotives de Transrail, on a établi son logigramme présenté à la figure 6.1. La seule différence de ce logigramme par rapport à celui de BRP c'est que cette fois suite à une panne, si le moment de décision est atteint et qu'un équipement usagé de durée d'utilisation restante suffisante est disponible on procède à une révision intermédiaire corrective avec de l'usagé. Sinon, on procède à une révision intermédiaire corrective avec du neuf. On a utilisé le langage Visual SLAM et AweSim pour programmer ce logigramme et faire les simulations (voir annexe 9). Le modèle de simulation de son niveau micro est quant à lui présenté à l'annexe 10.

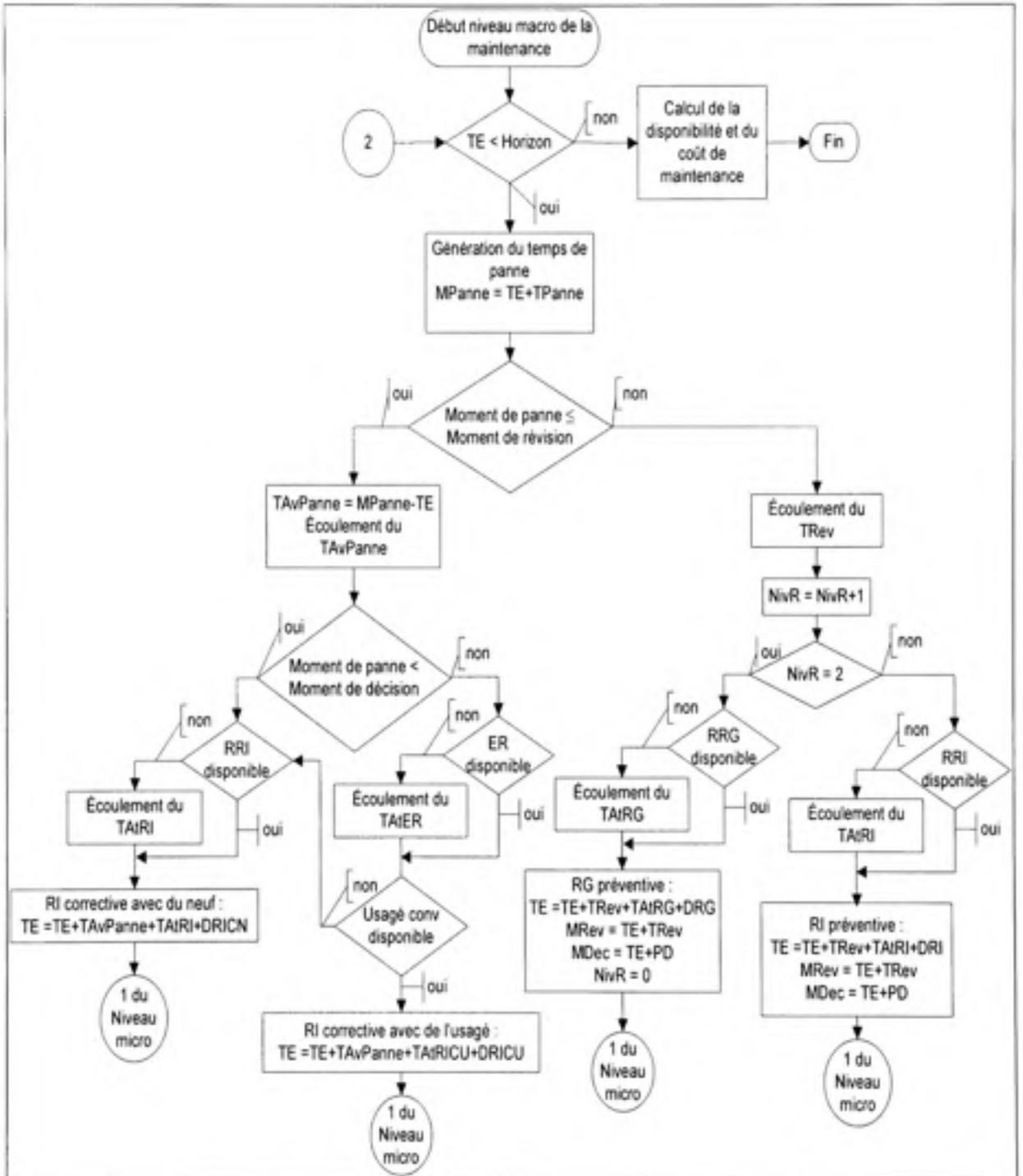


Figure 6.1 Logigramme du niveau macro de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc étendu.

6.3 Optimisation conjointe multicritère de la maintenance des locomotives avec la stratégie de type bloc étendu

6.3.1 Optimisation conjointe multicritère du niveau macro de la maintenance de type bloc étendu

On a fixé le domaine d'expérience du niveau macro d'EBRP après plusieurs essais afin de cibler la zone convenable pour l'optimisation conjointe des variables de réponse.

Tableau 6.1 Niveaux des variables de décision pour l'optimisation du niveau macro d'EBRP

Variable de décision	Limite inférieure	Point milieu	Limite supérieure
TRev (x_1)	1277,5	1642,5	2007,5
PCRI (x_2)	5	6	7
QCRI (x_3)	2	3	4
PCRG (x_4)	2	3	4
QCRG (x_5)	1	2	3
CPD (x_6)	0,22	0,6	0,98

Le domaine d'expérience utilisé pour l'optimisation conjointe du niveau macro d'EBRP est défini par les niveaux respectifs de chacune des variables de décision. Les modèles du premier ordre avec et sans interaction présentant une grande courbure et n'ajustant pas bien les valeurs obtenues par simulation, alors on a adopté les modèles du deuxième ordre avec interaction. On a donc utilisé un plan factoriel fractionnaire 3^{6-1} plus cinq points au centre, pour un total de 248 essais permettant de séparer tous les effets principaux et toutes les interactions doubles, tout en améliorant la précision de l'estimation des effets. Après avoir fait la simulation du niveau macro d'EBRP, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis pour chaque point on a utilisé les variables de codage de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour les analyses statistiques. On a ensuite fait des transformations, jusqu'à obtenir les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté les plus élevés; on a ainsi fait les analyses statistiques du niveau macro d'ARP avec DispM¹²⁰ et CoûtM[†].

Tableau 6.2 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'EBRP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X ₁ :TRev	0,0000276636	1	0,0000276636	2444,70	0,0000
X ₂ :PCRI	0,0000319804	1	0,0000319804	2826,19	0,0000
X ₃ :QCRI	6,87052E-7	1	6,87052E-7	60,72	0,0000
X ₄ :PCRG	0,00000192363	1	0,00000192363	170,00	0,0000
X ₅ :QCRG	6,13278E-8	1	6,13278E-8	5,42	0,0208
X ₆ :CPD	5,97203E-7	1	5,97203E-7	52,78	0,0000
X ₁ X ₁	0,00100358	1	0,00100358	88688,74	0,0000
X ₁ X ₂	5,03071E-7	1	5,03071E-7	44,46	0,0000
X ₁ X ₃	2,20163E-8	1	2,20163E-8	1,95	0,1645
X ₁ X ₄	1,7328E-7	1	1,7328E-7	15,31	0,0001
X ₁ X ₅	5,64898E-10	1	5,64898E-10	0,05	0,8234
X ₁ X ₆	4,75079E-7	1	4,75079E-7	41,98	0,0000
X ₂ X ₂	0,0000043654	1	0,0000043654	385,78	0,0000
X ₂ X ₃	4,62038E-7	1	4,62038E-7	40,83	0,0000
X ₂ X ₄	2,71602E-7	1	2,71602E-7	24,00	0,0000
X ₂ X ₅	3,73711E-8	1	3,73711E-8	3,30	0,0705
X ₂ X ₆	6,83527E-8	1	6,83527E-8	6,04	0,0148
X ₃ X ₃	1,96514E-7	1	1,96514E-7	17,37	0,0000
X ₃ X ₄	2,22454E-10	1	2,22454E-10	0,02	0,8886
X ₃ X ₅	1,58898E-10	1	1,58898E-10	0,01	0,9058
X ₃ X ₆	2,42101E-8	1	2,42101E-8	2,14	0,1450
X ₄ X ₄	4,05926E-7	1	4,05926E-7	35,87	0,0000
X ₄ X ₅	1,26075E-7	1	1,26075E-7	11,14	0,0010
X ₄ X ₆	6,64268E-9	1	6,64268E-9	0,59	0,4444
X ₅ X ₅	5,65906E-9	1	5,65906E-9	0,50	0,4802
X ₅ X ₆	3,4907E-9	1	3,4907E-9	0,31	0,5792
X ₆ X ₆	1,92123E-7	1	1,92123E-7	16,98	0,0001
Erreur totale	0,00000248947	220	1,13158E-8		
Total (corr.)	0,00109194	247			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau macro d'EBRP (voir le tableau 6.2 ci-dessus) montre que tous les facteurs principaux ainsi que certaines interactions doubles sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression des interactions non significatives on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9976 et un R^2 ajusté de 0,9974. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{DispM} = & (10^{-3}(604,5 + 41,3235X_1 + 44,4309X_2 + 6,51235X_3 + 10,8969X_4 \\
 & + 1,94568X_5 - 6,0716X_6 - 424,011X_1^2 - 6,825X_1X_2 - 4,00556X_1X_3 \\
 & - 6,63241X_1X_4 - 27,9333X_2^2 - 6,54074X_2X_3 + 5,01481X_2X_4 \\
 & + 2,51574X_2X_5 - 5,9X_3^2 - 8,49444X_4^2 - 3,41667X_4X_5 - 5,83333X_5^2) + \varepsilon)^{(1.26)}
 \end{aligned}$$

Tableau 6.3 Analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'EBRP

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₁:TRev	2,49208E49	1	2,49208E49	9603,51	0,0000
X₂:PCRI	5,45674E47	1	5,45674E47	210,28	0,0000
X₃:QCRI	6,99074E45	1	6,99074E45	2,69	0,1022
X₄:PCRG	2,01343E48	1	2,01343E48	775,90	0,0000
X₅:QCRG	1,14108E47	1	1,14108E47	43,97	0,0000
X₆:CPD	8,52515E47	1	8,52515E47	328,53	0,0000
X₁X₁	1,51383E49	1	1,51383E49	5833,72	0,0000
X₁X₂	1,08035E47	1	1,08035E47	41,63	0,0000
X₁X₃	1,87583E45	1	1,87583E45	0,72	0,3961
X₁X₄	7,77625E46	1	7,77625E46	29,97	0,0000
X₁X₅	7,25242E44	1	7,25242E44	0,28	0,5976
X₁X₆	9,08272E47	1	9,08272E47	350,01	0,0000
X₂X₂	7,83891E45	1	7,83891E45	3,02	0,0836
X₂X₃	2,0201E45	1	2,0201E45	0,78	0,3786
X₂X₄	3,9857E45	1	3,9857E45	1,54	0,2165
X₂X₅	1,62894E44	1	1,62894E44	0,06	0,8024
X₂X₆	1,99726E43	1	1,99726E43	0,01	0,9302
X₃X₃	2,64413E43	1	2,64413E43	0,01	0,9197
X₃X₄	3,97862E42	1	3,97862E42	0,00	0,9688
X₃X₅	4,85734E42	1	4,85734E42	0,00	0,9655
X₃X₆	1,45491E45	1	1,45491E45	0,56	0,4548
X₄X₄	2,19354E44	1	2,19354E44	0,08	0,7715
X₄X₅	2,90207E45	1	2,90207E45	1,12	0,2914
X₄X₆	1,94626E45	1	1,94626E45	0,75	0,3874
X₅X₅	5,29452E45	1	5,29452E45	2,04	0,1546
X₅X₆	2,68509E44	1	2,68509E44	0,10	0,7480
X₆X₆	2,89786E47	1	2,89786E47	111,67	0,0000
Erreur totale	5,70892E47	220	2,59497E45		
Total (corr.)	4,58305E49	247			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau macro d'EBRP (voir le tableau 6.3 ci-dessus) montre que tous les facteurs principaux sauf QCRI ainsi que certaines interactions doubles sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression de l'effet principal non significatif et des interactions non significatives on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9868 et un R^2 ajusté de 0,9862. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\begin{aligned} \text{CoûtM} = & (10^8(971901 * 10^{10} - 392214 * 10^{10} X_1 + 580375 * 10^9 X_2 + 2,01327 X_3 \\ & + 111484 * 10^{10} X_4 + 2654 * 10^{11} X_5 + 725427 * 10^9 X_6 + 520677 * 10^{10} X_7^2 \\ & - 316279 * 10^9 X_1 X_2 + 8,05306 X_1 X_3 - 268332 * 10^9 X_1 X_4 - 4,02653 X_1 X_5 \\ & + 917056 * 10^9 X_1 X_6 - 12,7507 X_2 X_3 - 8,05306 X_2 X_4 - 14,0929 X_2 X_5 \\ & - 9,39524 X_3 X_6 - 3,35544 X_3^2 - 1,34218 X_3 X_4 - 12,7507 X_3 X_5 - 2,01327 X_3 X_6 \\ & + 2,68435 X_4^2 - 8,05306 X_4 X_5 - 8,72415 X_4 X_6 - 10,0663 X_5 X_6 \\ & + 719297 * 10^9 X_6^2) + \varepsilon)^{1/4} \end{aligned} \quad (1.27)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics a donné les résultats suivants :

Tableau 6.4 Optimisation multicritère du niveau macro d'EBRP

Macro EBRP	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max	DGlob3/1 max
DispM	0,9587	961071	0,98	0,98	0,9606	0,9473
CoûtM (\$)			961246	961246	962612	978787
AugRevM				0	-1366	-8331
R ²	0,9976	0,9868				
R ² ajusté	0,9974	0,9862				
TRev opt	1657	1795	1691	1692	1690	1683
PCRI opt	6,85	6,02	6,47	6,46	6,47	6,58
QCRI opt	3,08	3,04	3,32	3,32	3,29	3,23
PCRG opt	4	2,73	2,54	2,56	2,58	3,01
QCRG opt	1	1,67	1	1	1	1
CPD opt	0,4622	0,5617	0,4064	0,3858	0,3867	0,3971

Ci-dessus, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales du niveau macro de la stratégie EBRP montre que la disponibilité moyenne maximale est atteinte pour DGlob9/1 alors que le coût moyen de maintenance minimal n'a pas encore atteint sa valeur maximale. On n'a pas jugé nécessaire de refaire l'analyse de sensibilité pour le modèle du niveau macro d'EBRP car les paramètres sont les mêmes que ceux du modèle du niveau macro d'ARP. On a juste décidé de voir si une augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois serait bénéfique.

