

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

OPTIMISATION DES REMPLACEMENTS DE PNEUS SOUS CONTRAINTES DE
FIABILITÉ ET DE COÛTS :
CAS D'UNE SOCIÉTÉ DE TRANSPORT EN COMMUN

KAREM AMMAR

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2009

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

OPTIMISATION DES REMPLACEMENTS DE PNEUS SOUS CONTRAINTES DE
FIABILITÉ ET DE COÛTS :
CAS D'UNE SOCIÉTÉ DE TRANSPORT EN COMMUN

présenté par : AMMAR Karem

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. ADJENGUE Luc, Ph. D., président

M. OUALI Mohamed-Salah, ing., Doct., membre et directeur de recherche

M. GAMACHE Michel, ing., Ph. D., membre et codirecteur de recherche

Mme YACOUT Soumaya, D. Sc., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à monsieur Mohamed-Salah Ouali qui fut pour moi un directeur de maîtrise attentif et disponible malgré ses nombreuses responsabilités. Je lui suis très reconnaissant.

Je suis extrêmement reconnaissant à monsieur Michel Gamache, mon codirecteur, pour l'aide qu'il m'a fourni dans la réalisation de ce travail, pour ses avis toujours éclairés et pour sa disponibilité. J'ai beaucoup appris à son contact.

Je remercie les membres de jury, monsieur Luc Adjengue, professeur à l'École Polytechnique de Montréal et madame Soumaya Yacout, professeure de l'École Polytechnique de Montréal, pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

RÉSUMÉ

La fiabilité des systèmes est largement conditionnée par les caractéristiques propres de chaque matériel, ses conditions d'utilisation et son environnement. La durée de vie des systèmes industriels, plus particulièrement les pneus des autobus urbains est limitée. Leur nombre de défaillance augmente dramatiquement avec le temps, de plus, les mécanismes de dégradations de pneumatique créent des phénomènes de vieillissement.

Notre mémoire poursuit deux principaux objectifs:

1. Établir des modèles de défaillances des pneus et des modèles de dégradation par usure en tenant compte des conditions d'utilisation des pneus des autobus à plancher bas.
2. Développer un modèle de planification de remplacement des pneus d'autobus prenant en compte les modèles précédents et les coûts afférés.

La première partie de ce mémoire s'est intéressée à la fiabilité des pneus des autobus. Nous avons présenté les méthodes statistiques utilisées pour déterminer les lois de défaillance ainsi que les modèles de dégradation par usure, et ce pour caractériser les pneus.

La seconde partie de ce travail de recherche a développé un modèle de planification des remplacement des pneus des autobus en tenant compte des modèles déjà établis précédemment. Pour ce faire, un programme informatique a été implémenté pour évaluer les meilleurs scénarios de remplacement des pneus à moindre coût.

ABSTRACT

The reliability of road vehicles such as trucks and bus is largely affected by the intrinsic characteristics of their components, the condition of roads and the environment parameters (i.e., temperature, humidity, etc.). The lifetime of many depredated component of these road vehicles, in particular tires is truncated because the accumulated damage and the failure increasing

This work aims to:

- Establish several damage models representing the wear of tires and stochastic complete failures;
- Develop a planning model of tire replacements taking into account previous damage models and the associated costs.

The first contribution of this master consists on characterizing the reliability of tires using parametric models. The second contribution consists on purposing an optimization model based on the previous damage models.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	x
LISTE DES ANNEXES.....	xi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE.....	4
1.1 Caractéristiques techniques des pneus	4
1.2 Caractérisation du vieillissement des pneus.....	5
1.2.1 Modes de défaillance d'un pneu.....	5
1.2.2 Modèles de dégradation phénoménologiques des pneus.....	7
1.2.3 Modèles de défaillance.....	8
1.3 Stratégies de maintenance	10
CHAPITRE 2 : ÉTUDES STATISTIQUES DES DONNÉES	14
2.1 Description des données.....	14
2.2 Exploration des données.....	17
2.3 Modèles de défaillance.....	20
2.4 Modèles de dégradation	23
CHAPITRE 3 : MODÈLE DE PLANIFICATION	29
3.1 Processus de planification	29

3.2	Coûts de remplacement des pneus	33
3.3	Stratégie de résolution et exemple	35
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		38
BIBLIOGRAPHIE		40
ANNEXES		44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Exemple des données historiques des pneus à plancher bas	14
Tableau 2.2 Exemples de données de défaillance traitées	15
Tableau 2.3 Exemple de données historiques des mesures des pneus à plancher bas	15
Tableau 2.4 Exemple de données de dégradation par usure traitées	16
Tableau 2.5 Table de fréquence du facteur raison d'enlèvement.....	19
Tableau 2.6 Table de fréquence du facteur type de semelle	19
Tableau 2.7 Table de fréquence de raison d'enlèvement VS type semelle.....	20
Tableau 2.8 Distribution de défaillance suivant le type semelle O.....	21
Tableau 2.9 Distribution de défaillance suivant le type semelle UD	22
Tableau 2.10 Distribution de défaillance suivant le type semelle AD	22
Tableau 3.1 Exemple de fichier autobus	30
Tableau 3.2 Fichier d'inventaire des pneus.....	31
Tableau 3.3 Tableau résumant les différents scénarios.....	32
Tableau 3.4 Tableau résumant les coûts C_i, jR_0 par scénario en fonction de la position du pneu sur l'essieu.....	34
Tableau 3.5 Exemple de solution	36
Tableau 3.6 Coût total pour les solutions admissibles	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Les composants du pneumatique (Michelin, 2004)	4
Figure 2.1 Pareto des variables X1, X2, X3 et X4	18
Figure 2.2 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle originale)	24
Figure 2.3 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle UD)	25
Figure 2.4 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle UD)	25
Figure 2.5 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle UD)	26
Figure 2.6 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle AD)	26
Figure 2.7 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle AD)	27
Figure 2.8 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle AD)	27
Figure 3.1 Coût total en fonction de solutions possibles.....	37

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

STU :	Société de Transport Urbain
SAAQ :	Société d'Assurance Automobile de Québec
AMDE :	Analyse des Modes de Défaillances et de leur Effets
PHM :	Modèle de Hasard Proportionnel
TBS :	Tread and Belt Separation
VBA	Visual Basic for Application
O :	Originale
UD :	Ultra Drive
AD :	Artic Drive
U :	Usure
UB :	Usure par Bosse
DF :	Déchirure de Flanc
FU :	Flanc Usé
CR :	Crevaision
SP :	Spare

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : PROGRAMME INFORMATIQUE.....	44
--	----

INTRODUCTION

Motivé par la recherche de solutions durables au problème de réchauffement climatique, le secteur de transport en commun a observé une forte croissance. Plusieurs sociétés de transport en commun ont dû revoir à la hausse leurs offres de service tant par rapport à l'augmentation du nombre de lignes de transport que par rapport à la fréquence de passage des autobus. Cette augmentation de l'offre sollicite davantage les autobus et les rend de plus en plus vulnérables. Certains composants d'usure, tels que par exemples les pneus, les freins, les amortisseurs, etc. sont sujets à une dégradation plus accélérée que dans un mode de fonctionnement normal.

Afin de garantir une meilleure disponibilité des autobus, le service de maintenance doit optimiser ces activités de remplacement des composants d'usure tout en assurant une certaine fiabilité des autobus sur la route avec des coûts de maintenance sous contrôle. Parmi les composantes de l'usure les plus problématiques pour la sécurité des autobus et qui coûtent assez cher en remplacement nous retrouvons les pneus.

Par ailleurs, pour mieux contrôler les dépenses liées à la maintenance des pneus, la plupart des sociétés de transport en commun disposent généralement d'un service dédié à l'inspection et aux remplacements des pneus. À l'image d'une société de transport en commun de la grande région de Montréal et que nous nommerons Société de Transport Urbain « STU », lors de la réception d'un autobus, le préposé aux pneus applique une procédure simple d'inspection qui consiste à vérifier l'état général des pneus et à mesurer leur usure. Si le préposé juge que le pneu doit être remplacé alors il planifie l'autobus sur les deux semaines à venir pour effectuer les remplacements nécessaires. Pour ce faire, le préposé aux pneus utilise un certain nombre de critères techniques tels que la différence d'usure entre les différents pneus montés sur le même essieu et l'usure maximale acceptable pour procéder au remplacement.

Avec cette façon de faire, il est clair que plusieurs commentaires peuvent être soulevés :

- La planification des remplacements des pneus s'effectue actuellement sur le très court-terme (une à deux semaine de délai);

- Il n'y a aucune évaluation de la pertinence d'une décision de remplacer un pneu ou un ensemble de pneus sur le moyen ou le long terme (quelques mois à un an). Par exemple aucune prévision de la dégradation des pneus n'est faite;
- Bien que le remplacement d'un pneu soit souvent justifié par sa dégradation, il reste que l'autobus est à chaque fois immobilisé pour ce remplacement. Le fait de coordonner davantage le remplacement de plus d'un pneu d'un autobus pourrait diminuer son immobilisation et réduire les coûts de la main-d'œuvre;
- Étant donné que les coûts d'inventaire des pneus sont souvent élevés, on parle de quelques centaines de milliers de dollars, alors il serait judicieux d'en tenir compte dans la planification afin de garder une dépense plus ou moins équilibrée entre les périodes de planification.