Tableau 6.5 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois

Niveau macro	DispM max	CoûtM min (\$)
EBRP	0,9587	934085
EBRP_3ER	0,9606	1275161

L'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois provoque une augmentation de la DispM max, une augmentation du CoûtM mini et globalement une diminution de RevM annuel potentielle estimée sommairement à 259 861\$. La figure 6.3 ci-dessous illustre la variation de la DispM et du CoûtM lorsqu'on augmente le nombre d'équipe de deux à trois.

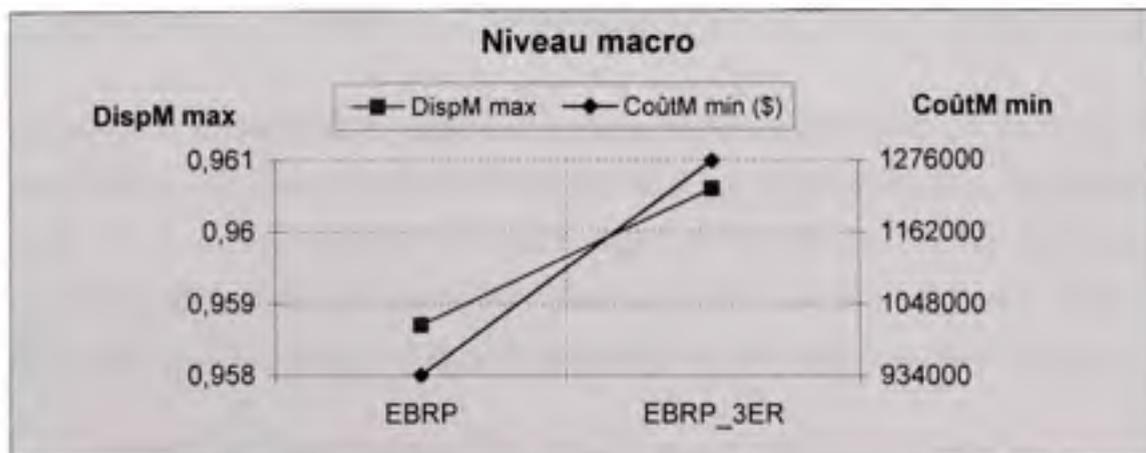


Figure 6.3 Effets de l'augmentation du nombre d'équipes de révision de deux à trois.

6.3.2 Optimisation conjointe multicritère du niveau micro de la maintenance de type bloc étendu avec trois équipes

On a conservé le même plan factoriel que pour le niveau micro d'ARP. Après avoir fait la simulation du niveau micro d'EBRP avec trois équipes, on a calculé la moyenne des 1 000 essais pour chaque point du plan d'expérience et pour chacune des mesures de performance. Puis pour chaque point on a utilisé les variables de codage de chacune des variables de décision pour construire le tableau qui servira pour les analyses statistiques. On a ensuite fait des transformations, jusqu'à obtenir les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté les plus élevés; on a ainsi fait les analyses statistiques du niveau macro d'ARP avec DispM¹⁶ et CoûtM.

Tableau 6.6 Analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'EBRP avec trois équipes

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₇:PCV	0,0281135	1	0,0281135	1300,49	0,0000
X₈:QCV	0,00267666	1	0,00267666	123,82	0,0000
X₇X₇	0,00384407	1	0,00384407	177,82	0,0000
X₇X₈	0,00173835	1	0,00173835	80,41	0,0000
X₈X₈	0,000292334	1	0,000292334	13,52	0,0079
Erreur totale	0,000151323	7	0,0000216176		
Total (corr.)	0,0384632	12			

L'analyse de la variance de la disponibilité moyenne du niveau micro d'EBRP avec trois équipes montre que tous les facteurs principaux ainsi que l'interaction sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon avec un coefficient de détermination R^2 de 0,9961 et un R^2 ajusté de 0,9933. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique de la DispM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{DispM} = (10^{-2}(44,0726 + 6,84513X_7 + 2,11213X_8 - 3,73071X_7^2 - 2,08468X_7X_8 - 1,02881X_8^2) + \varepsilon)^{1/16} \quad (1.28)$$

Tableau 6.7 Analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'EBRP avec trois équipes

Source	Somme des carrés	DI	Moyenne des carrés	Ratio-F	Valeur-P
X₇:PCV	2,11921E9	1	2,11921E9	1539,20	0,0000
X₈:QCV	5,13864E7	1	5,13864E7	37,32	0,0005
X₇X₇	2,07893E8	1	2,07893E8	150,99	0,0000
X₇X₈	663410,	1	663410,	0,48	0,5100
X₈X₈	2,37118E6	1	2,37118E6	1,72	0,2308
Erreur totale	9,63779E6	7	1,37683E6		
Total (corr.)	2,40707E9	12			

L'analyse de la variance du coût moyen du niveau micro d'EBRP avec trois équipes montre que tous les facteurs principaux sont significatifs au seuil de 5%; le pouvoir explicatif du modèle statistique est très bon et après suppression de l'interaction non significative on a un coefficient de détermination R^2 de 0,9947 et un R^2 ajusté de 0,9930. Le tableau des coefficients de régression de l'analyse statistique du CoûtM donne l'équation de prédiction suivante :

$$\text{CoûtM} = 571326 + 18793,7X_7 + 2926,5X_8 - 8322,95X_7^2 + \varepsilon \quad (1.29)$$

L'optimisation numérique de chacune des variables de réponse individuellement et l'optimisation numérique multicritère avec le logiciel Statgraphics a donné les résultats suivants :

Tableau 6.8 Optimisation multicritère du niveau micro d'EBRP avec trois équipes

Micro	DispM max	CoûtM min (\$)	DGlob1/2 max	DGlob1/1 max	DGlob2/1 max	DGlob3/1 max	DGlob4/1 max
EBRP_3EV	0,9542	541876	0,5946	0,6479	0,5291	0,4689	0,4332
DispM			0,9392	0,9425	0,9471	0,9492	0,9505
CoûtM (\$)			547136	553319	562890	567956	571194
AugRevM				252664	351246	159655	98732
R²	0,9961	0,9947					
R² ajusté	0,9933	0,993					
PCV opt	44,01	35,01	35	35,91	37,52	38,59	39,44
QCV opt	32,68	17,81	45	45	45	43,22	40,71

Tableau 6.8 Optimisation multicritère du niveau micro d'EBRP avec trois équipes (suite)

Micro	DGlob5/1 max	DGlob6/1 max	DGlob7/1 max	DGlob8/1 max	DGlob9/1 max	DGlob10/1 max
EBRP_3EV	0,4103	0,3948	0,3842	0,3771	0,3724	0,3696
DispM	0,9514	0,952	0,9524	0,9527	0,953	0,9532
CoûtM (\$)	573344	574876	576017	576897	577594	578156
AugRevM	68445	45531	30234	22652	22835	15126
PCV opt	40,08	40,6	41,03	41,39	41,71	41,99
QCV opt	38,82	37,32	36,08	35,04	34,14	33,36

Tableau 6.8 Optimisation multicritère du niveau micro d'EBRP avec trois équipes (suite)

Micro	DGlob20/1 max	DGlob30/1 max	DGlob40/1 max
EBRP_3EV	0,6067	0,7789	0,7789
DispM	0,9535	0,9535	0,9535
CoûtM (\$)	578874	578874	578874
AugRevM	22814	0	0
PCV opt	42,4	42,4	42,4
QCV opt	32,29	32,29	32,29

Le tableau des résultats de l'optimisation du niveau micro d'EBRP avec trois équipes donne les valeurs optimales de chacune des mesures de performance et les niveaux optimaux respectifs de chacune des variables de décision. La maximisation des désirabilités globales du niveau micro d'EBRP avec trois équipes identifie DGlob20/1 comme sa meilleure combinaison. Ci-dessous, le graphique du CoûtM en fonction de la DispM pour la maximisation des désirabilités globales du niveau micro d'EBRP avec trois équipes montre que la disponibilité moyenne maximale est atteinte pour DGlob20/1 et en même temps le coût moyen de maintenance minimal atteint sa valeur maximale.

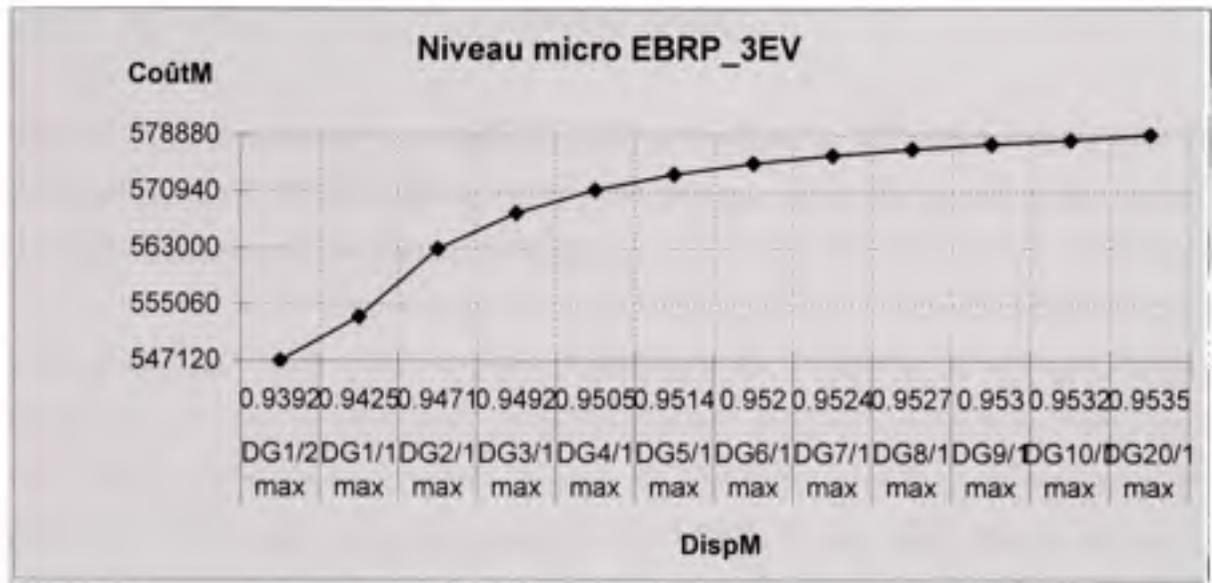


Figure 6.4 Optimisation multicritère du niveau micro d'EBRP avec trois équipes.

6.4 Conclusion

Dans ce sixième chapitre, on a déterminé pour la stratégie EBRP la valeur optimale de chacune des six variables de décision du niveau macro ainsi que celle des deux variables de décision du niveau micro correspondant aux valeurs optimales des deux variables de réponse. On constate que l'optimisation de la stratégie EBRP permet d'améliorer légèrement d'avantage les performances de Transrail que celle de la stratégie BRP avec une augmentation de la disponibilité du niveau micro de 0,9483 à 0,9535 et une augmentation de la disponibilité du niveau macro de 0,9510 à 0,9585 provoquant une augmentation des coûts de maintenance respectivement de 426 440 à 578 874\$ et de 920 737 à 961 246 \$. Ce qui entraîne globalement une augmentation de revenu moyen annuel potentielle de l'optimisation multicritère d'EBRP (niveau macro + niveau micro) maximale de 795 381\$, soit 1,17% du revenu moyen annuel net actuel de Transrail.

CONCLUSION

Pour conclure, on compare les résultats des quatre stratégies de maintenance sur la base des performances globales de Transrail en combinant successivement les niveaux macro et micro avec trois équipes pour chacune des stratégies.

D'abord on a fait l'optimisation conjointe multicritère de la stratégie de type âge, ce qui a donné pour le niveau macro une disponibilité moyenne annuelle maximale de **0,9603** et un coût moyen annuel de maintenance minimal de **878 838S** et pour le niveau micro une disponibilité moyenne annuelle maximale de **0,9535** et un coût moyen annuel de maintenance minimal de **544 345S**. Cette optimisation a entraîné une augmentation de revenu moyen annuel potentielle d'ARP (niveau macro + niveau micro) maximale **pour DGlob4/1 max et DGlob8/1 max** respectivement et pouvant atteindre globalement une valeur de **942 444S**.

Puis on a fait l'optimisation conjointe multicritère de la stratégie de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance, ce qui a donné pour le niveau macro une disponibilité moyenne annuelle maximale de **0,9637** et un coût moyen annuel de maintenance minimal de **882 232S** et pour le niveau micro une disponibilité moyenne annuelle maximale de **0,9540** et un coût moyen annuel de maintenance minimal de **544 932S**. Cette optimisation a entraîné une augmentation de revenu moyen annuel potentielle d'ARPPA (niveau macro + niveau micro) maximale **pour DGlob2/1 max et DGlob6/1 max** respectivement et pouvant atteindre globalement une valeur de **1 274 166S**.

Ensuite on a fait l'optimisation conjointe multicritère de la stratégie de type bloc, ce qui a donné pour le niveau macro une disponibilité moyenne annuelle maximale de **0,9586** et un coût moyen annuel de maintenance minimal de **963 811S** et pour le niveau micro une disponibilité moyenne annuelle maximale de **0,9537** et un coût moyen annuel de maintenance minimal de **541 685S**. Cette optimisation a entraîné une augmentation de revenu moyen annuel potentielle de BRP (niveau macro + niveau micro) maximale **pour DGlob3/1**

max et DGlob8/1 max respectivement et pouvant atteindre globalement une valeur de **790 309\$**.

Enfin on a fait l'optimisation conjointe multicritère de la stratégie de type bloc étendu, ce qui a donné pour le niveau macro une disponibilité moyenne annuelle maximale de **0,9587** et un coût moyen annuel de maintenance minimal de **961 071\$** et pour le niveau micro une disponibilité moyenne annuelle maximale de **0,9542** et un coût moyen annuel de maintenance minimal de **541 876\$**. Cette optimisation a entraîné augmentation de revenu moyen annuel potentielle de l'optimisation multicritère d'EBRP (niveau macro + niveau micro) maximale **pour DGlob1/1 max et DGlob20/1 max** respectivement et pouvant atteindre globalement une valeur de **795 381\$**.

La meilleure des quatre stratégies de maintenance est donc la nouvelle stratégie ARP-PA, permettant d'obtenir une augmentation de revenu moyen annuel potentielle de l'optimisation multicritères pouvant aller jusqu'à **1 274 166\$**. On constate par les valeurs des variables de réponse que l'ordre de préférence des stratégies de maintenance est le suivant :

- 1^{ère} : Stratégie de maintenance de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance,
- 2^{ème} : Stratégie de maintenance de type âge,
- 3^{ème} : Stratégie de maintenance de type bloc étendu,
- 4^{ème} : Stratégie de maintenance de type bloc.

La principale contribution de ce mémoire est de faire ressortir l'importance de l'intégration des équipements de rechange et du personnel de maintenance au modèle de la stratégie de maintenance; puis de faire l'optimisation conjointe multicritère des stratégies de maintenance en prenant en compte toutes les ressources intervenant en pratique dans l'exécution de la maintenance. Ceci est un aspect particulièrement important en ce qui concerne la disponibilité, afin de mieux refléter la réalité. Les modèles obtenus peuvent être aisément adaptés à n'importe quel contexte industriel où la période de remplacement préventif est

suffisamment longue. Le mémoire traite aussi des effets de l'imbrication des niveaux macro et micro de la maintenance des locomotives sur son optimisation.

La limitation de l'approche proposée est qu'il faut d'abord explorer l'espace possible pour fixer le domaine d'expérience convenable et ensuite faire souvent une transformation des variables de réponse afin de minimiser les bruits. La précision des résultats obtenus dépend de cet exercice qui peut être considéré comme une première étape d'optimisation.

Dans les travaux de recherche futurs, il serait intéressant d'explorer la modélisation analytique pour voir la possibilité d'une éventuelle généralisation des modèles établis dans ce mémoire avec peu d'hypothèses simplificatrices.

RECOMMANDATIONS

La stratégie de maintenance optimale qu'on recommande à Transrail est celle de type âge conjuguant avec la disponibilité du personnel de maintenance et dont les valeurs des paramètres sont : TRev «normal» = 1991 jours, TRev «avancé» = 1691 jours, TRev «retardé» = 2290 jours, PCRI = 5, QCRI = 4, PCRG = 3, QCRG = 2, PCV = 45 et QCV = 21. Cette stratégie de maintenance optimale donne une augmentation de revenu moyen annuel potentielle d'environ **1 274 166\$**.

L'applicabilité du modèle proposé dépendra principalement de la volonté des décideurs de Transrail et de la qualité des ressources humaines, matérielles et financières dont dispose la société. Elle doit en effet mettre en place un véritable bureau d'études pour faire l'ingénierie de la maintenance des locomotives et s'équiper des machines outils nécessaires pour la fabrication des pièces connexes détériorées lors des pannes. Elle doit aussi assurer la formation continue de son personnel de maintenance et le renouvellement de son outillage. Le personnel de révision et les conducteurs de train devront travailler de concert pour d'une part, envoyer en révision toute locomotive dont le moment «avancé» de révision préventive est atteint pendant que toutes les deux équipes de révision sont disponibles. Et d'autre part, garder en activité toute locomotive dont le moment «retardé» de révision préventive n'est pas atteint tant que toutes ces deux équipes sont occupées.

Transrail utilisant déjà la stratégie de maintenance de type âge, il faudra consigner dans le carnet de bord de chaque locomotive en plus du moment «normal» de révision préventive deux autres moments : le moment «avancé» de révision préventive et le moment «retardé» de révision préventive. En outre, Transrail devra planifier dès maintenant la construction de l'espace de travail, l'outillage et le recrutement des agents de la troisième équipe de visite. On recommande aussi à Transrail de commencer le plus tôt possible à remplacer progressivement les plus vieilles locomotives, ce qui devrait conduire à une légère augmentation de la durée écoulée entre la fin de la dernière révision et le moment où la locomotive tombe en panne (TPanne).

ANNEXE I

ORGANIGRAMME DE TRANSRAIL

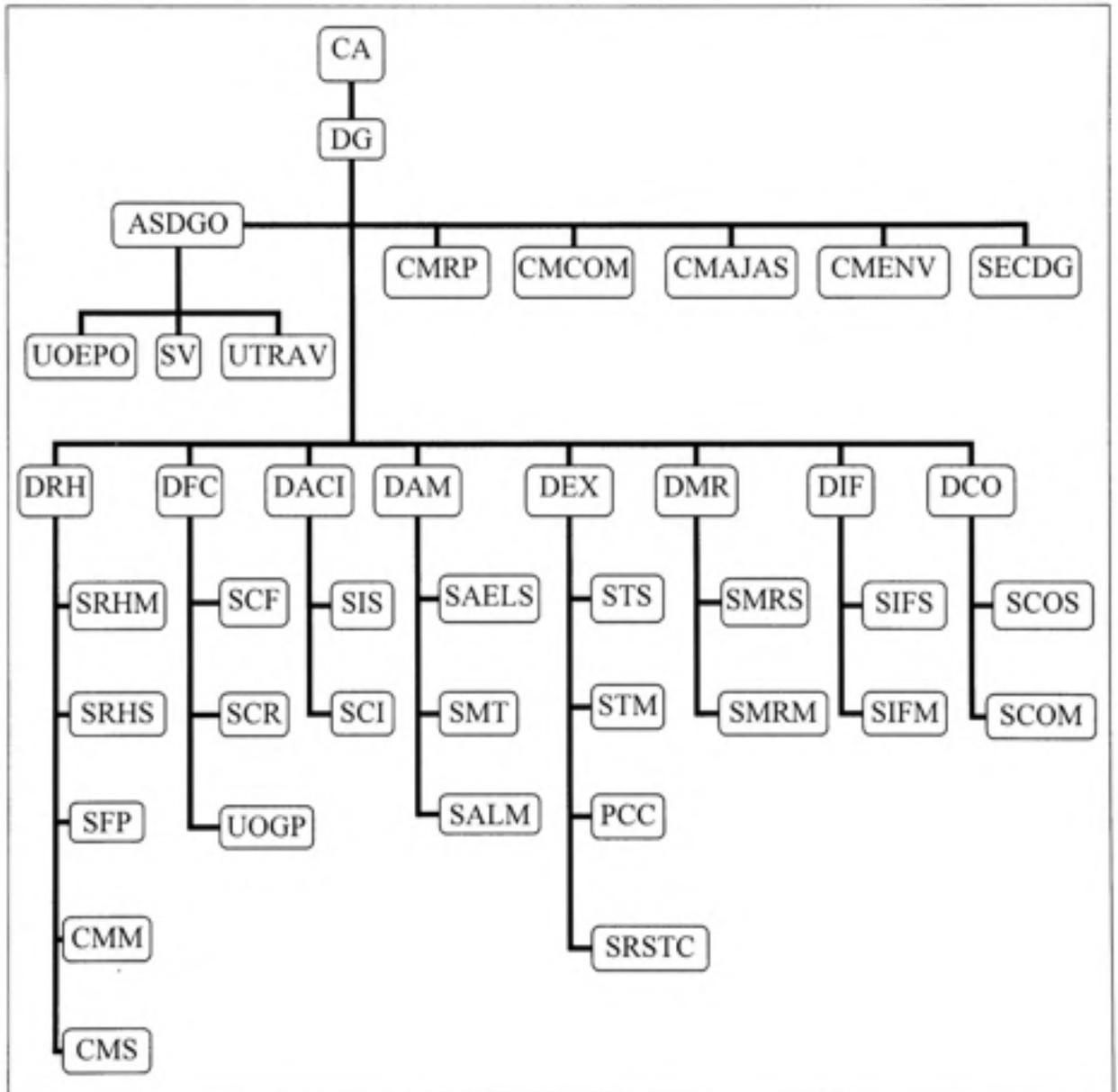


Figure I-1 Organigramme de Transrail.

Légende :

ASDGO : Assistant du Directeur Général pour les Opérations

CA : Conseil d'Administration

CMAJAS : Chargé de Missions Affaires Juridiques et Assurances

CMCOM : Chargé de Missions Communication

CMENV : Chargé de Missions Environnement

CMM : Centre Médical au Mali

CMRP : Chargé de Missions Relations Publiques

CMS : Centre Médical au Sénégal

DACI : Direction de l'Audit et du Contrôle Interne

DAM : Direction des Approvisionnements et des Magasins

DCO : Direction Commerciale

DEX : Direction de l'Exploitation

DFC : Direction Financière et Comptable

DG : Direction Générale

DIF : Direction des Installations Fixes

DMR : Direction du Matériel Roulant

DRH : Direction des Ressources Humaines

PCC : Poste de Commandement Centralisé

SAELS : Service des Achats Etrangers et Locaux au Sénégal

SALMM : Service des Achats Locaux et des Magasins au Mali

SCF : Service Comptabilité et Finances

SCI : Service du Contrôle Interne

SCOM : Service Commercial au Mali

SCOS : Service Commercial au Sénégal

SCR : Service Contrôle des Recettes

SECDG : Secrétariat du Directeur Général

SFP : Service de la Formation Professionnelle

SIFM : Service des Installations Fixes au Mali

SIFS : Service des Installations Fixes au Sénégal

SIS : Service Informatique et Statistique

SMRM : Service du Matériel Roulant au Mali

SMRS : Service du Matériel Roulant au Sénégal

SMTS : Service des Magasins et du Transit au Sénégal

SRHM : Service des Ressources Humaines au Mali

SRHS : Service des Ressources Humaines au Sénégal

SRSTC : Service Règlement, Sécurité et Tracman Centralisé

STM : Service Transport au Mali

STS : Service Transport au Sénégal

SV : Service Voyageurs

UOEPO : Unité Opérationnelle Études et Planification des Opérations

UOGP : Unité Opérationnelle Grands Projets

UTRAV : Usine de Traverses

ANNEXE II

COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNÉES DE LA MAINTENANCE DU PARC DE LOCOMOTIVES DE TRANSRAIL ET ESTIMATION DES PARAMÈTRES

À partir des informations et des données collectées et traitées, on a trouvé avec le logiciel ExperFit la distribution de probabilité ajustant la durée écoulée entre la fin de la dernière révision et le moment où la locomotive tombe en panne et on l'appellera le temps de panne (TPanne).

Tableau II-1 Temps de panne collectés en heures

Index	Valeur								
1	36 384	15	45 432	29	50 448	43	53 880	59	60 096
2	36 840	16	45 456	30	50 616	44	54 456	60	60 792
3	37 584	17	45 696	31	51 288	45	54 624	61	61 104
4	39 768	18	46 368	32	51 432	46	55 224	62	61 488
5	40 440	19	47 016	33	51 600	47	55 272	63	61 752
6	41 568	20	47 040	34	51 792	48	55 608	64	62 304
7	41 592	21	47 040	35	51 936	49	55 728	65	63 024
8	41 928	22	47 496	36	52 056	50	56 736	66	64 032
9	43 080	23	48 072	37	52 224	51	56 808	67	65 136
10	44 328	24	48 168	38	52 656	52	57 312	68	66 792
11	44 448	25	48 624	39	52 824	53	57 720	69	67 728
12	44 592	26	48 696	40	53 040	54	58 344	70	70 128
13	44 832	27	48 984	41	53 232	55	59 112	71	70 944
14	45 072	28	49 800	42	53 664	56	59 736	72	72 600

Ainsi, on a collecté 70 temps de panne intervenus entre 1978 et 2006, regroupés dans le tableau II-1 ci-dessus et dont on présente ci-dessous l'ajustement avec ExperFit. On signale que les temps de panne supérieurs à six ans sont intervenus entre 2000 et 2003, période au cours de laquelle les opérations de révision préventives n'étaient pas effectuées convenablement.

Tableau II-2 Caractéristiques statistiques des temps de panne

Sample Characteristic	Value
Source file	<edited>
Observation type	Real valued
Number of observations	70
Minimum observation	36 384.00000
Maximum observation	72 600.00000
Average	52 480.45714
Median	51 996.00000
Variance	6.96008 e 7
Skewness	0.30497

Tableau II-3 Trois premières distributions pour les temps de panne

Relative Evaluation of Candidate Models		
Model	Relative Score	Model Range
1 - Lognormal	94.44	Larger than 0
2 - Random Walk	94.44	Larger than 0
3 - Inverse Gaussian	91.67	Larger than 0

28 models are defined with scores between 0.00 and 94.44

Absolute Evaluation of Model 1 - Lognormal

Based on a heuristic evaluation, there is no current evidence for not using the primary model. If you are doing simulation, then the primary model will probably provide a good representation for your data. However, we recommend further confirmation of the primary model.