L'objectif de ce travail est de développer un modèle de planification des remplacements des pneus d'un autobus basé sur la dégradation de ces derniers et en minimisant les coûts de maintenance. Plus précisément, à partir d'un ensemble de données de défaillance des pneus collectées auprès de la STU, nous chercherons à caractériser le vieillissement de pneus par des modèles d'usure et de défaillance stochastiques et ensuite nous utiliserons ces modèles pour planifier leur remplacement.

Pour ce faire, nous développons tout d'abord les modèles de vieillissement des pneus. Ensuite, nous développons le modèle de planification à moyen terme. Nous parlons d'un horizon de 10000 km ou de 2 à 4 mois. Les modèles statistiques sont proposés pour caractériser le vieillissement des pneus. Un programme écrit en VBA avec EXCEL constitue un support de calcul et développement pour le modèle de planification.

Le mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente tout d'abord les caractéristiques techniques d'un pneu. Par la suite, ce chapitre décrit les différents modes de défaillance d'un pneu ainsi que les moyens de les détecter. Il propose également une revue de littérature portant sur les modèles de vieillissement des pneus. Ces modèles sont décomposés en deux catégories : les modèles d'accumulation de la dégradation et les modèles de défaillance complète. Enfin, ce chapitre présente les différentes activités de maintenance liées à l'entretien

d'un pneu ainsi quelques stratégies d'inspection et de remplacement susceptibles d'être utilisées dans le modèle de planification.

Le second chapitre présente les résultats de l'étude statistique que nous avons entreprise sur l'échantillon de données que nous avons reçu de la société STU. Une première section de ce chapitre est dédiée à la description des données et à l'organisation de cette étude statistique. Plusieurs tests statistiques ont été effectués pour déterminer les modes de défaillance de pneu les plus importants. La technique de régression linéaire a été utilisée pour élaborer les modèles de dégradation par usure. Pour les modèles de défaillance complète, des lois de distributions paramétriques ont été appliquées.

Dans le chapitre 3, nous présentons le modèle de planification. Ce modèle est basé sur les modèles de dégradation par usure et les modèles de défaillance complète. Le programme informatique permet de prendre en compte un certain nombre de règles techniques appliquées aux remplacements de pneus. Une méthode énumérative est utilisée pour déterminer la meilleure solution qui maximise la fiabilité et minimise les coûts de maintenance des remplacements de pneus effectués.

À la fin du mémoire, nous rappelons les principaux résultats obtenus. Quelques pistes de développements futurs seront identifiées.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

Nous présentons dans ce chapitre une revue de littérature des principaux modèles de vieillissement des pneus, en particulier les modèles permettant de représenter l'accumulation du dommage par dégradation et les modèles de défaillance totale. Nous présentons également les modèles de stratégies d'inspection et de remplacement applicables à la maintenance des pneus. Mais tout d'abord, afin de cerner et comprendre le comportement d'un pneu, nous proposons à la section 1.1 un résumé des principales caractéristiques techniques d'un pneu. Dans la section 1.2, nous présentons les modèles de caractérisation du vieillissement des pneus. La section 1.3 décrit les stratégies de maintenance.

1.1 Caractéristiques techniques des pneus

Un pneu est un système complexe constitué de plusieurs composants fabriqués à partir de divers matériaux. Plus de 90% des matériaux constituant un pneu sont des polymères en particulier le caoutchouc ou des dérivés du caoutchouc (Benoît *et al.*, 2006). La figure 1.1 présente les différents composants d'un pneu.

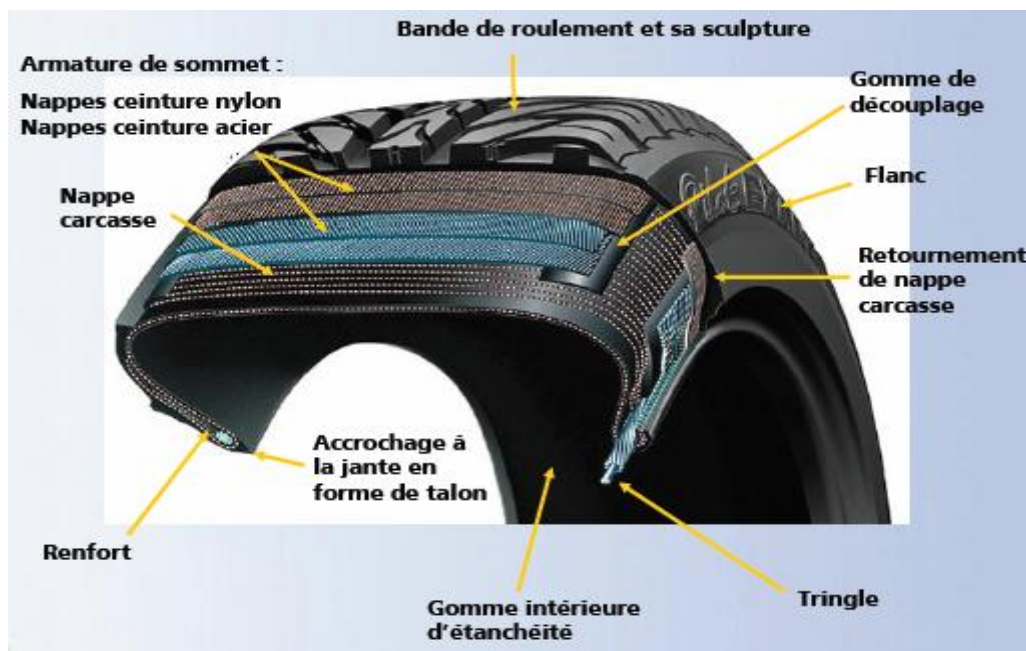


Figure 1.1 Les composants du pneumatique (Michelin, 2004)

Un pneu est constitué principalement d'une carcasse et d'une bande de roulement (Michelin, 2004). La carcasse d'un pneu est constituée de plusieurs couches, ou nappes, disposées en biais les unes par rapport aux autres selon un angle spécifique. C'est la carcasse qui assure la rigidité du pneu et qui permet de réduire les déformations du pneu dues entre autre à la vitesse, à la température et à la nature de la route. La carcasse est divisée en trois parties: le talon, très rigide, qui garantit la fixation à la jante; le flanc, plus souple; et la gomme de découplage.

La carcasse du pneu est surmontée d'une ceinture constituée à son tour de plusieurs nappes armées de câbles métalliques. Cette armature est constituée d'une seule couche textile mince et recouverte par la gomme. Ensuite vient la dernière composante du pneu, la bande de roulement. Cette bande de roulement donne la sculpture du pneu. Les fabricants de pneus mettent sur le marché plusieurs types de sculptures avec des dimensions différentes. Les composants les plus sollicités d'un pneu sont généralement, la bande de roulement et les flancs.

1.2 Caractérisation du vieillissement des pneus

Le vieillissement d'un pneu est un sujet assez bien étudié dans les laboratoires des fabricants de pneus. Il s'agit ici d'une rude course entre les fabricants les plus connus dans le monde (Michelin, Firestone, Pirelli, Good Year, etc.). Il n'y a pas beaucoup de publications scientifiques qui présentent la recherche fondamentale dans ce domaine. Nous trouvons plutôt quelques articles décrivant les facteurs influençant le vieillissement des pneus, les modes de défaillance les plus usuels et un petit nombre d'articles présentant des modèles de dégradation phénoménologiques. Dans ce qui suit, nous présentons les principaux modes de défaillance d'un pneu, les quelques modèles de dégradation recensés dans la littérature et un ensemble de modèles basés sur les modes de défaillance complète et pouvant être facilement utilisés dans la caractérisation du vieillissement d'un pneu.

1.2.1 Modes de défaillance d'un pneu

Le mode de défaillance le plus rencontré est l'usure de la bande de roulement. Cette usure se manifeste par la perte de la forme de la sculpture du pneu par rapport à sa forme initiale. Ce mode se détecte généralement par la mesure de l'épaisseur des rainures de la bande roulement. Le contrôle de cette usure est important puisque celle-ci engendre une perte de l'adhérence du pneu à

la chaussée. Les codes de transports routiers spécifient explicitement la profondeur minimale des rainures de la bande de roulement, et ce pour une meilleure sécurité des usagés de la route (Société d'Assurance Automobile de Québec 2002). En effet, plus les pneus d'un véhicule sont usés, plus les distances de freinage seront longues, notamment sur une chaussée mouillée ou enneigée, et plus le risque d'aquaplaning augmentera.

Le deuxième mode de défaillance est l'usure par bosse. Ce mode se manifeste par l'apparition d'une ou plusieurs bosses sur la bande de roulement. Il peut être lié à un défaut au niveau des nappes de l'armature de sommet ou également à l'usure de la bande de roulement. L'apparition de ce mode de défaillance fait travailler beaucoup les amortisseurs d'un véhicule, donne un inconfort dans la conduite et engendre un malaise pour les usagés sous l'effet de la vibration. Ce mode est généralement détecté par le conducteur du véhicule ou lors d'une inspection au garage.

Le troisième mode de défaillance est l'usure du flanc du pneu. Il se manifeste par des coupures accidentelles suite à une pénétration des corps étrangers (pierres, verre, métal, etc.). Ce mode de défaillance est traduit aussi par une rupture de la carcasse soit par un choc (rupture des câbles métalliques lors d'un heurt violent sur un obstacle), soit par frottement (frottements répétés sur les bordures d'un trottoir ce qui engendre des détériorations de la carcasse) ou par fatigue (roulage temporaire en sous-gonflage ou à plat suite à une perforation par un clou par exemple). Le conducteur peut facilement détecter ce mode de défaillance.

Le quatrième mode est la déchirure du talon. Ce mode se manifeste par des détériorations au talon qui sont dues à des déformations de la jante ou l'utilisation d'outils de montage non appropriés au moment des remplacements de pneus. Un échauffement excessif de l'ensemble freins/jante suite à des freinages prolongés peut aussi détériorer le talon.

Le cinquième mode de défaillance est la crevaison. Ce mode apparaît suite à une perforation du pneu par un clou ou un autre objet pointu. Ce mode est détecté lorsque le pneu se dégonfle et rend très difficile la circulation même à faible vitesse.

Les conditions d'exploitation d'un pneu telles que la charge du véhicule, la nature de la chaussée (asphalte, gravier, etc.) et le mode de conduite urbain ou sur grande distance constituent des facteurs d'influence non négligeables sur le vieillissement d'un pneu. Les paramètres techniques

intrinsèques au pneu tels que la pression de gonflage, sa température, la largeur de la jante ou encore la position du pneu sur le véhicule et le parallélisme des roues contribuent à leurs tours au vieillissement du pneu. Dans la section 1.3, nous présenterons les actions de maintenance nécessaires pour l'entretien du pneu. Mais juste avant nous présentons les modèles de dégradation phénoménologiques des pneus issus de la littérature ainsi que les modèles de défaillance stochastiques.

1.2.2 Modèles de dégradation phénoménologiques des pneus

Deux types de modèles de dégradation phénoménologiques sont distingués dans la littérature (Benoît *et al.*, 2006) : le vieillissement physique et le vieillissement chimique.

Fayolle et Verdu (2002) étudient la perte des caractéristiques physiques et mécaniques d'un pneu. Leur modèle permet d'établir le lien entre la perte de ces caractéristiques et les phénomènes de cristallisation et fatigue du pneu. Le modèle considère que les altérations chimiques sont contrôlées.

Le modèle de Verdu (2002) caractérise le vieillissement chimique d'un pneu. Il conclut que ce vieillissement correspond en fait à une modification de la structure du polymère. Il s'agit d'une dégradation des molécules du polymère, par exemple : après fatigue, corrosion ou usure. Ce type de vieillissement est pratique car il distingue les mécanismes dont les effets sont macroscopiquement observables, tels que les fissures et la perte de matière, et les mécanismes dont les effets sont indétectables sans mesures spécifiques telles que la mesure de dureté ou la mesure de résistivité du pneu.

Dolez *et al.* (2007) étudient les principaux phénomènes chimiques contribuant à la dégradation de la matrice des pneus. Leur recherche s'intéresse à l'identification des réactions chimiques telles que la pyrolyse, la thermo-oxydation et la combustion et leurs effets sur la dégradation de la matrice polymère du pneu.

Hofmann (1989) étudie l'effet de l'oxydation sur la dégradation des pneus. En effet, sous certaines conditions d'exploitation, en particulier lorsque la température interne du pneu atteint un seuil suffisamment élevé, il se produit plusieurs phénomènes chimiques complexes tels que la thermo-oxydation et l'oxydation. Le réchauffement de l'air à l'intérieur du pneu contribue à

l'augmentation de la pression interne et la dégradation du caoutchouc par oxydation. Cette oxydation semble produire une réaction chimique caractérisée par un dégagement de chaleur qui peut conduire dans une certaine mesure à l'explosion du pneu.

Bobo (1988) étudie les différents facteurs influant la fatigue d'un pneu. La fatigue est une cause de dégradation assez déterminante de la durée de vie d'un pneu. Elle se manifeste par des microfissures au sein du matériau du pneu sous l'effet d'une charge mécanique cyclique. Elle dépend d'un grand nombre d'autres facteurs telles que la pression de gonflement, la vitesse de rotation, les accélérations longitudinale, latérale et verticale, la largeur de la jante, le type de surface de la route et le climat.

Cette revue des modèles de dégradation phénoménologiques montre la complexité des phénomènes physiques et chimiques sous-jacents. La plupart de ces travaux sont conduits en laboratoire afin de contrôler l'environnement de dégradation des pneus.

1.2.3 Modèles de défaillance

Il existe plusieurs catégories de modèles de défaillance étudiées dans la littérature. Les modèles qualitatifs tels que les modèles basés sur l'analyse des modes de défaillance en particulier les AMDE (Poulin et Poirier, 2008) et les arbres de défaillance (Yves, 2002.), et les modèles quantitatifs plus particulièrement les modèles stochastiques tels que les lois de probabilité de défaillance et les modèles de risque proportionnel (Cox, 1972). Nous présentons dans ce qui suit une revue des principaux modèles recensés dans la littérature et pouvant être utilisés dans la modélisation de la défaillance des pneus. Cipoire (2006) propose un modèle de défaillance de composants mécaniques basé sur la loi de Weibull. Le modèle considère deux variables de décision: la durée d'usage et la distance parcourue. Ces deux variables sont agrégées en une seule afin de modéliser au mieux les sollicitations subies par le composant.

Le modèle de Weibull est utilisé aussi par Garni (1999) pour analyser les temps de défaillances des freins d'un avion. La méthode de régression est utilisée pour estimer les paramètres du modèle de Weibull. Les résultats du modèle montrent un taux de défaillance croissant (le paramètre de forme est supérieur à 1), Ce qui veut dire que les freins s'usent avec l'âge et la distance. Ces résultats sont utilisés pour optimiser une stratégie de remplacement des freins sur les avions Boeing 737, de déterminer le soutien logistique sur un horizon de planification donné.

Cox (1972) a proposé un modèle de risque proportionnel. Ce modèle est connu dans la littérature comme étant le modèle de risque proportionnel de Cox (Cox's Proportionnal Hazard Model) ou PHM. Ce modèle exprime le taux de défaillance d'un composant tenant en compte des conditions d'usage et de son environnement. Il est composé de deux fonctions : une fonction de risque de base donnant le risque de défaillance du composant lorsque l'effet des variables caractérisant les conditions d'usage et d'environnement de fonctionnement est nul et une fonction exprimant l'effet des variables sur le taux de défaillance. Dans la littérature, on parle de fonction d'influence et de covariables. La fonction de base est généralement modélisée par la loi de Weibull à deux paramètres et dont la variable est l'âge chronologique du composant. La fonction d'influence est une fonction exponentielle positive qui permet de prendre en compte l'effet des covariables. Le modèle de Cox est appliqué dans plusieurs domaines dont la médecine (Carroll 2003) et surtout depuis plus d'une dizaine d'années dans le domaine de la maintenance conditionnelle (Ghasemi *et al* 2007).

Lanternier *et al.* (2008) proposent une modélisation du taux de défaillance d'une famille de soupapes de sécurité en fonction du temps d'usage et des facteurs d'influences tels que la pression nominale, le niveau de fuite et les dimensions de la soupape. Les résultats obtenus par le modèle PHM ainsi construit montrent que ces facteurs ont un effet significatif sur le temps de bon fonctionnement de cette famille de soupape.

Courilleau et Marion (1999) font une comparaison de deux modèles d'estimation de la fonction de survie appliquée à des données censurées des deux côtés sur la dégradation des chaussées. Le premier modèle est le modèle de Cox. Le second est un modèle d'estimation non paramétrique de la loi de survie. Compte tenu de la taille de l'échantillon étudié, les auteurs concluent que la loi de survie est plus appropriée que le modèle de Cox.

Krivtsov et Tananko (2002) proposent une approche empirique pour caractériser la défaillance d'un pneu à l'aide d'un modèle stochastique. Ils analysent particulièrement un mode de défaillance qui se manifeste entre la bande de roulement et la roue, connu sous le nom TBS « Tread and belts separation ». Les données utilisées sont le résultat d'expériences en laboratoire et donnent les durées de vie (âge) du pneu jusqu'à l'occurrence du mode de défaillance TBS en fonction d'un certain nombre de paramètres liés à la géométrie du pneu, par exemple l'épaisseur de la semelle, et à ses propriétés physiques telles que la force d'adhésion entre la bande de

roulement et la carcasse. Le modèle proposé est basé sur une régression de Cox de la variable indépendante « âge du pneu » et les variables explicatives caractérisant les paramètres géométriques et physiques du pneu. Les résultats obtenus montrent bien l'influence des variables explicatives sur l'âge du pneu. Ce qui démontre l'utilité de ce genre d'analyse pour établir les liens entre les conditions d'usage d'un pneu et sa durée de vie.

Ces dernières applications montrent qu'il serait possible d'utiliser le PHM pour modéliser le vieillissement des pneus.

1.3 Stratégies de maintenance

Avant de présenter les stratégies de maintenance, il est important d'identifier et de décrire les différentes actions de maintenance liées à l'entretien des pneus. Ces actions sont :

- Inspection. L'inspection d'un pneu consiste à vérifier à une périodicité donnée l'état externe du pneu, présence de signes d'usure des flancs, d'usure par bosse et la mesure de l'usure de la profondeur de la bande de roulement (semelle). Dans le cas de la société de transport considérée, cette inspection est réalisée à tous les 10000 Km, une périodicité qui correspondrait à celle des changements de l'huile moteur;
- Démontage. Cette action consiste à démonter le pneu de sa jante lorsque le pneu présente un ou plusieurs modes de défaillance, soit par dégradation telles que par exemples dépassement de l'usure permise de la semelle ou de flanc, soit après défaillance complète en cas par exemple de déchirure du flanc. Le démontage peut également concerner des pneus non défaillant lorsque le préposé aux pneus n'arrive pas à trouver des pneus qui peuvent s'assortir ensemble;
- Réparation. La réparation d'un pneu est une action qui consiste à remettre en état un pneu. Cette action est appliquée par exemple après crevaison, après une usure de la semelle ou après une usure par bosse. Dans ces deux derniers cas, le pneu est envoyé à un sous-traitant spécialisé dans le reconditionnement des pneus. Cette réparation consiste à doter la carcasse d'un pneu d'une nouvelle bande de roulement. Le reconditionnement s'appelle également rechapage du pneu.