Additional Information Concerning Model 1 - Lognormal

Result of an Anderson-Darling goodness-of-fit test at level 0.1	Do not reject
"Error" in the model mean relative to the sample average	-12.10946 = 0.02%

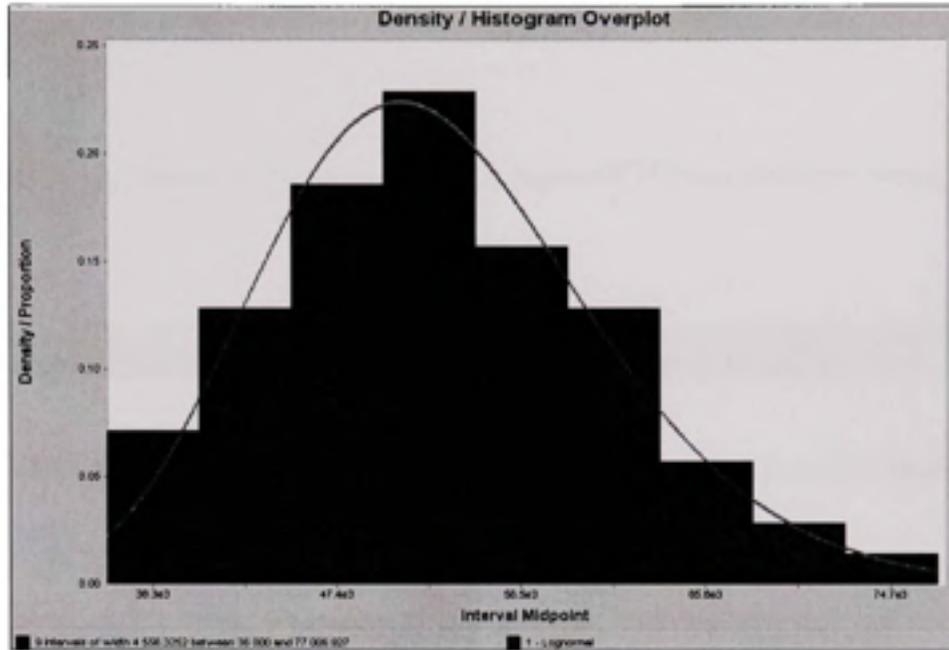


Figure II-1 Comparaison des deux premières distributions pour les temps de panne.

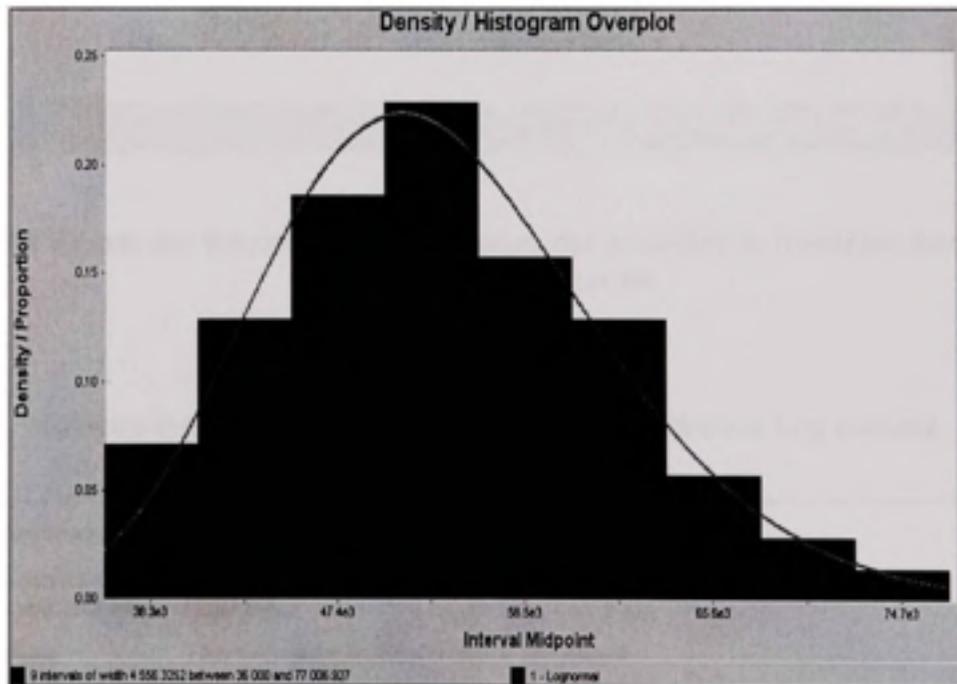


Figure II-2 Comparaison des première et troisième distributions pour les temps de panne.

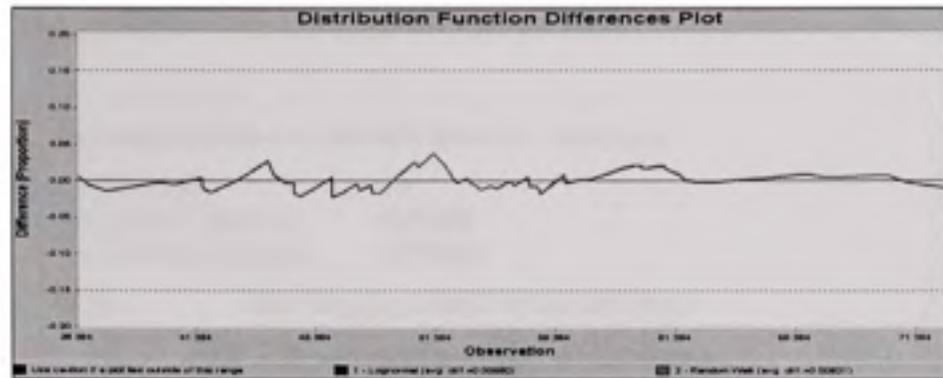


Figure II-3 Écarts des fonctions de distribution des deux premières distributions pour les temps de panne.

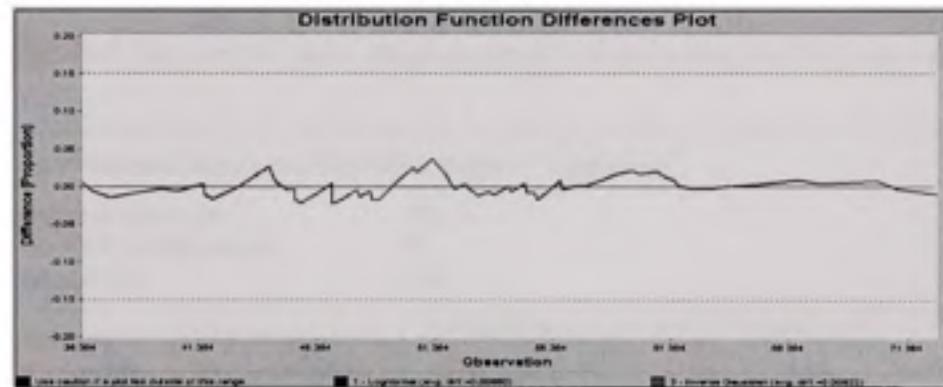


Figure II-4 Écarts des fonctions de distribution des première et troisième distributions pour les temps de panne.

Tableau II-4 Test d'Anderson-Darling de la distribution Log normale

Anderson-Darling Test With Model 1 - Lognormal						
Sample size	70					
Test statistic	0.09929					
Note:	The following critical values are exact.					
	Critical Values for Level of Significance					
Sample Size	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
70	0.465	0.624	0.744	0.863	1.024	1.146
Reject?	No					

Tableau II-5 Test de kolmogorov-Smirnov de la distribution Log normale

Kolmogorov-Smirnov Test With Model 1 - Lognormal					
Sample size	70				
Normal test statistic	0.04504				
Modified test statistic	0.37680				
Note:	The following critical values are exact.				
Sample Size	Critical Values for Level of Significance				
	0.150	0.100	0.050	0.025	0.010
70	0.767	0.810	0.885	0.984	1.024
Reject?	No				

Tableau II-6 Test de Khi carré d'égalité de probabilité de la distribution Log normale

Equal-Probable Chi-Square Test With Model 1 - Lognormal						
Number of intervals	14					
Expected (model) count	5					
Test statistic	4.4					
Degrees of Freedom	Observed Level of Significance	Critical Values for Level of Significance				
		0.25	0.15	0.10	0.05	0.01
11	0.957	13.701	15.767	17.275	19.675	24.725
13	0.986	15.984	18.202	19.812	22.362	27.688
	Reject?	No				

Tableau II-7 Code de la distribution Log normale pour le logiciel AweSim

AweSim! Representation of Model 1 - Lognormal
Use:
<code>RLOGN[52492.566607, 8410.671597, <stream>]</code>

TPanne = Log normale (2 187,1906; 350,4445) en jours.

Après la détermination de la distribution de probabilité ajustant le temps de panne, on a estimé les autres distributions de probabilité en se basant sur les informations et données collectées et en utilisant une loi normale pour les paramètres relatifs à la maintenance préventive et une loi log normale pour les paramètres relatifs à la maintenance corrective. Ainsi, on a obtenu les valeurs suivantes pour lesdits paramètres :

1. Distribution de la durée de la visite limitée (DVL) : Normale (1,75; 0,03125) en jours;
2. Distribution de la durée de la visite complète (DVC) : Normale (3; 0,03125) en jours;
3. Distribution de la durée de la visite générale (DVG) : Normale (3,125; 0,03125) en jours;
4. Distribution de la durée de la révision intermédiaire préventive (DRI) :
Normale (45; 0,5) en jours;
5. Distribution de la durée de la révision générale préventive (DRG) : Normale (60; 0,5) en jours;
6. Distribution de la durée de la révision intermédiaire corrective avec un équipement complémentaire neuf (DRICN) : Log normale (70; 3) en jours, L'écart de 25 jours entre la révision préventive et la révision corrective est dû aux nombreux contrôles effectués suite à une panne; aux temps de réparation des différentes parties connexes endommagées éventuellement suite à la panne et éventuellement au délai s'écoulant entre la fin du démontage et l'arrivée des pièces de rechange nécessaires pour effectuer ces réparations;
7. Distribution de la durée de la révision intermédiaire corrective avec un équipement complémentaire usagé (DRICU) : Log normale (65; 3) en jours, Cette distribution a été obtenue en déduisant les 5 jours de rodage de la moyenne de la distribution précédente;
8. Distribution de la durée de la révision générale corrective qui n'est faite qu'avec des équipements neufs (DRGC) : Log normale (85; 3) en jours, Pour les détails; voir plus haut la durée de la révision intermédiaire corrective avec un équipement neuf;
9. Distribution du délai de livraison d'une commande d'équipements neufs (DeLiv) : Normale (283,5; 10,5) en jours;
10. Distribution du délai de retour en atelier à Thiès d'une locomotive tombée en panne entre Bamako et Thiès (DRetAP) : Uniforme (3; 3,3333) en jours;
11. Distribution du délai de retour en atelier à Thiès d'une locomotive tombée en panne entre Dakar et Thiès (DRetAP) : Uniforme (0,3333; 0,6667) en jours;

12. Distribution du coût d'achèvement d'un voyage suite à une panne de locomotive (CtAVoy) : $2000 * \text{Uniforme}(0,0001; 0,4184) * \text{Arrondi}(\text{Uniforme}(19,51; 25,49))$ en dollar, Obtenu en convertissant le temps de production perdu pour aller chercher un voyage afin de l'achever suite à une panne en revenu, Ce temps varie de 0,01 (pour ne pas prendre une durée restante minimale du voyage de zéro) à $0,5 * (98-16-8) + 4$ heures de nouveaux préliminaires, Pour faire la conversion en revenu; on a divisé les durées par 98 heures (la durée moyenne d'un voyage) et on a multiplié par 2 000 dollars (le revenu moyen du transport d'un conteneur);
13. Distribution du coût des pièces connexes endommagées suite à une panne (CtPPanne) : Log normale (12 000; 4 000) en dollars.
Enfin, on a déterminé les valeurs des paramètres qui ne requièrent pas une distribution de probabilité :
14. Coût de commande d'un lot (conteneur) d'équipements pour visite complète ou visite générale (CtCV) : 3 000 dollars;
15. Coût de commande d'un lot (conteneur) d'équipements complémentaires pour révision intermédiaire (CtCRI) : 4 000 dollars;
16. Coût de commande d'un lot (conteneur) d'équipements complémentaires pour révision générale (CtCRG) : 5 000 dollars;
17. Coût d'achat d'un équipement neuf pour visite complète ou visite générale (CtAEV) : 4 000 dollars;
18. Coût d'achat d'un équipement complémentaire neuf pour révision intermédiaire (CtAECRI) : 44 000 dollars;
19. Coût d'achat d'un équipement complémentaire neuf pour révision générale (CtAECRG) : 108 000 dollars;
20. Revenu moyen d'un voyage (RevVoy) : 45 000 dollars;
21. Coût moyen d'un voyage (CoûtVoy) : 12 500 dollars;
22. Durée moyenne d'un voyage (DurVoy) : 4,0833 jours; dont à peu près 0,3333 jour de déchargement et 0,6667 jour de chargement et préliminaires; c'est-à-dire vérification et test du système de freinage; pesée des plateformes et autres vérifications;

23. Coût d'outillage et de construction d'un espace de travail convenable pour une équipe de visite (CtOuAmV) : 466 783 dollars;
24. Coût d'outillage et de construction d'un espace de travail convenable pour une équipe de révision (CtOuAmR) : 1 796 082 dollars;
25. Capacité du magasin de stockage des équipements complémentaires pour révision intermédiaire (CapMag) : 15;
26. Horizon considéré correspondant à la durée restante de la concession globale de Transrail; c'est-à-dire le temps à simuler en régime permanent (TSim) : 20 ans * 365 jours = 7 300 jours;
27. Nombre d'années à simuler (NbAnSim) : 20;
28. Temps entre deux opérations de visite (TVis) : 59 jours;
29. Coût journalier de la main-d'œuvre pour une opération de révision pour les heures régulières (CtJRevR) : 861,1354 dollars;
30. Coût journalier de la main-d'œuvre pour une opération de révision en tenant compte des heures supplémentaires (CtJRev) : 1 015,2333 dollars; obtenu en multipliant le coût journalier de 861,1354 dollars par $(39+(2*8,5))/(39+8,5)$ afin de tenir compte du coût des heures supplémentaires;
31. Coût journalier de la main-d'œuvre pour une opération de visite pour les heures régulières (CtJVisR) : 500,24 dollars;
32. Coût journalier de la main-d'œuvre pour une opération de visite en tenant compte des heures supplémentaires (CtJVis) : 589,76 dollars; obtenu en multipliant le coût journalier de 500,24 dollars par $(39+(2*8,5))/(39+8,5)$ afin de tenir compte du coût des heures supplémentaires;
33. Revenu de la vente d'un équipement complémentaire usagé pour révision intermédiaire (RvVEUCRI) : 100 dollars;
34. Revenu de la vente d'un équipement complémentaire usagé pour révision générale (RvVEUCRG) : 650 dollars;
35. Nombre de conteneurs par voyage : 20 à 25;
36. Revenu moyen du transport d'un conteneur (RevCont) : 2 000 dollars;

37. Probabilité de panne sur le tronçon Dakar-Thiès : En supposant que la panne est équiprobable en tous les points de la ligne de chemins de fer entre Bamako et Dakar et sachant que ce trajet est parcouru en moyenne en quatre heures; cette probabilité est de : $(2 \times 4 \text{ heures} + 16 \text{ heures de chargement et préliminaires au départ de Dakar} + 8 \text{ heures de déchargement à l'arrivée à Dakar}) / (2 \times 98) \text{ (la durée moyenne d'un voyage aller-retour)} = 32/196 = 0,1633$;
38. Probabilité de panne sur le tronçon Bamako-Thiès : $1 - 0,1633 = 0,8367$.