- Montage. Cette action consiste à monter un pneu neuf ou reconditionné sur une roue. Selon l'expérience des préposés à l'entretien des pneus, le montage d'un pneu neuf prend moins de temps qu'un pneu reconditionné, car le flanc d'un pneu neuf colle mieux sur la jante de la roue.
- Remplacement. Le remplacement d'un pneu intervient dès qu'un autobus entre dans le garage pour un problème de réparation d'un pneu. Le préposé aux pneus peut remplacer uniquement le pneu défaillant ou être amené à remplacer plusieurs.

Selon ces dernières actions de maintenance, nous pouvons distinguer trois catégories de stratégies : les stratégies d'inspection, les stratégies de défaillance limite et les stratégies de remplacement opportuniste. Les stratégies d'inspection pourraient s'adresser à l'optimisation de la périodicité d'inspection et des prises de mesures d'usure. Les stratégies de défaillance limite pourraient caractériser le seuil de dégradation critique pour effectuer le remplacement d'un pneu. La dernière catégorie de stratégie est celle des stratégies opportunistes. Ces stratégies permettraient de chercher les meilleurs couplages des pneus entre eux. Nous allons dans ce qui suit présenter les modèles recensés dans la littérature relatifs à ces trois catégories de stratégies de maintenance.

Les stratégies d'inspection sont utilisées pour inspecter et remplacer le système défaillant et ce, pour limiter l'impact lié à la dégradation. Deloux et *al.* (2007) proposent un modèle de maintenance permettant l'optimisation du coût de maintenance par unité de temps. Le système étudié possède deux modes de défaillance qui sont l'usure et le stress lié à un environnement stressant. La stratégie d'inspection ainsi développée illustre l'intérêt de combiner les approches conditionnelles et la surveillance des procédés.

Dans les stratégies de défaillance limite, le remplacement préventif est effectué une fois que la performance du composant se dégrade en dessous d'un niveau prédéterminé. Dans (Bergman, 1980), un composant est remplacé à la défaillance ou lorsque le niveau de dégradation, de dommage accumulé ou de stress dépasse un seuil critique prédéfini. Ce niveau est caractérisé par la fonction du taux de défaillance. Le modèle minimise le coût total moyen de maintenance sur un horizon infini. La stratégie optimale est caractérisée par l'âge moyen T^* avant que le taux de défaillance ne dépasse le seuil maximum toléré.

Lie et Chun (1986) proposent une stratégie dans laquelle deux types d'actions de maintenance sont considérés : préventif simple (type 1) et remplacement (type 2). Ces actions sont planifiées de manière à ce que la fiabilité du composant ne descende pas en dessous d'un certain seuil prédéterminé. Jayabalan et Chaudhuri (1992) modélisent la même stratégie en considérant les coûts actualisés des actions de maintenance pendant un nombre fini de périodes.

Chan et Shaw (1993) présentent un modèle général où le seuil de performance dépend simultanément de l'âge du composant et des remplacements préventifs effectués. Le modèle introduit la disponibilité comme une variable aléatoire et cherche à la maximiser entre deux remplacements préventifs consécutifs. Le modèle est testé avec un taux de défaillance croissant (loi de Weibull).

Les stratégies opportunistes sont des stratégies qui découlent directement de la dépendance économique entre les différents composants d'un système. Le principe de base est de profiter des arrêts planifiés ou fortuits de certains composants du système pour effectuer un remplacement préventif sur d'autres composants. Zheng et Fard (1991) proposent une stratégie opportuniste pour un système constitué de plusieurs composants. Dans cette stratégie, lorsqu'un composant est remplacé, tous les composants dont les taux de défaillance se trouvent dans un intervalle prédéterminé sont remplacés également.

Dagpunar (1996) génère les opportunités des remplacements préventifs selon un processus de Poisson homogène (taux d'arrivée constant). A chaque opportunité qui se présente, le système peut être remplacé à un coût C si son âge t dépasse une certaine limite prédéterminé K .

Pham et Wang (2000) étudient la maintenance opportuniste d'un système dont les composants sont agencés selon une structure $k - \text{parmi} - n$. Les composants sont sujets à la défaillance partielle (i.e. le système continu à fonctionner mais en mode dégradé). Les auteurs proposent deux stratégies opportunistes (τ, T) avec maintenances préventives parfaites et imparfaites à l'âge T .

Les différentes stratégies citées plus haut permettent de planifier les différentes actions de maintenance. Ces stratégies seront d'une grande importance pour la société STU

pour pouvoir planifier les réparations des pneus dégradés ou défectueux ainsi qu'optimiser les remplacements de ces pneus à moindre coût.

Selon les données de dégradation et de défaillance des pneus ainsi que les contraintes de planification appliquées par la STU, nous allons pouvoir choisir les modèles de vieillissement ainsi que les stratégies de maintenance adéquates.

CHAPITRE 2 : ÉTUDES STATISTIQUES DES DONNÉES

Le but de ce chapitre est de déterminer les modèles de défaillance et les modèles de dégradation par usure des pneus. Les données de la STU seront exploitées. Ces données concernent les pneus d'autobus de type Michelin installés sur des autobus dit à plancher bas. Nous décrivons d'abord les données que nous avons utilisées ainsi que les différents tests statistiques que nous avons effectués. Ensuite, nous présentons les différents modèles que nous avons obtenus, c'est-à-dire, les modèles de dégradation par usure et les modèles de défaillance complète.

2.1 Description des données

Les données utilisées dans cette étude sont extraites d'une base des données de gestion des pneus de la STU. Les données collectées sont regroupées en deux catégories : des données sur les raisons de défaillance et des données de mesures de la perte de matière de la bande de roulement (usure de la semelle).

Le tableau 2.1 présente un extrait des données de défaillance. Les données collectées concernent le numéro du pneu, les dates d'installation et d'enlèvement du pneu, les kilométrages avant installation et à l'enlèvement, le kilométrage parcouru, la position du pneu au moment de son enlèvement, la raison d'enlèvement, le type de semelle, le nombre de reconditionnement et le numéro de l'autobus sur lequel le pneu était installé.

Tableau 2.1 Exemple des données historiques des pneus à plancher bas

	<u>Km Installation</u>	<u>Date Installation</u>	<u>Km Véh à l'Enlèvement</u>	<u>Date Enlèvement</u>	<u>km parcourue</u>	<u>Position</u>	<u>Raison Enlèvement</u>	<u>Sorte Semelle</u>	<u>Nb Recond</u>	<u>No Véh</u>
9238	576262	20/02/2006	634549	16/01/2007	58287	5	U	O	0	9704
	442400	06/07/2007	490603	15/02/2008	48203	3	CS	UD	1	110
	601668	27/06/2008	640618	02/02/2009	38950	5	U	UD	2	4
9239	162778	26/02/2006	205118	08/09/2006	42340	6	FU	O	0	411
9240	429738	04/03/2006	462691	07/08/2006	32953	6	FU	O	0	9
9241	58287	01/03/2006	117412	24/10/2006	59125	4	U	O	0	504
	308352	18/01/2007	344669	03/08/2007	36317	6	UB	AD	1	303
	551260	17/10/2007	602743	05/06/2008	51483	3	SP	UD	2	8
	574400	06/06/2008	574931	09/06/2008	531	5	CR	UD	2	1

Nous mentionnons que dans ce tableau les pneus ayant la raison d'enlèvement 'SP' sont encore bons et vont être mis en inventaire pour être utilisés ultérieurement. Les données correspondantes à ce mode de défaillance sont tronquées, nous avons tenu compte de cette information pour le calcul des kilométrages parcourus. Lorsque la raison d'enlèvement est « SP », nous avons à chaque fois cumulé le kilométrage parcouru jusqu'à l'atteinte d'un des modes de défaillance complète.

Le tableau 2.2 présente un exemple où les données ont été nettoyées.

Tableau 2.2 Exemples de données de défaillance traitées

km	position	Raison d'enl.	semelle	Nb recond.	AD	O	UD
36317	6	UB	AD	1	36317	58287	48203
37318	5	DF	AD	3	37318	42340	38950
27306	6	FU	O	0	27306	32953	52014
33877	5	SP	AD	3	33877	59125	31029
29704	4	U	UD	1	29704	71785	53182
29506	6	FU	UD	3	29506	59228	18902
41761	3	UB	O	0	41761	71785	32306

Par ailleurs, nous avons exploité d'autres données sur l'usure de la semelle. Ces données sont présentées dans le tableau 2.3 et seront utilisées pour évaluer la dégradation par usure des pneus. Ces données concernent le numéro du pneu, le numéro du véhicule sur lequel le pneu est installé au moment de la mesure, la position du pneu, la date de la prise de mesure, la valeur de l'usure et le kilométrage du véhicule. Le tableau 2.4 donne une idée des données utilisées pour déterminer les modèles de dégradation par usure.