ANNEXE III

MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MACRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE

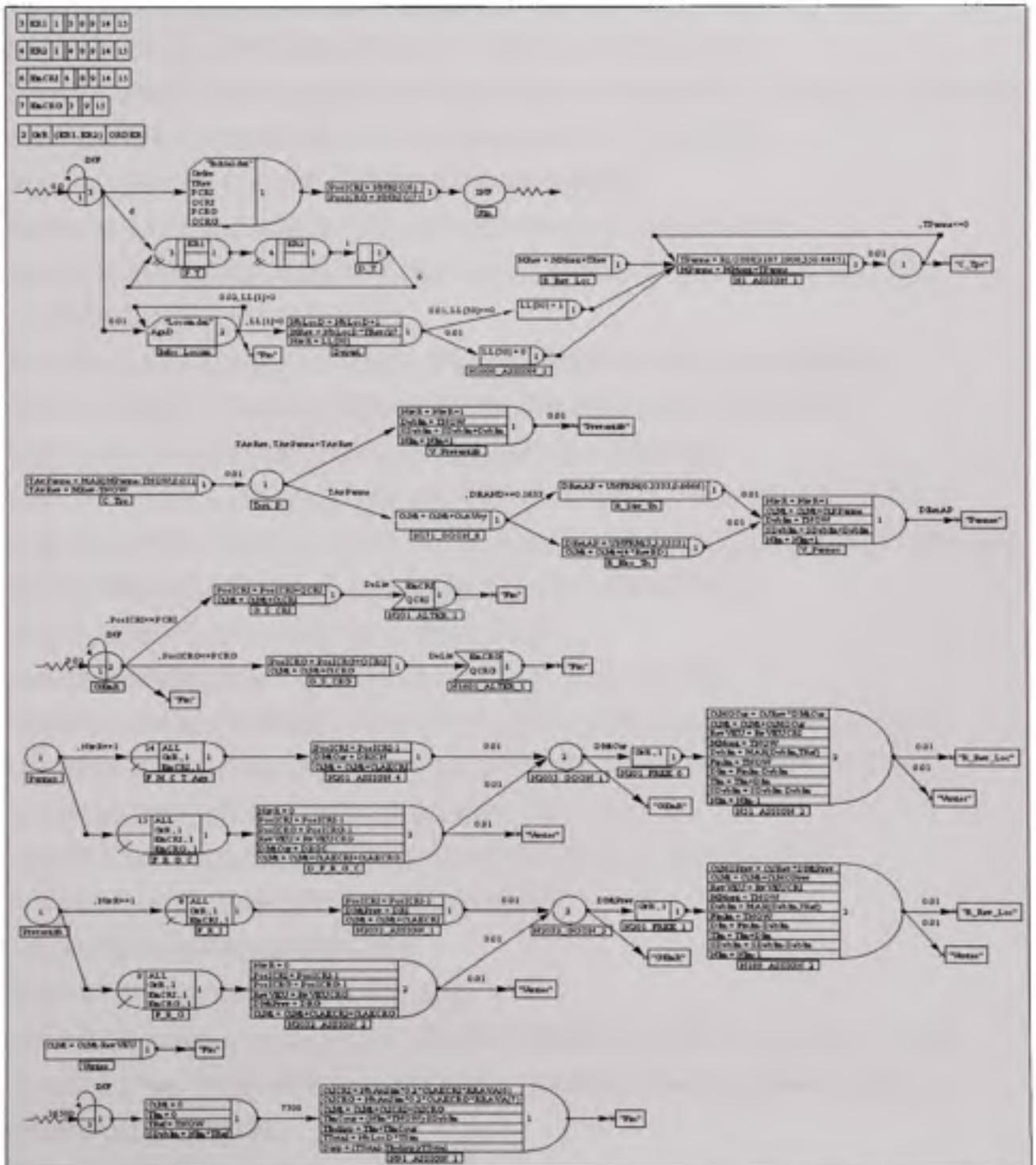


Figure III-1 Réseau du modèle de simulation du niveau macro d'ARP.

Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau macro d'ARP :

```

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,43000,YES,YES,1;
LIMITS,30,30,-1,40,10,-1;
EQUIVALENCE,{{TSim,7300},{NbAnSim,20}};
EQUIVALENCE,{{DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRICN,RLOGN(70,3)},{DRGC,RLOGN(85,3)}};
EQUIVALENCE,{{CtAVoy,2000*(UNFRM(0.0001,0.4184))*NINT(UNFRM(19.51,25.49))}};
EQUIVALENCE,{{CtJRev,1015.2333},{CtCRI,4000},{CtCRG,5000}};
EQUIVALENCE,{{CtAECRI,44000},{CtAECRG,108000}};
EQUIVALENCE,{{RvVEUCRI,100},{RvVEUCRG,650},{RevBD,1500}};
EQUIVALENCE,{{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)},{CtPPanne,RLOGN(12000,4000)}};
EQUIVALENCE,{{NivR,LTRIB[2]}};
EQUIVALENCE,{{AgeD,ATRIB[2]},{TPanne,ATRIB[4]},{MMont,ATRIB[7]}};
EQUIVALENCE,{{Deblm,ATRIB[8]},{FinIm,ATRIB[9]},{DIm,ATRIB[10]}};
EQUIVALENCE,{{DMtPrev,ATRIB[12]},{DMtCur,ATRIB[13]}};
EQUIVALENCE,{{MPanne,ATRIB[14]},{MRev,ATRIB[15]},{DRetAP,ATRIB[17]}};
EQUIVALENCE,{{RevVEU,ATRIB[18]},{CtMOCur,ATRIB[24]},{CtMOPrev,ATRIB[25]}};
EQUIVALENCE,{{TAvPanne,ATRIB[26]},{TAvRev,ATRIB[27]}};
EQUIVALENCE,{{NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]}};
EQUIVALENCE,{{PosICRI,LL[5]},{PCRI,LL[6]},{QCRI,LL[7]}};
EQUIVALENCE,{{PosICRG,LL[8]},{PCRG,LL[9]},{QCRG,LL[10]},{NIm,LL[15]}};
EQUIVALENCE,{{TIm,XX[6]},{TIndisp,XX[13]},{TTotat,XX[14]},{Disp,XX[15]}};
EQUIVALENCE,{{CtICRI,XX[16]},{CtICRG,XX[17]}};
EQUIVALENCE,{{SDeblm,XX[21]},{TImCour,XX[22]},{TRef,XX[23]}};
EQUIVALENCE,{{CtMt,XX[24]},{TRev,XX[26]}};
INITIALIZE,0.0,43800.02,YES,,YES;
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};
RECORD,,Performances.xls,TNOW,"TEMPS",{EXCEL},,43800.02,,1,{{Ordre,"Ordre de
l'essai"},},{Disp,"Disponibilité moy annuelle"},{CtMt/20,"Cout moy annuel maint"},};
MONTR,CLEAR,36500;
NETWORK,READ;
FIN;

```


Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau micro d'ARP :

```

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,13000,YES,YES,1;
LIMITS,30,30,-1.40,10,-1;
EQUIVALENCE,{{TSim,7300},{NbAnSim,20},{TVis,59}};
EQUIVALENCE,{{DVL,RNORM(1.75,0.03125)},{DVC,RNORM(3,0.03125)}};
EQUIVALENCE,{{DVG,RNORM(3.125,0.03125)},{CtJVis,589.76}};
EQUIVALENCE,{{CtCV,3000},{CtAEV,4000},{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRICN,RLOGN(70,3)},{DRGC,RLOGN(85,3)}};
EQUIVALENCE,{{NivR,LTRIB[2]},{NivV,LTRIB[3]}};
EQUIVALENCE,{{AgeD,ATRIB[2]},{Deblm,ATRIB[8]},{Finlm,ATRIB[9]}};
EQUIVALENCE,{{DIm,ATRIB[10]},{DR,ATRIB[11]}};
EQUIVALENCE,{{DMtPrev,ATRIB[12]},{MVis,ATRIB[13]}};
EQUIVALENCE,{{TPanne,ATRIB[14]},{MPanne,ATRIB[15]},{MRev,ATRIB[16]}};
EQUIVALENCE,{{CtMOPrev,ATRIB[25]},{TAvVis,ATRIB[27]}};
EQUIVALENCE,{{NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]},{PosIV,LL[12]}};
EQUIVALENCE,{{PCV,LL[13]},{QCV,LL[14]},{NIm,LL[15]}};
EQUIVALENCE,{{TIm,XX[6]},{TIndisp,XX[13]},{TTotal,XX[14]},{Disp,XX[15]}};
EQUIVALENCE,{{CtIV,XX[18]},{SDeblm,XX[21]},{TImCour,XX[22]}};
EQUIVALENCE,{{TRef,XX[23]},{CtMt,XX[24]},{TRev,XX[25]}};
INITIALIZE,0.0,14600.01,YES,,YES;
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};
RECORD,,Performances.xls,TNOW,"TEMPS",{EXCEL},,14600.01,,1,{{Ordre,"Ordre de
l'essai",},{Disp,"Disponibilité moy annuelle",},{CtMt/20,"Cout moy annuel maint",}};
MONTR,CLEAR,7300;
NETWORK,READ;
FIN;

```

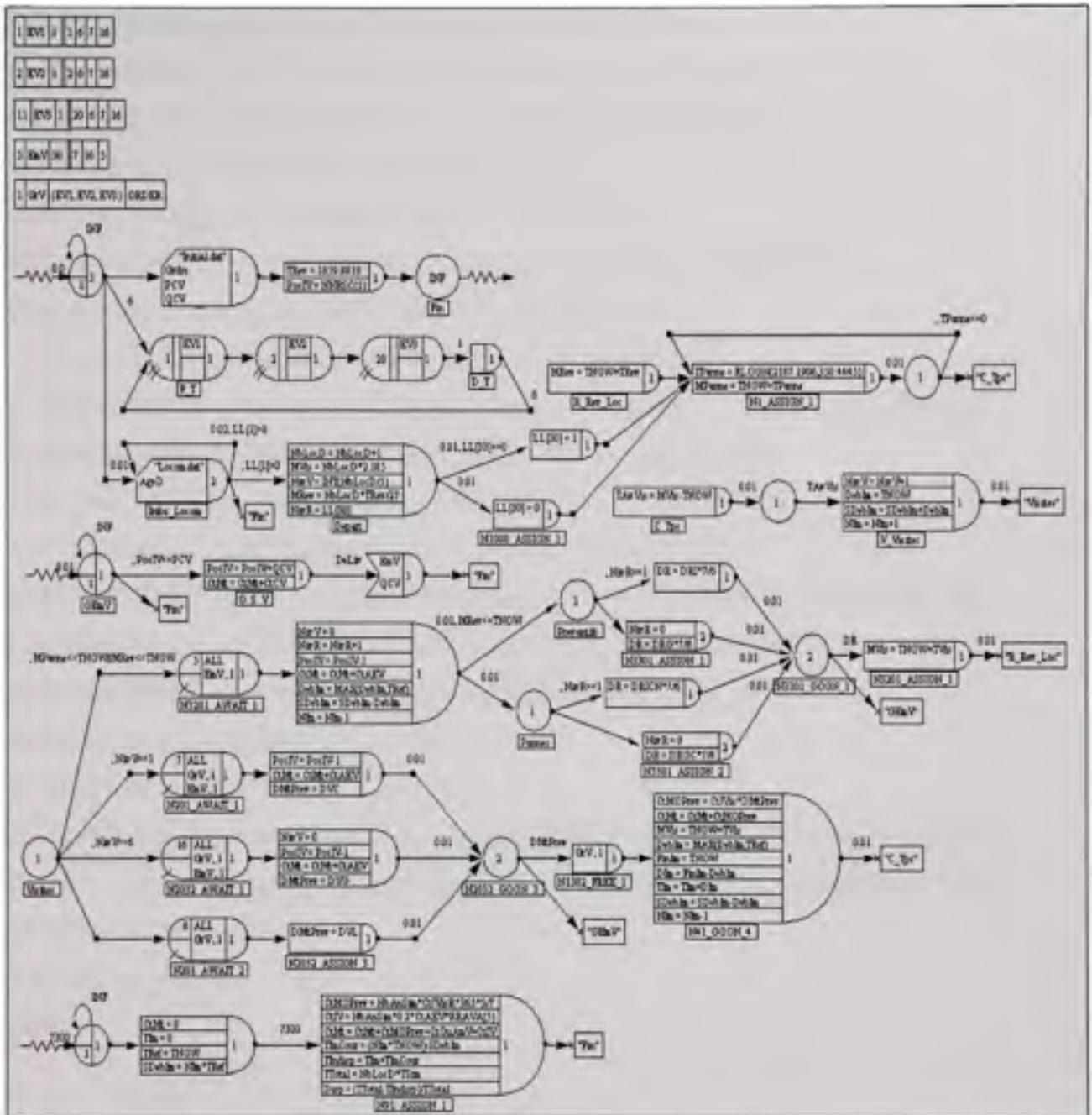


Figure IV-2 Réseau du modèle de simulation du niveau micro d'ARP avec trois équipes.

Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau micro d'ARP avec trois équipes:

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,13000,YES,YES,1;

LIMITS,30,30,-1,40,10,-1;

EQUIVALENCE,{{TSim,7300},{NbAnSim,20},{TVis,59}};

EQUIVALENCE,{{DVL,RNORM(1.75,0.03125)},{DVC,RNORM(3,0.03125)}};

EQUIVALENCE,{{DVG,RNORM(3.125,0.03125)},{CtJVis,589.76}};

```

EQUIVALENCE,{{CtJVisR,500.24},{CtOuAmV,466782.86}};
EQUIVALENCE,{{CtCV,3000},{CtAEV,4000},{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRICN,RLOGN(70,3)},{DRGC,RLOGN(85,3)}};
EQUIVALENCE,{{NivR,LTRIB[2]},{NivV,LTRIB[3]}};
EQUIVALENCE,{{AgeD,ATRIB[2]},{Deblm,ATRIB[8]},{Finlm,ATRIB[9]}};
EQUIVALENCE,{{Dim,ATRIB[10]},{DR,ATRIB[11]}};
EQUIVALENCE,{{DMtPrev,ATRIB[12]},{MVis,ATRIB[13]}};
EQUIVALENCE,{{TPanne,ATRIB[14]},{MPanne,ATRIB[15]},{MRev,ATRIB[16]}};
EQUIVALENCE,{{CtMOPrev,ATRIB[25]},{TAvVis,ATRIB[27]}};
EQUIVALENCE,{{NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]},{PosIV,LL[12]}};
EQUIVALENCE,{{PCV,LL[13]},{QCV,LL[14]},{NIm,LL[15]}};
EQUIVALENCE,{{TIm,XX[6]},{TIndisp,XX[13]},{TTotal,XX[14]},{Disp,XX[15]}};
EQUIVALENCE,{{CtIV,XX[18]},{SDeblm,XX[21]},{TImCour,XX[22]}};
EQUIVALENCE,{{TRef,XX[23]},{CtMt,XX[24]},{TRev,XX[25]}};
INITIALIZE,0.0,14600.01,YES,,YES;
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};
RECORD,,Performances.xls,TNOW,"TEMPS",{EXCEL},,14600.01,,1,{{Ordre,"Ordre de
l'essai",},{Disp,"Disponibilité moy annuelle",},{CtMt/20,"Cout moy annuel maint",}};
MONTR,CLEAR,7300;
NETWORK,READ;
FIN;

```

ANNEXE V

MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MACRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE ÂGE CONJUGUANT AVEC LA DISPONIBILITÉ DU PERSONNEL DE MAINTENANCE

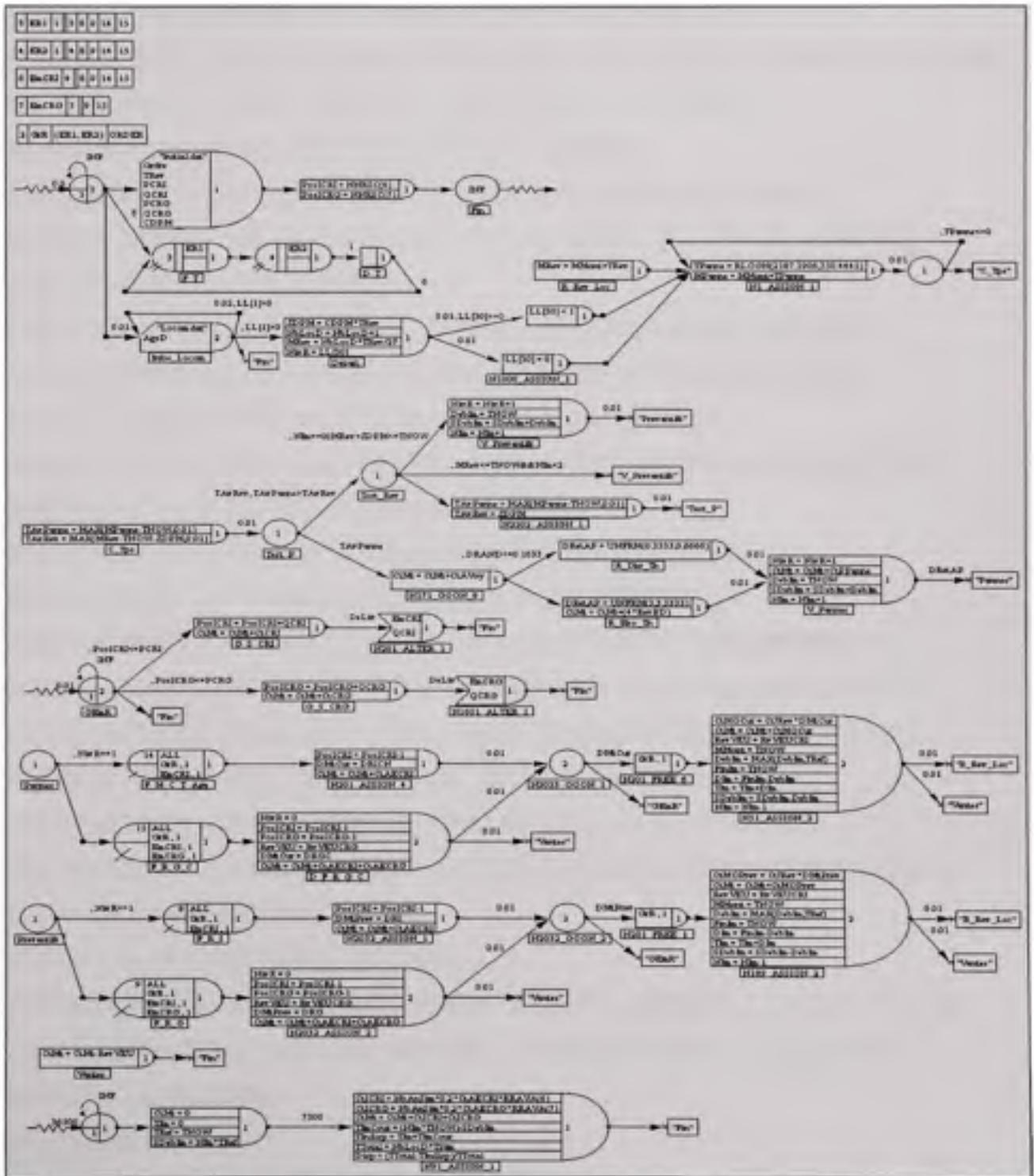


Figure V-1 Réseau du modèle de simulation du niveau macro d'ARP-PA.

Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau macro d'ARP-PA :

```

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,62000,YES,YES,1;
LIMITS,30,30,-1,40,10,-1;
EQUIVALENCE,{{TSim,7300},{NbAnSim,20}};
EQUIVALENCE,{{DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRICN,RLOGN(70,3)},{DRGC,RLOGN(85,3)}};
EQUIVALENCE,{{CtAVoy,2000*(UNFRM(0.0001,0.4184))*NINT(UNFRM(19.51,25.49))}};
EQUIVALENCE,{{CtJRev,1015.2333},{CtCRI,4000},{CtCRG,5000}};
EQUIVALENCE,{{CtAECRI,44000},{CtAECRG,108000}};
EQUIVALENCE,{{RvVEUCRI,100},{RvVEUCRG,650},{RevBD,1500}};
EQUIVALENCE,{{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)},{CtPPanne,RLOGN(12000,4000)}};
EQUIVALENCE,{{NivR,LTRIB[2]}};
EQUIVALENCE,{{AgeD,ATRIB[2]},{TPanne,ATRIB[4]},{MMont,ATRIB[7]}};
EQUIVALENCE,{{Deblm,ATRIB[8]},{Finlm,ATRIB[9]},{Dlm,ATRIB[10]}};
EQUIVALENCE,{{DMtPrev,ATRIB[12]},{DMtCur,ATRIB[13]}};
EQUIVALENCE,{{MPanne,ATRIB[14]},{MRev,ATRIB[15]},{DRetAP,ATRIB[17]}};
EQUIVALENCE,{{RevVEU,ATRIB[18]}};
EQUIVALENCE,{{CtMOCur,ATRIB[24]},{CtMOPrev,ATRIB[25]}};
EQUIVALENCE,{{TAvPanne,ATRIB[26]},{TAvRev,ATRIB[27]}};
EQUIVALENCE,{{NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]},{PoslCRI,LL[5]},{PCRI,LL[6]}};
EQUIVALENCE,{{QCRI,LL[7]},{PoslCRG,LL[8]},{PCRG,LL[9]},{QCRG,LL[10]}};
EQUIVALENCE,{{NIm,LL[15]},{TIm,XX[6]},{TIndisp,XX[13]},{TTotal,XX[14]}};
EQUIVALENCE,{{Disp,XX[15]},{CtICRI,XX[16]},{CtICRG,XX[17]}};
EQUIVALENCE,{{SDeblm,XX[21]},{TImCour,XX[22]},{TRef,XX[23]}};
EQUIVALENCE,{{CtMt,XX[24]},{TRev,XX[26]},{CDPM,XX[27]},{ZDPM,XX[28]}};
INITIALIZE,0.0,43800.02,YES,,YES;
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};
RECORD,,Performances.xls,TNOW,"TEMPS",{EXCEL},,43800.02,,1,{{Ordre,"Ordre de
l'essai",},{Disp,"Disponibilité moy annuelle",},{CtMt/20,"Cout moy annuel maint",}};
MONTR,CLEAR,36500;
NETWORK,READ;
FIN;

```


Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau micro d'ARP-PA :

```

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,13000,YES,YES,1;
LIMITS,30,30,-1,40,10,-1;
EQUIVALENCE,{{TSim,7300},{NbAnSim,20},{TVis,59}};
EQUIVALENCE,{{DVL,RNORM(1.75,0.03125)},{DVC,RNORM(3,0.03125)}};
EQUIVALENCE,{{DVG,RNORM(3.125,0.03125)},{CtJVis,589.76}};
EQUIVALENCE,{{CtJVisR,500.24},{CtOuAmV,466782.86}};
EQUIVALENCE,{{CtCV,3000},{CtAEV,4000},{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRICN,RLOGN(70,3)},{DRGC,RLOGN(85,3)}};
EQUIVALENCE,{{NivR,LTRIB[2]},{NivV,LTRIB[3]}};
EQUIVALENCE,{{AgeD,ATRIB[2]},{Deblm,ATRIB[8]},{FinIm,ATRIB[9]}};
EQUIVALENCE,{{DIm,ATRIB[10]},{DR,ATRIB[11]}};
EQUIVALENCE,{{DMtPrev,ATRIB[12]},{MVis,ATRIB[13]}};
EQUIVALENCE,{{TPanne,ATRIB[14]},{MPanne,ATRIB[15]},{MRev,ATRIB[16]}};
EQUIVALENCE,{{CtMOPrev,ATRIB[25]},{TAvVis,ATRIB[27]}};
EQUIVALENCE,{{NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]},{PosIV,LL[12]}};
EQUIVALENCE,{{PCV,LL[13]},{QCV,LL[14]},{NIm,LL[15]}};
EQUIVALENCE,{{TIm,XX[6]},{TIndisp,XX[13]},{TTotal,XX[14]},{Disp,XX[15]}};
EQUIVALENCE,{{CtIV,XX[18]},{SDeblm,XX[21]},{TImCour,XX[22]}};
EQUIVALENCE,{{TRef,XX[23]},{CtMt,XX[24]},{TRev,XX[25]}};
INITIALIZE,0.0,14600.01,YES,,YES;
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};
RECORD,„Performances.xls,TNOW,„TEMPS“,{EXCEL},,14600.01,,1,{{Ordre,„Ordre de
l'essai",},{Disp,„Disponibilité moy annuelle",},{CtMt/20,„Cout moy annuel maint",}};
MONTR,CLEAR,7300;
NETWORK,READ;
FIN;