Tableau 2.3 Exemple de données historiques des mesures des pneus à plancher bas

	<u>No Véh</u>	<u>Position</u>	<u>Date Mesure</u>	<u>Mesure d'usure</u>	<u>KM Mesure</u>
9238	0		2006-01-24 00:00:00	23	0
	9704	5	2006-11-07 00:00:00	8	51533
	110	3	2007-07-06 00:00:00	27	58287
	110	3	2007-08-01 00:00:00	22	62398
	110	3	2007-09-10 00:00:00	15	72716
	110	3	2007-09-16 00:00:00	15	73876

Tableau 2.4 Exemple de données de dégradation par usure traitées

Km_O_0	U_O_0	Km_UD_1	U_UD_1	Km_UD_2	U_UD_2	Km_UD_3	U_UD_3	Km_AD_1	U_AD_1	Km_AD_2	U_AD_2	Km_AD_3	U_AD_3
0	24	0	27	0	25	0	26	0	21	0	24	0	26
5280	21	5720	22	10780	18	5280	18	4180	19	2420	23	9240	16
10780	19	14520	15	16940	13	15620	12	19140	15	12980	15	19800	10
24640	14	15840	15	23100	11	18040	12	0	24	20900	13	20240	11
29040	13	16060	16	27500	11	19360	8	6160	19	23980	13	25740	9
33660	11	19140	16	30580	10	24200	11	15620	14	29260	7	0	24
40260	7	28380	10	37400	8	25740	11	16060	14	0	24	0	24

Pour faciliter l'étude des données, nous allons les énumérer et les décrire dans ce qui suit.

- Kilométrage parcouru (Y1) : cette variable est continue, elle décrit le nombre de kilomètres parcourus par la semelle;
- Usure du pneu (Y2) : c'est une variable continue, elle mesure la perte de matière de la semelle. L'unité de mesure est exprimée en 32^e de pouce. C'est-à-dire, lorsque l'usure est notée 22, cela correspond réellement 22/32 pouces;
- Position du pneu (X1) : cette variable dénote la position du pneu sur l'essieu arrière de l'autobus. Cette variable peut prendre les valeurs suivantes : 3 : extérieur gauche, 4 : intérieur gauche, 5 : intérieur droite et 6 : extérieur droite. Les positions 1 et 2 sont réservées pour les deux pneus avant droite et avant gauche de l'autobus. Ces deux positions sont exclues de l'étude car les pneus avant de l'autobus doivent toujours être remplacés par des pneus neufs (semelle originale); Cette variable est explicative et qualitative.
- Raison d'enlèvement (X2) : cette variable qualitative englobe plusieurs modes de défaillance qui nécessitent le remplacement du pneu. Les modes de défaillance considérés dans cette étude sont : usure (U), usure par bosse (UB), flanc usé (FU), crevaison (CR) et déchirure de flanc (DF);

- Type de semelle (X3) : c'est une variable explicative montrant le type de semelle utilisé pour chaque pneu. Selon les données, il existe 3 types de semelle : O pour désigner une semelle "Originale", UD pour une semelle "Bandag Ultra Drive deep" et AD pour une semelle de type "Oliver Artic drive";
- Nombre de reconditionnement (X4) : c'est une variable explicative quantitative caractérisant le nombre de fois où un pneu a été reconditionné. Selon les données collectées, un pneu peut être reconditionné jusqu'à trois fois.

2.2 Exploration des données

Nous nous sommes concentrés dans un premier temps sur les données de défaillance (tableau 2.1). Nous avons commencé à effectuer des tests préliminaires afin d'explorer les données. Ces tests sont nécessaires pour ressortir l'importance et la dépendance des variables de modélisation. Statistica a été utilisé pour effectuer ces tests.

Analyse Pareto des variables

Le diagramme de Pareto ou méthode 80/20 est un outil d'aide à la décision permettant de déterminer les facteurs cruciaux (environ 20%) qui influencent la plus grande partie (80%) de l'objectif. Nous avons tracé ainsi le graphique de Pareto pour les différentes variables explicatives afin de comprendre, au premier coup d'œil, les problèmes et leur gravité respective. Ceci permet également de mettre en ordre d'importance les effets de ces variables.

La figure 2.1 illustre le Pareto des 4 variables explicatives X1, X2, X3 et X4. Pour le facteur "position", les 4 positions sont distribuées d'une façon équiprobable. Pour le facteur "raison d'enlèvement" nous remarquons bel et bien que U (usure normale), UB (Usure par bosse) et FU (Flanc usé) sont les modes de défaillances les plus importants.

Pour le facteur "type semelle", les deux sortes de semelle les plus utilisées sont O (Semelle Originale) et UD (Bandag Ultra Drive deep). Enfin, pour le "nombre de reconditionnement", nous constatons que la majorité des pneus sont rechapés au plus deux fois.

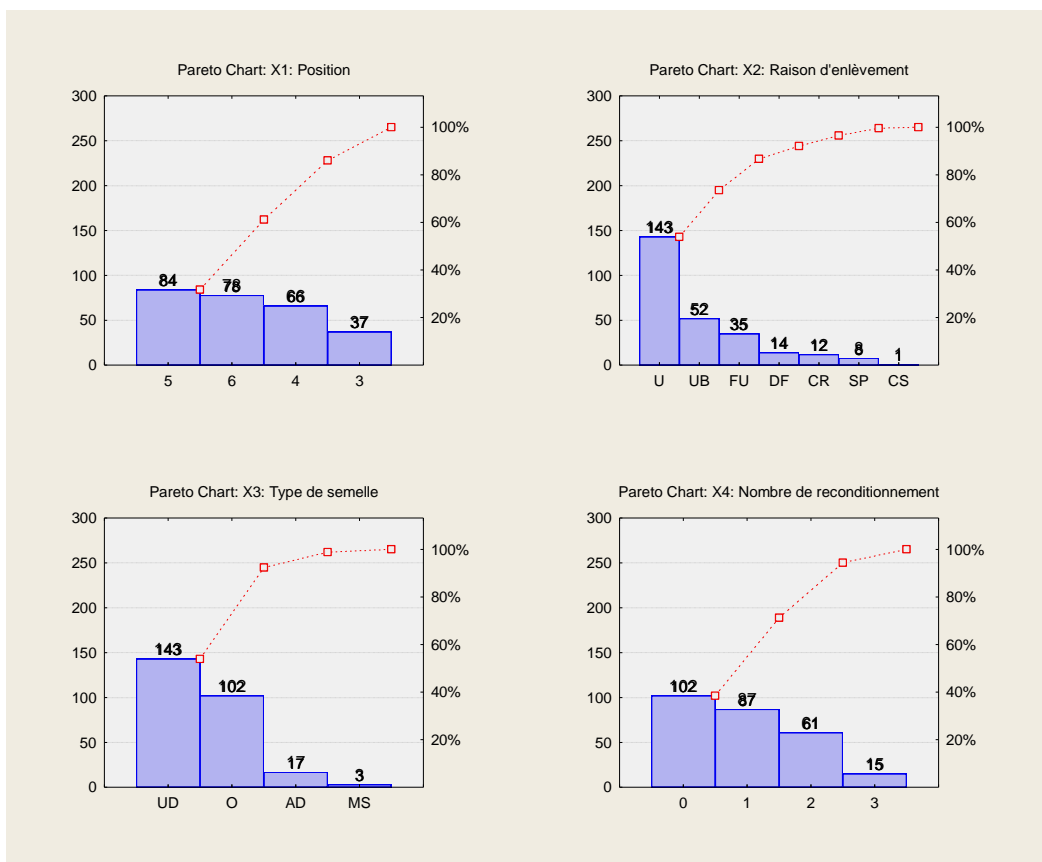


Figure 2.1 Pareto des variables X1, X2, X3 et X4

Les tableaux qui suivent présentent les tables de fréquences des variables "*raison d'enlèvement*" et "*type de semelle*" du pneu. Cela permet de donner un aperçu des catégories de ces variables, de trouver les catégories intéressantes à étudier ainsi qu'éliminer les variables inutiles (variables ayant trop peu de catégories). Les tableaux ci-dessous présentent les résultats des traitements appliqués.

Tableau 2.5 Table de fréquence du facteur raison d'enlèvement

Category	Frequency table: raison d'enl (plancherbas in Workbook1)			
	Count	Cumulative Count	Percent	Cumulative Percent
U	143	143	53,96226	53,9623
CS	1	144	0,37736	54,3396
FU	35	179	13,20755	67,5472
UB	52	231	19,62264	87,1698
CR	12	243	4,52830	91,6981
DF	14	257	5,28302	96,9811
SP	8	265	3,01887	100,0000
Missing	0	265	0,00000	100,0000

Tableau 2.6 Table de fréquence du facteur type de semelle

Category	Frequency table: semelle (plancherbas in Workbook1)			
	Count	Cumulative Count	Percent	Cumulative Percent
O	102	102	38,49057	38,4906
UD	143	245	53,96226	92,4528
AD	17	262	6,41509	98,8679
MS	3	265	1,13208	100,0000
Missing	0	265	0,00000	100,0000

À partir de ces tables de fréquences, nous constatons un déséquilibre entre le nombre d'observations des catégories des deux facteurs raison d'enlèvement et type de semelle.

La catégorie ou le type de semelle MS ainsi que le mode de défaillance CS seront inutiles dans notre analyse puisque nous avons trop peu de données dans ces catégories.