```


Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau macro de BRP :

```

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,43000,YES,YES,1;
LIMITS,30,30,-1,40,10,-1;
EQUIVALENCE,{{TSim,7300},{NbAnSim,20}};
EQUIVALENCE,{{DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRICN,RLOGN(70,3)}};
EQUIVALENCE,{{CtAVoy,2000*(UNFRM(0.0001,0.4184))*NINT(UNFRM(19.51,25.49))}};
EQUIVALENCE,{{CtJRev,1015.2333},{CtCRI,4000},{CtCRG,5000}};
EQUIVALENCE,{{CtAECRI,44000},{CtAECRG,108000}};
EQUIVALENCE,{{RvVEUCRI,100},{RvVEUCRG,650},{RevBD,1500}};
EQUIVALENCE,{{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)},{CtPPanne,RLOGN(12000,4000)}};
EQUIVALENCE,{{Indic,LTRIB[1]},{NivR,LTRIB[2]}};
EQUIVALENCE,{{AgeD,ATRIB[2]},{TPanne,ATRIB[4]},{MMont,ATRIB[7]}};
EQUIVALENCE,{{DebIm,ATRIB[8]},{FinIm,ATRIB[9]},{DIm,ATRIB[10]}};
EQUIVALENCE,{{DMtPrev,ATRIB[12]},{DMtCur,ATRIB[13]}};
EQUIVALENCE,{{MPanne,ATRIB[14]},{MRev,ATRIB[15]},{DRetAP,ATRIB[17]}};
EQUIVALENCE,{{RevVEU,ATRIB[18]},{CtMOCur,ATRIB[24]},{CtMOPrev,ATRIB[25]}};
EQUIVALENCE,{{TAvPanne,ATRIB[26]},{TAvRev,ATRIB[27]}};
EQUIVALENCE,{{NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]}};
EQUIVALENCE,{{PosICRI,LL[5]},{PCRI,LL[6]},{QCRI,LL[7]}};
EQUIVALENCE,{{PosICRG,LL[8]},{PCRG,LL[9]},{QCRG,LL[10]},{NIm,LL[15]}};
EQUIVALENCE,{{TIm,XX[6]},{TIndisp,XX[13]},{TTotal,XX[14]},{Disp,XX[15]}};
EQUIVALENCE,{{CtICRI,XX[16]},{CtICRG,XX[17]}};
EQUIVALENCE,{{SDebIm,XX[21]},{TImCour,XX[22]},{TRef,XX[23]}};
EQUIVALENCE,{{CtMt,XX[24]},{TRev,XX[26]}};
INITIALIZE,0.0,43800.02,YES,,YES;
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};
RECORD,,"Performances.xls,TNOW","TEMPS",{EXCEL},,43800.02,,1,{{Ordre,"Ordre de
l'essai",},{Disp,"Disponibilité moy annuelle",},{CtMt/20,"Cout moy annuel maint",}};
MONTR,CLEAR,36500;
NETWORK,READ;
FIN;

```

ANNEXE VIII

MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MICRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC

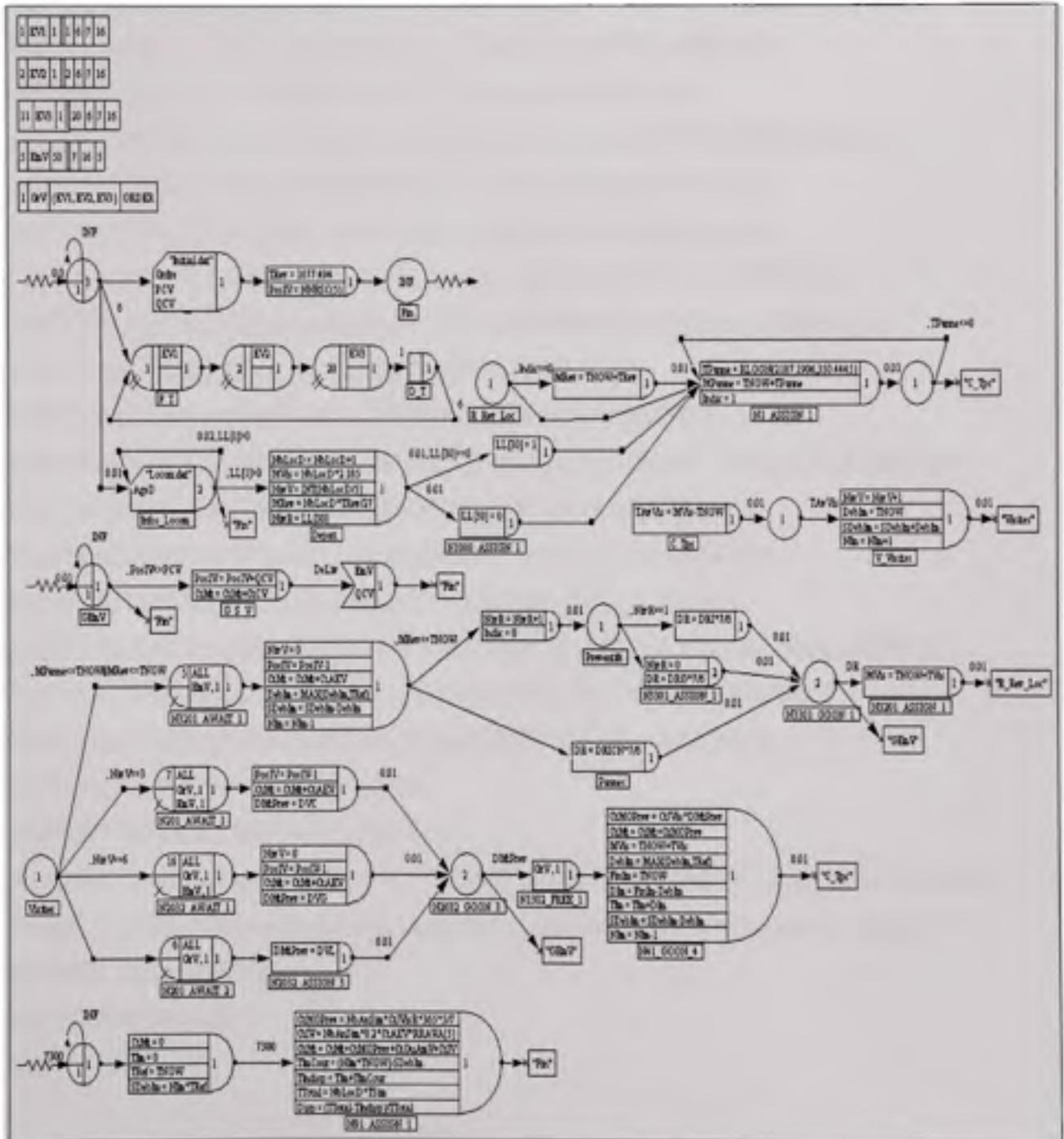


Figure VIII-1 Réseau du modèle de simulation du niveau micro de BRP.

Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau micro de BRP :

```

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,13000,YES,YES,1;
LIMITS,30,30,-1,40,10,-1;
EQUIVALENCE,{{TSim,7300},{NbAnSim,20},{TVis,59}};
EQUIVALENCE,{{DVL,RNORM(1.75,0.03125)},{DVC,RNORM(3,0.03125)}};
EQUIVALENCE,{{DVG,RNORM(3.125,0.03125)},{CtJVis,589.76}};
EQUIVALENCE,{{CtJVisR,500.24},{CtOuAmV,466782.86}};
EQUIVALENCE,{{CtCV,3000},{CtAEV,4000},{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
EQUIVALENCE,{{DRICN,RLOGN(70,3)},{DRGC,RLOGN(85,3)}};
EQUIVALENCE,{{Indic,LTRIB[1]},{NivR,LTRIB[2]},{NivV,LTRIB[3]}};
EQUIVALENCE,{{AgeD,ATRIB[2]},{DebIm,ATRIB[8]},{FinIm,ATRIB[9]}};
EQUIVALENCE,{{Dim,ATRIB[10]},{DR,ATRIB[11]}};
EQUIVALENCE,{{DMtPrev,ATRIB[12]},{MVis,ATRIB[13]}};
EQUIVALENCE,{{TPanne,ATRIB[14]},{MPanne,ATRIB[15]},{MRev,ATRIB[16]}};
EQUIVALENCE,{{CtMOPrev,ATRIB[25]},{TAvVis,ATRIB[27]}};
EQUIVALENCE,{{NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]},{PosIV,LL[12]}};
EQUIVALENCE,{{PCV,LL[13]},{QCV,LL[14]},{NIm,LL[15]}};
EQUIVALENCE,{{TIm,XX[6]},{TIndisp,XX[13]},{TTotal,XX[14]},{Disp,XX[15]}};
EQUIVALENCE,{{CtIV,XX[18]},{SDebIm,XX[21]},{TImCour,XX[22]}};
EQUIVALENCE,{{TRef,XX[23]},{CtMt,XX[24]},{TRev,XX[25]}};
INITIALIZE,0.0,14600.01,YES,,YES;
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};
RECORD,,Performances.xls,TNOW,"TEMPS",{EXCEL},,14600.01,,1,{{Ordre,"Ordre de
l'essai",},{Disp,"Disponibilité moy annuelle",},{CtMt/20,"Cout moy annuel maint",}};
MONTR,CLEAR,7300;
NETWORK,READ;
FIN;

```

ANNEXE IX

MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MACRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC ÉTENDU

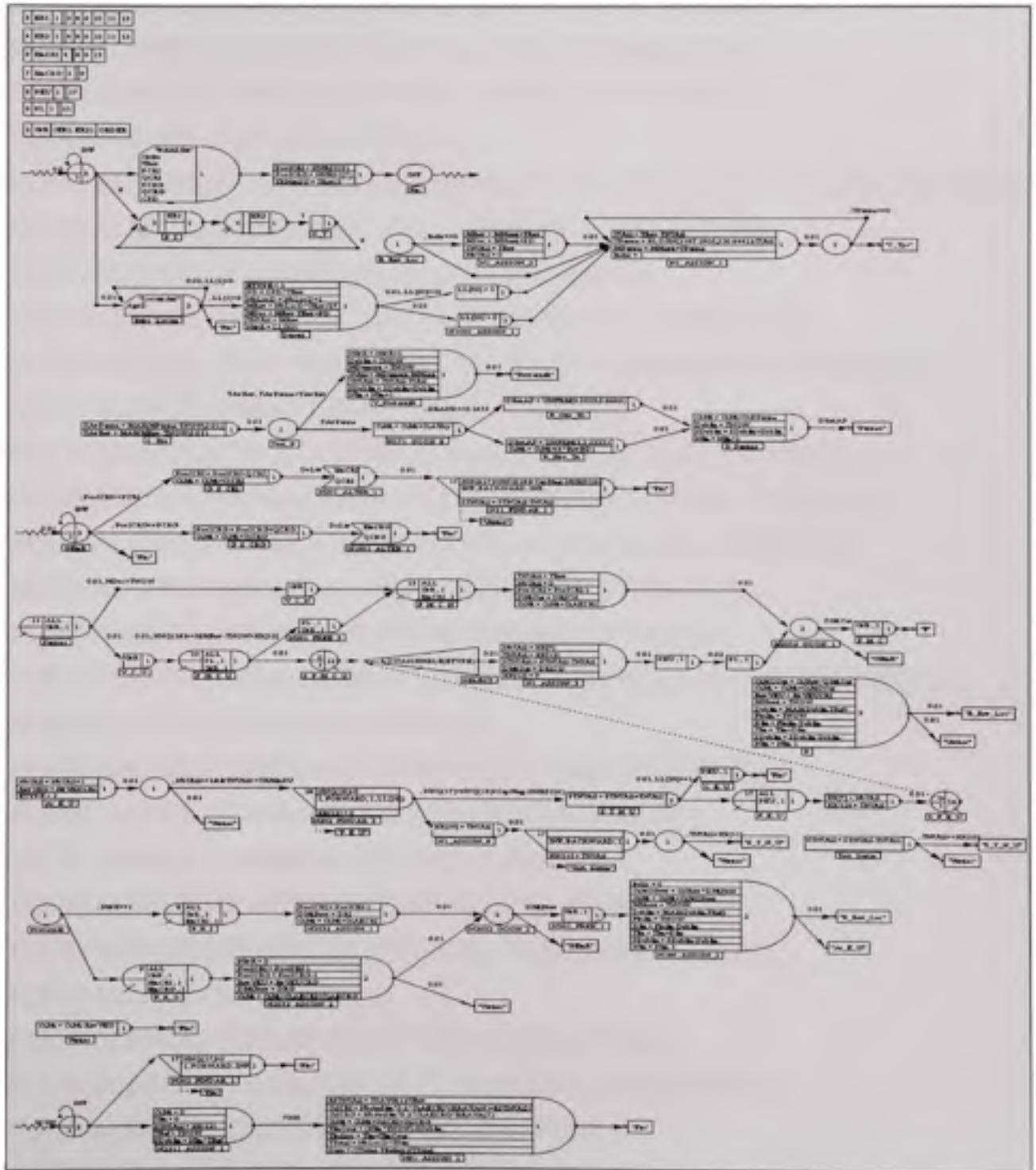


Figure IX-1 Réseau du modèle de simulation du niveau macro d'EBRP.

Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau macro d'EBRP :

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,62000,YES,YES,1;
 LIMITS,30,30,-1,40,10,-1;
 PRIORITY,{{17,HVF(ATRIB[1])}};
 EQUIVALENCE,{{TSim,7300},{NbAnSim,20},{TVis,59},{CapMag,15}};
 EQUIVALENCE,{{DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
 EQUIVALENCE,{{DRICN,RLOGN(70,3)},{DRICU,RLOGN(65,3)}};
 EQUIVALENCE,{{DRGC,RLOGN(85,3)}};
 EQUIVALENCE,{{CtAVoy,2000*(UNFRM(0.0001,0.4184))*NINT(UNFRM(19.51,25.49))}};
 EQUIVALENCE,{{CtJRev,1015.2333},{CtCRI,4000},{CtCRG,5000}};
 EQUIVALENCE,{{CtAECRI,44000},{CtAECRG,108000}};
 EQUIVALENCE,{{RvVEUCRI,100},{RvVEUCRG,650},{RevBD,1500}};
 EQUIVALENCE,{{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)},{CtPPanne,RLOGN(12000,4000)}};
 EQUIVALENCE,{{Indic,LTRIB[1]},{NivR,LTRIB[2]}};
 EQUIVALENCE,{{TNUtil,ATRIB[1]},{AgeD,ATRIB[2]},{MDec,ATRIB[3]}};
 EQUIVALENCE,{{TPanne,ATRIB[4]},{TUtil,ATRIB[5]},{MMont,ATRIB[7]}};
 EQUIVALENCE,{{DebIm,ATRIB[8]},{FinIm,ATRIB[9]},{DIm,ATRIB[10]}};
 EQUIVALENCE,{{MDemont,ATRIB[11]},{DMtPrev,ATRIB[12]}};
 EQUIVALENCE,{{DMtCur,ATRIB[13]},{MPanne,ATRIB[14]}};
 EQUIVALENCE,{{MRev,ATRIB[15]},{DRetAP,ATRIB[17]},{RevVEU,ATRIB[18]}};
 EQUIVALENCE,{{CtMOCur,ATRIB[24]}};
 EQUIVALENCE,{{CtMOPrev,ATRIB[25]},{TAvPanne,ATRIB[26]}};
 EQUIVALENCE,{{TAvRev,ATRIB[27]},{NbUtil,ATRIB[28]}};
 EQUIVALENCE,{{NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]}};
 EQUIVALENCE,{{PosICRI,LL[5]},{PCRI,LL[6]},{QCRI,LL[7]}};
 EQUIVALENCE,{{PosICRG,LL[8]},{PCRG,LL[9]},{QCRG,LL[10]}};
 EQUIVALENCE,{{NIm,LL[15]}};
 EQUIVALENCE,{{CPD,XX[4]},{PD,XX[5]},{TIm,XX[6]}};
 EQUIVALENCE,{{TIndisp,XX[13]},{TTotal,XX[14]},{Disp,XX[15]}};
 EQUIVALENCE,{{CtICRI,XX[16]},{CtICRG,XX[17]}};
 EQUIVALENCE,{{RSTNUtil,XX[19]},{STNUtil,XX[20]}};
 EQUIVALENCE,{{SDebIm,XX[21]},{TImCour,XX[22]},{TRef,XX[23]}};

```
EQUIVALENCE,{{CtMt,XX[24]},{TRMinSU,XX[25]},{TRev,XX[26]}};  
INITIALIZE,0.0,43800.02,YES,,YES;  
TIMST,1,STNUtil,"Somme Tps non utilisé";  
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};  
RECORD,,Performances.xls,TNOW,"TEMPS",{EXCEL},,43800.02,,1,{{Ordre,"Ordre de  
l'essai",},{Disp,"Disponibilité moy annuelle",},{CtMt/20,"Cout moy annuel maint",},{  
RSTNUtil,"Somme Ratio Non Utilisé",}};  
MONTR,CLEAR,36500;  
NETWORK,READ;  
FIN;
```