Le tableau 2.5 présente un sommaire de la table de fréquence multiple du facteur raison d'enlèvement groupé suivant le type de semelle. Au début nous avons voulu chercher un modèle de risque pour chaque mode de défaillance. Comme nous avons peu de données dans chacune de ces catégories et ce suivant la semelle du pneu, nous allons chercher un modèle général pour tous les modes de défaillances classé par type de semelle.

Tableau 2.7 Table de fréquence de raison d'enlèvement VS type semelle

Summary Table for all Multiple Response Items (plancherbas in Workbook1) Totals/percentages based on number of respondents Multiple identical responses were ignored					
N=265 raison d'enl	semelle AD	semelle MS	semelle O	semelle UD	Row Totals
DF	3	1	1	9	14
UB	5	0	21	26	52
U	1	1	63	78	143
CR	1	1	6	4	12
CS	0	0	0	1	1
FU	5	0	11	19	35
SP	2	0	0	6	8
All Grps	17	3	102	143	265

En ce qui concerne les données sur la mesure de dégradation, nous trouvons dans ces données la date d'installation et d'enlèvement du pneu, son usure et son type de semelle. Nous désirons caractériser les pneus cette fois-ci par la mesure de leur usure, et ce en fonction de leur âge. Étant donné qu'un autobus peut rouler en moyenne 220 km par jour et que le type de semelle et le rechapage peuvent affecter l'âge du pneu, nous avons classé nos données par type de semelle et par nombre de reconditionnement. Nous cherchons par la suite à modéliser l'usure en fonction du kilométrage parcouru. Les modèles trouvés sont des modèles de dégradation par usure par type de semelle et par reconditionnement. Nous tenons à mentionner que l'usage d'un kilométrage moyen pour déterminer l'usure est une approximation qui pourrait rendre certains modèles statistiques non représentatifs. En effet, nous étions obligés de procéder ainsi car le système de collecte de l'usure des pneus fonctionne avec des dates de mesures qui sont erronées selon les responsables chez la STU. Le logiciel ne donne pas la date exacte de prise de mesure.

Nous présentons dans les sections suivantes les deux modèles cités plus haut, le modèle de défaillance et le modèle de dégradation par usure.

2.3 Modèles de défaillance

Avant de commencer à chercher les distributions des données, nous rappelons les définitions de la fonction risque de défaillance et de la fonction fiabilité. Dit simplement risque de défaillance, c'est la probabilité qu'un pneu tombe en panne au cours du temps. Tandis que la fiabilité c'est la

probabilité du fonctionnement des pneus sans tomber en panne pendant un certain temps donné et dans des conditions d'utilisations définies.

Afin de mieux caractériser les pneus, nous allons chercher la probabilité de défaillance d'un pneu par rapport au kilométrage parcouru. L'idée ici est d'établir un modèle stochastique permettant de calculer la fiabilité ainsi que le risque de défaillance des pneus pour les modes retenus.

À partir des données de défaillances des pneus, nous les avons regroupés pour toutes les catégories du facteur "Raison d'enlèvement" et ce, selon le facteur "Type de semelle" tout en éliminant les observations inutiles.

Nous aurons ainsi 3 modèles de défaillances des pneus soit un pour le type semelle originale, un pour le type semelle UD et un dernier pour le type semelle AD.

Par la suite nous cherchons la distribution de défaillance qui représente le mieux chaque cas. Les résultats trouvés sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

L'analyse des données est faite avec le module 'Distribution Fitting' du logiciel Statistica.

Tableau 2.8 Distribution de défaillance suivant le type semelle O

Parameter estimates for all distributions (plancherbas)						
Variable: O N = 102						
(p-levels assume a-priori knowledge of parameters)						
The distributions are ordered (from the top) in terms of how well they fit the data.						
All distributions with the p-value for the Kolmogorov-Smirnov test statistics that are either						
(in order of best to worst) n.s, p<0.20 or p<0.10 are suitable models for the data.						
Distribution	User-def Param 1	User-def Param 2	Param 1	Param 2	K-S d	K-S p-level
Weibull (threshold, scale, shape)	0,00		59341,75	5,61	0,097707	n.s.
Non-Normal (skewness, kurtosis)			-0,62	0,42	0,098336	n.s.
Normal (location, scale)			54814,16	11763,48	0,123166	p<,10
Gamma (threshold, scale, shape)	0,00		2988,65	18,34	0,149947	p<,05
Extreme Value (location, scale)			48645,75	13097,27	0,158328	p<,05
Log-Normal (threshold, scale, shape)	0,00		10,88	0,25	0,159902	p<,05
Rayleigh (threshold, scale)	0,00		39633,41		0,307286	p<,01
Exponential (threshold, scale)	0,00		54814,16		0,409467	p<,01

Tableau 2.9 Distribution de défaillance suivant le type semelle UD

Parameter estimates for all distributions (plancherbas) Variable:UD N = 143 (p-levels assume a-priori knowledge of parameters) The distributions are ordered (from the top) in terms of how well they fit the data. All distributions with the p-value for the Kolmogorov-Smirnov test statistics that are either (in order of best to worst) n.s, p<0.20 or p<0.10 are suitable models for the data.						
Distribution	User-def Param 1	User-def Param 2	Param 1	Param 2	K-S d	K-S p-level
Non-Normal (skewness, kurtosis)			0,26	2,20	0,075267	n.s.
Normal (location, scale)			41787,62	12539,60	0,076913	n.s.
Gamma (threshold, scale, shape)	0,00		4530,83	9,22	0,088492	n.s.
Weibull (threshold, scale, shape)	0,00		46174,18	3,51	0,088909	n.s.
Log-Normal (threshold, scale, shape)	0,00		10,59	0,36	0,105565	p<,10
Extreme Value (location, scale)			35585,43	12768,80	0,119825	p<,05
Rayleigh (threshold, scale)	0,00		30841,10		0,246030	p<,01
Exponential (threshold, scale)	0,00		41787,62		0,390626	p<,01

Tableau 2.10 Distribution de défaillance suivant le type semelle AD

Parameter estimates for all distributions (plancherbas) Variable:AD N = 17 (p-levels assume a-priori knowledge of parameters) The distributions are ordered (from the top) in terms of how well they fit the data. All distributions with the p-value for the Kolmogorov-Smirnov test statistics that are either (in order of best to worst) n.s, p<0.20 or p<0.10 are suitable models for the data.						
Distribution	User-def Param 1	User-def Param 2	Param 1	Param 2	K-S d	K-S p-level
Non-Normal (skewness, kurtosis)			-0,92	0,822	0,086530	n.s.
Normal (location, scale)			32496,88	7920,445	0,132124	n.s.
Gamma (threshold, scale, shape)	0,00		2314,44	14,041	0,163070	n.s.
Extreme Value (location, scale)			28377,54	8750,633	0,179899	n.s.
Log-Normal (threshold, scale, shape)	0,00		10,35	0,298	0,184168	n.s.
Rayleigh (threshold, scale)	0,00		23612,40		0,311135	p<,10
Weibull (threshold, scale, shape)	0,00		38076,39	14,054	0,407938	p<,01
Exponential (threshold, scale)	0,00		32496,88		0,438382	p<,01

Interprétations des résultats et choix des modèles :

Les trois tableaux précédents présentent toutes les distributions que nous avons pu évaluer, et ce pour tous les modes de défaillances pour les trois types de semelles O, UD et AD. Nous remarquons que ces distributions sont classées dans l'ordre de la distribution la plus adéquate à la moins valide, et ce selon le test statistique de kolmogorov-simironov (test d'hypothèse utilisé pour déterminer si un échantillon suit bien une loi donnée connue par sa fonction de répartition continue).

Nous remarquons que toutes les distributions avec les p-value indiquées dans les tableaux ci-haut sont adaptées aux données. La distribution de Weibull est souvent utilisée dans le domaine de

fiabilité et de l'analyse des durées de vie grâce à sa flexibilité. Nous choisissons le modèle de Weibull pour caractériser la durée de vie des pneus pour les différentes semelles étudiées.

Calculons maintenant le risque de défaillance associé pour chaque type de semelle en fonction du kilométrage parcouru X :

- Pour le type de semelle O, le risque ou la probabilité de défaillance est traduit par

$$F_O(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{59341,75} \right)^{5,61} \right]; \quad (1)$$

- Pour le type de semelle UD, le risque de défaillance sera donné par

$$F_{UD}(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{46174,18} \right)^{3,51} \right]; \quad (2)$$

- Pour le type de semelle AD, le risque de défaillance est donné par

$$F_{AD}(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{38076,39} \right)^{14,054} \right]; \quad (3)$$

Ces équations seront utilisées ultérieurement dans le programme de planification pour calculer le risque de défaillance des pneus en fonction du kilométrage parcouru.

2.4 Modèles de dégradation

Nous utilisons maintenant le second tableau des données (Tableau 2.3) présenté précédemment. Dans ce qui suit, nous désirons caractériser un pneu par la mesure de son usure. Le modèle ainsi obtenu va nous donner une mesure de l'usure en fonction du kilométrage parcouru.

Après avoir organisé les données liées à l'usure des pneus, nous avons classé ces données par "Type de semelle" et par "Nombre de reconditionnement". Nous cherchons ainsi des modèles statistiques de dégradation décrivant l'évolution de l'usure en fonction de l'âge du pneu. Ainsi, nous allons établir 7 modèles d'usure, soit un par type de semelle et par nombre de reconditionnement des pneus et un pour les semelles originales.