ANNEXE X

MODÈLE DE SIMULATION DU NIVEAU MICRO DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE DE TYPE BLOC ÉTENDU

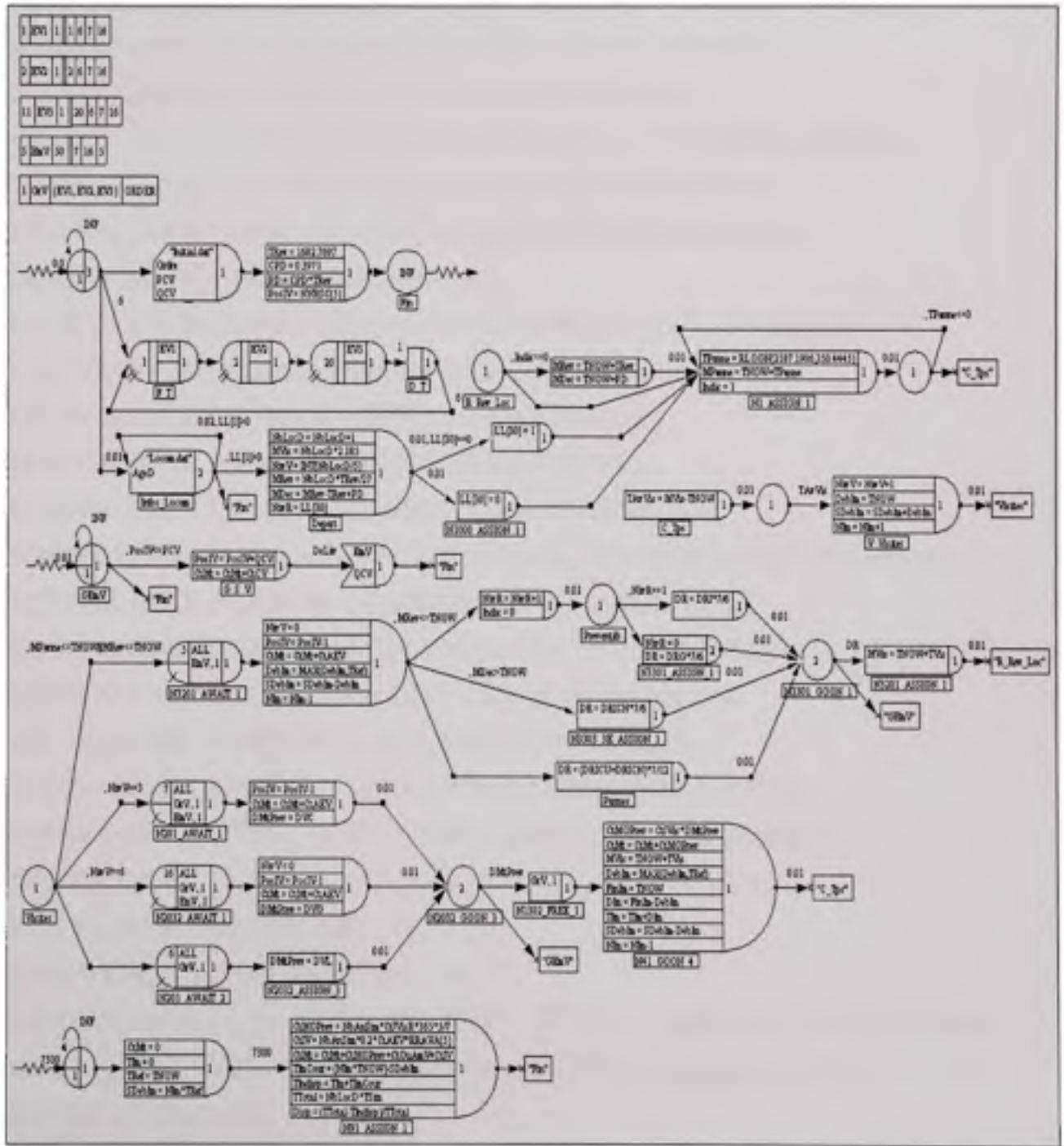


Figure X-1 Réseau du modèle de simulation du niveau micro d'EBRP.

Fichier de contrôle du modèle de simulation du niveau micro d'EBRP :

```

GEN,"M S BAGAYOKO","P M de Transrail",27 janvier 2006,13000,YES,YES,1;
LIMITS,30,30,-1,40,10,-1;
EQUIVALENCE,{ {TSim,7300},{NbAnSim,20},{TVis,59}};
EQUIVALENCE,{ {DVL,RNORM(1.75,0.03125)},{DVC,RNORM(3,0.03125)}};
EQUIVALENCE,{ {DVG,RNORM(3,125,0.03125)},{CtJVis,589.76}};
EQUIVALENCE,{ {CtJVisR,500.24},{CtOuAmV,466782.86}};
EQUIVALENCE,{ {CtCV,3000},{CtAEV,4000},{DeLiv,RNORM(283.5,10.5)}};
EQUIVALENCE,{ {DRI,RNORM(45,0.5)},{DRG,RNORM(60,0.5)}};
EQUIVALENCE,{ {DRICN,RLOGN(70,3)},{DRICU,RLOGN(65,3)}};
EQUIVALENCE,{ {DRGC,RLOGN(85,3)}};
EQUIVALENCE,{ {Indic,LTRIB[1]},{NivR,LTRIB[2]},{NivV,LTRIB[3]}};
EQUIVALENCE,{ {AgeD,ATRIB[2]},{MDec,ATRIB[3]}};
EQUIVALENCE,{ {Deblm,ATRIB[8]},{Finlm,ATRIB[9]}};
EQUIVALENCE,{ {Dlm,ATRIB[10]},{DR,ATRIB[11]}};
EQUIVALENCE,{ {DMtPrev,ATRIB[12]},{MVis,ATRIB[13]}};
EQUIVALENCE,{ {TPanne,ATRIB[14]},{MPanne,ATRIB[15]},{MRev,ATRIB[16]}};
EQUIVALENCE,{ {CtMOPrev,ATRIB[25]},{TAvVis,ATRIB[27]}};
EQUIVALENCE,{ {NbLocD,LL[2]},{Ordre,LL[4]},{PosIV,LL[12]}};
EQUIVALENCE,{ {PCV,LL[13]},{QCV,LL[14]},{NIm,LL[15]}};
EQUIVALENCE,{ {CPD,XX[4]},{PD,XX[5]},{TIm,XX[6]}};
EQUIVALENCE,{ {TIndisp,XX[13]},{TTotal,XX[14]},{Disp,XX[15]}};
EQUIVALENCE,{ {CtIV,XX[18]},{SDeblm,XX[21]},{TImCour,XX[22]}};
EQUIVALENCE,{ {TRef,XX[23]},{CtMt,XX[24]},{TRev,XX[25]}};
INITIALIZE,0.0,14600.01,YES,,YES;
REPORT,80,YES,YES,LAST,{{ALL,4}};
RECORD,,Performances.xls,TNOW,"TEMPS",{EXCEL},,14600.01,,1,{{Ordre,"Ordre de
l'essai",},{Disp,"Disponibilité moy annuelle",},{CtMt/20,"Cout moy annuel maint",}};
MONTR,CLEAR,7300;
NETWORK,READ;
FIN;

```

BIBLIOGRAPHIE

- Acharya, D., Nagabhushanam, G., & Alam, S. S. (1986). Jointly Optimal Block-Replacement and Spare Provisioning Policy. *IEEE Transactions on Reliability*, R-35(4), 447-451.
- Andriamaharoso, V. M. S. (1999). *Intégration des plans d'expériences et de la simulation pour solutionner des problématiques liées à la maintenance des systèmes manufacturiers*. École de Technologie Supérieure, Montréal.
- Armstrong, M. J., & Atkins, D. A. (1996). "Joint optimization of maintenance and inventory policies for a simple system," *IIE Trans.*, vol. 28, pp. 415-424.
- Barlow, R., & Hunter, L. C. (1960). Optimum Preventive Maintenance Policies. *Operations Research*, 8(1), 90-100.
- Barlow, R., & Proschan, F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Beit, M. (2004). *Planification de la production et des stratégies de maintenance des systèmes de production*. Montréal.
- Bhat, B. R. (1969). Used Item Replacement Policy. *Journal of Applied Probability*, 6, 309-318.
- Boland, P. J., & Proschan, F. (1982). Periodic Replacement with Increasing Minimal Repair Costs at Failure. *Operations Research*, 30(6), 1183-1189.
- Boulet, J. F., & Parent, L. (2004). *Projet de session du cours ING-800*: École de Technologie Supérieure.
- Boulet, J. F. (2007). *Optimisation simultanée des processus de production et des stratégies de maintenance*. Montréal.
- Boulet, J. F., Gharbi, A., & Kenné, J. P. (2009). Multiobjective optimization in an Unreliable failure-prone manufacturing system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*
- Brezavscek, A., & Hudoklin, A. (2003). Joint Optimization of Block-Replacement and Periodic-Review Spare-Provisioning Policy. *IEEE Transactions on Reliability*, 52(1), 112-117.
- Brown, M., & Proschan, F. (1983). Imperfect Repair. *Journal of Applied Probability*, 20, 851-859.

- Chelbi, A., & Aït-Kadi, D. (2001). Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure. *International journal of production economics*, 74, 183-189.
- Cox, D. R. (1962). *Renewal Theory*. Methuen.
- Derringer, G., Suich, R. (1980), *Simultaneous Optimization of several Response Variables*. *Journal of Quality technology*, 12(4), pp. 214-219.
- Derringer G. (1994), *A Balancing Act: Optimizing a Product's Properties*. *Qual. Prog.*, pp. 51-58.
- Doannio, A. D. A. H., & Pona, B. (1996). *Diagnostic et Management de la maintenance dans le secteur industriel malien*. École Nationale d'Ingénieurs, Bamako.
- El-Hajj, Z. (2000). *Optimisation et automatisation de la maintenance d'un système électromécanique*. École de Technologie Supérieure, Montréal.
- Gharbi, A., Girard, J., Pellerin, R., & Villeneuve, L. (1997). Bombardier Turned to Simulation to Validate the CF-18 Maintenance Program. *Institute for Operations Research and the Management Sciences*, 27(6), 22-34.
- Gharbi, A., & Kenné, J. P. (2000). Production planning problem in manufacturing systems with general failure and repair time distributions. *Production Planning & Control*, 11(6), 581-588.
- Harrington, E. C. Jr. (1965), *The Desirability Function*. *Industrial Quality Control*. 21(10), pp. 494-498.
- Huang, R., Meng, L., Xi, L., & Liu, C. R. (2008). Modeling and Analyzing a Joint Optimization Policy of Block-Replacement and Spare Inventory With Random-Leadtime. *IEEE Transactions on Reliability*, 57(1), 113-124.
- Jamali, M. A. (2004). *Modélisation et validation de politiques optimales de maintenance préventive* Université Laval, Québec et Facultés universitaires catholiques de Mons, Mons.
- Jiang, R., & Ji, P. (2002). Age replacement policy : A multi-attribute value model. *Reliability Engineering & System Safety*, 76(3), 311-318.
- Mehrez, A. & Stulman, A. (1981). "Age replacement in the presence of inventory constraints," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 183-189.
- Montgomery, D. C. (2005). *Design and Analysis of Experiments* (6th ed.): John Wiley & Sons, Inc.

- Nakagawa, T. (1980). A Summary of Imperfect Preventive Maintenance Policies With Minimal Repair. *RAIRO Recherche Opérationnelle / Operations Research*, 1(3), 249-255.
- Pham, H., & Wang, H. (1996). Imperfect Maintenance. *European Journal of Operational Research*, 94, 425-438.
- Pritsker, A. A. B., & O'Reilly, J. J. (1999). *Simulation with Visual SLAM and AweSim* (Second ed.): John Wiley & Sons, Inc.
- Tango, T. (1978). Extended Block Replacement Policy With Used Items. *Journal of Applied Probability*, 15(3), 560-572.
- Zohrul Kabir, A. B. M., & Farrash, S. H. A. (1996). Simulation of an integrated age replacement and spare provisioning policy using SLAM. *Reliability Engineering & System Safety*, 52(2), 129-138.}