À partir des observations (y =usure, x =kilométrage) nous avons représenté dans des graphiques l'ensemble de ces points représentant l'évolution de l'usure en fonction du kilométrage. Comme

premier modèle et pour simplifier l'étude, nous allons proposer un modèle linéaire, c'est-à-dire chercher la droite de régression passant au plus près des points du graphe.

Les figures ci-dessous résument les différents diagrammes de dispersion pour chacun des cas. Un premier graphique pour la semelle originale, un deuxième graphique pour la semelle UD (les données sont classées par nombre de rechapage) et un troisième pour la semelle AD (les données sont aussi classées par nombre de reconditionnement). Nous avons choisi d'utiliser la régression linéaire comme première façon de construire les modèles d'usure. Il faut noter que certains des modèles obtenus ne sont pas assez représentatifs. Par exemple le R^2 n'est que de 0,62 dans le cas du modèle de régression pour une semelle originale. Alors que pour le modèle de régression pour une semelle AD avec 1 reconditionnement, le R^2 est de 0,96, ce qui est assez bien représentatif. Ces résultats sont affectés en grande partie par la moyenne des kilométrages utilisée pour la mesure de l'usure. Bien entendu, nous avons essayé d'autres modèles mais à la fin nous avons opté pour les modèles de régression linéaire tout en sachant les inconvénients qui peuvent en découler. Une étude plus poussée devrait être faite pour trouver des modèles de régression plus représentatifs pour chaque type de semelle en fonction du nombre du reconditionnement également. Ce travail sera d'un grand intérêt pour la STU.

- Semelle originale "O"

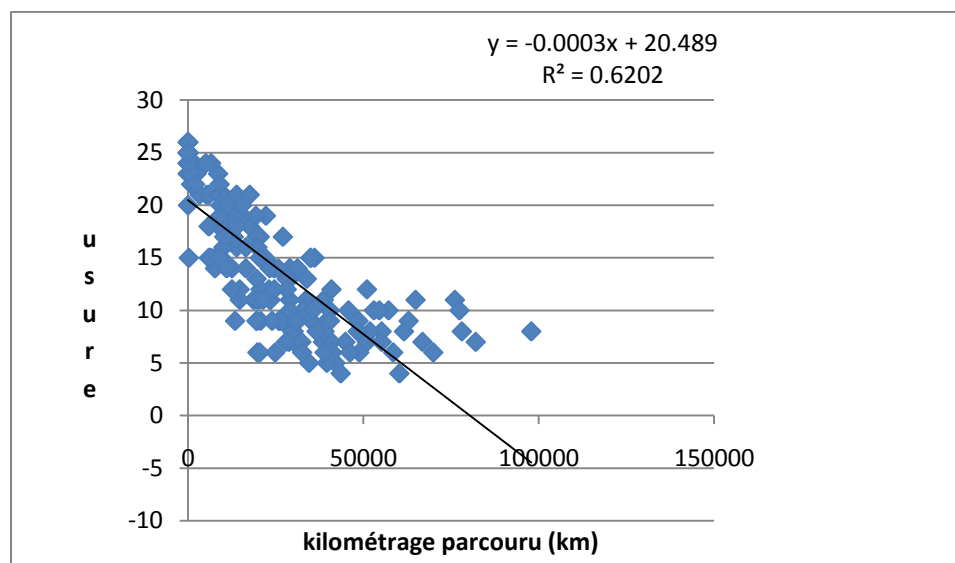


Figure 2.2 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle originale)

- Semelle "UD" et nombre de reconditionnement = 1;

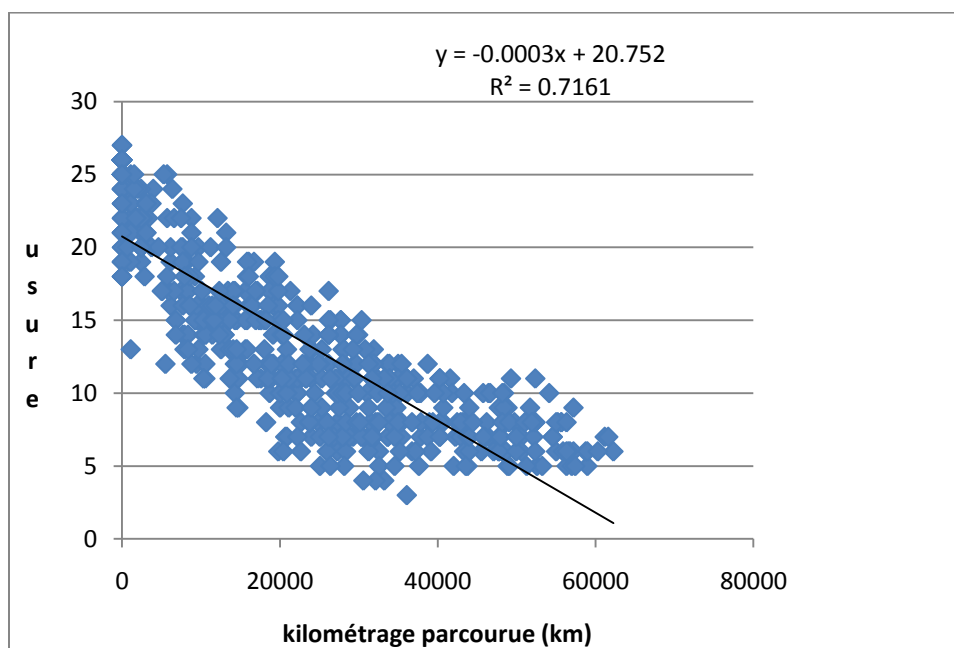


Figure 2.3 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle UD)

- Semelle "UD" et nombre de reconditionnement = 2;

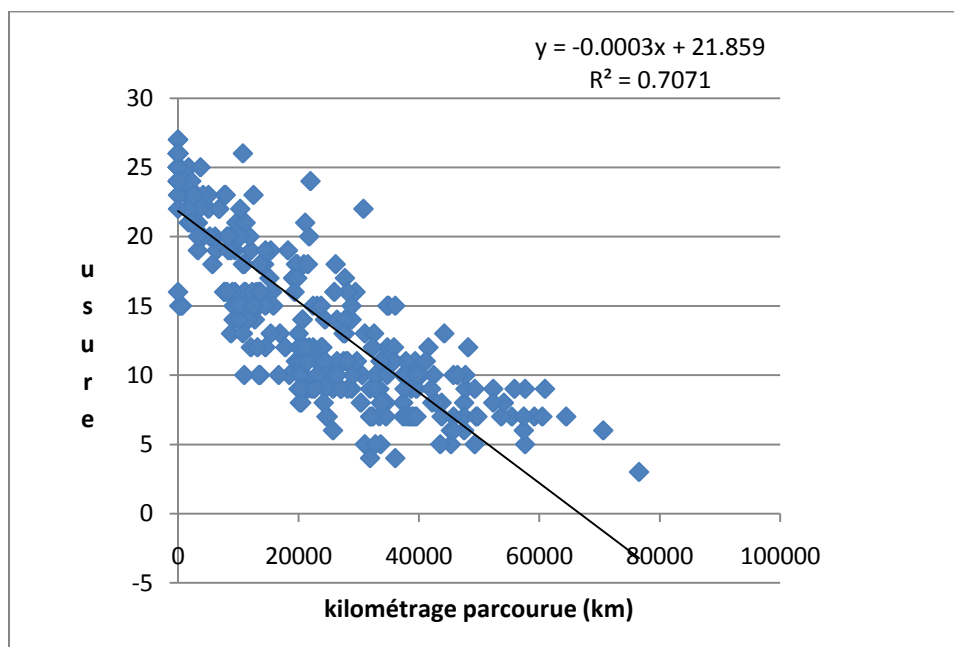


Figure 2.4 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle UD)

- Semelle "UD" et nombre de reconditionnement = 3;

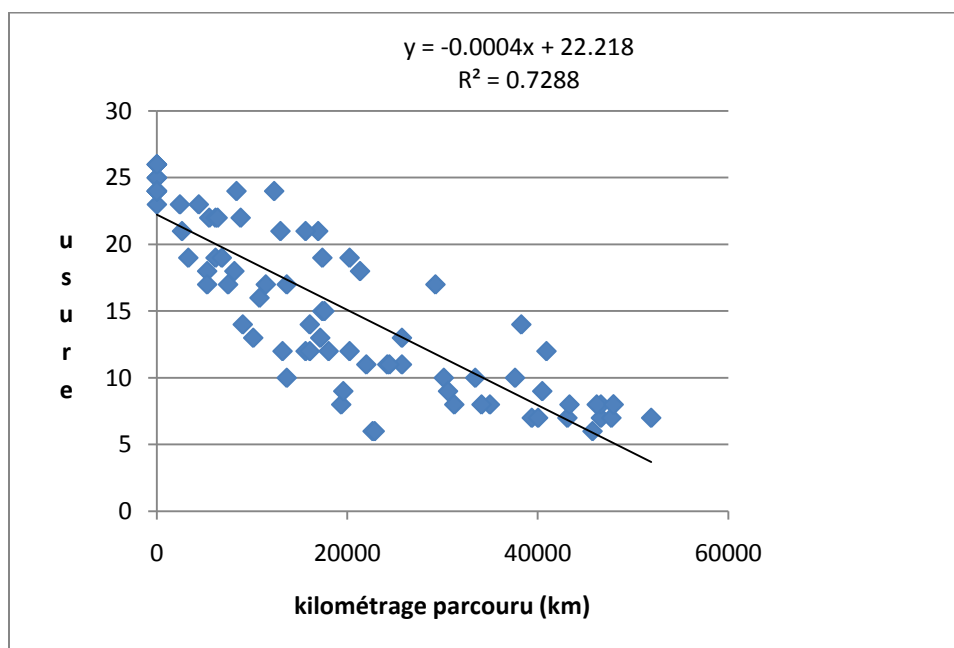


Figure 2.5 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle UD)

- Semelle "AD" et nombre de reconditionnement = 1;

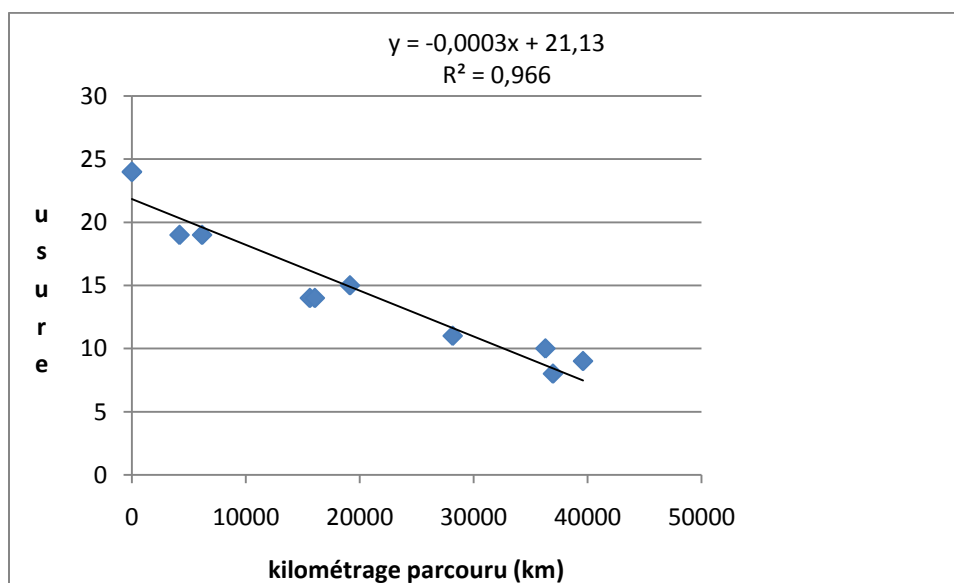


Figure 2.6 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle AD)

- Semelle "AD" et nombre de reconditionnement = 2;

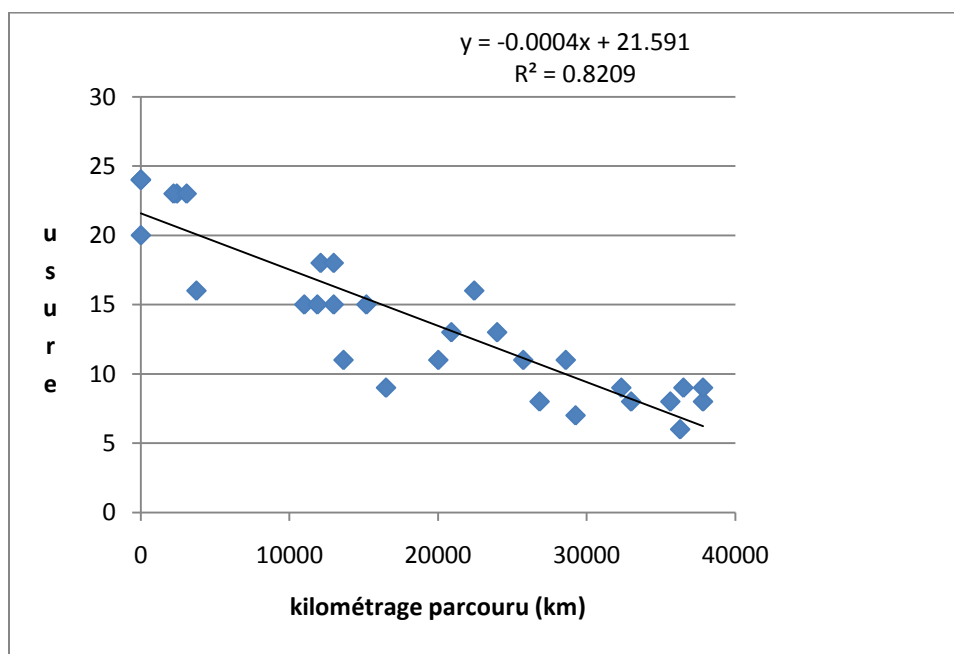


Figure 2.7 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle AD)

- Semelle "AD" et nombre de reconditionnement = 3;

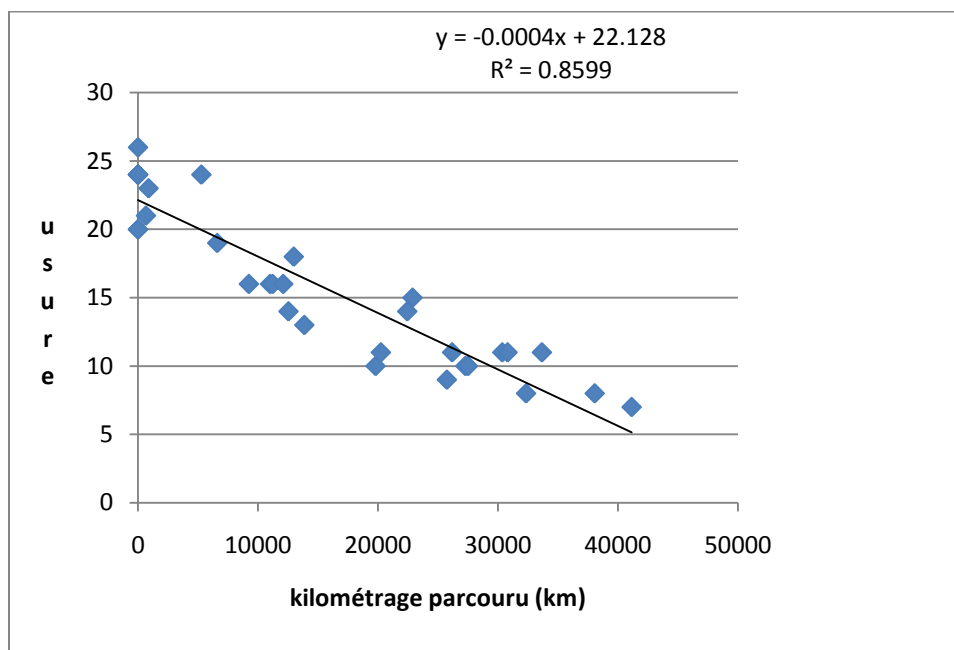


Figure 2.8 Usure par rapport au kilométrage parcouru (semelle AD)

Ainsi les 7 modèles d'usure trouvés après cette étude statistique sont les suivants :

- Pour la semelle originale "O"
$$U_O^0 = 20.489 - 0.0003 * X. \quad (4)$$

- Pour la semelle "UD"
$$\begin{cases} U_{UD}^1 = 20.75 - 0.0003 * X \\ U_{UD}^2 = 21.85 - 0.0003 * X \\ U_{UD}^3 = 22.21 - 0.0004 * X \end{cases} \quad (5)$$

- Pour la semelle "AD"
$$\begin{cases} U_{AD}^1 = 21.13 - 0.0003 * X \\ U_{AD}^2 = 21.59 - 0.0004 * X \\ U_{AD}^3 = 22.12 - 0.0004 * X \end{cases} \quad (6)$$

Où U mesure l'usure en 32^e de pouce de chacune des trois semelles O, UD et AD et X le kilométrage correspondant à l'usure.

À la fin de cette étude statistique, nous avons pu caractériser la durée de vie des pneus. Nous avons établi les modèles de défaillance, tous modes confondus, classés par "Type de semelle". Nous avons également établi les modèles de dégradation par usure par "Type de semelle" par "Nombre de reconditionnement". Les modèles probabilistes servent à déterminer le risque de défaillance et la fiabilité des pneus pour les différentes sortes de semelles. Les modèles de dégradation mesurant l'évolution de l'usure des pneus pour les trois types de semelle en fonction du kilométrage parcouru.

Ces deux familles de modèles seront d'une grande utilité dans le chapitre suivant qui traitera la partie planification de la maintenance des pneus.

CHAPITRE 3 : MODÈLE DE PLANIFICATION

Le chapitre précédent nous a permis de caractériser le vieillissement des pneus à l'aide des 2 familles de modèles stochastiques: la première famille utilise les modèles de fiabilité des modes de défaillance complète par type de semelle pour construire un modèle de risque global pour l'ensemble du pneu. La seconde famille de modèles caractérise la dégradation par usure par reconditionnement, et ce pour chaque type de semelle. Ces modèles permettront de prédire le risque de défaillance d'un pneu et la perte de matière par usure en fonction du kilométrage parcouru également. Le risque de défaillance et la dégradation par usure seront intégrés dans le modèle de planification et influenceront la décision.

Ce chapitre est consacré au développement et à l'exploitation du modèle de planification. La section 3.1 décrit le processus général du programme de planification. La section 3.2 illustre les différents coûts qui seront encourus par le remplacement de un ou de plusieurs pneus. La stratégie de résolution ainsi qu'un exemple sont donnés à la section 3.3.

3.1 Processus de planification

Rappelons tout d'abord le processus actuel appliqué à la société STU. À chaque changement d'huile moteur, tous les pneus de l'autobus sont inspectés. La périodicité des changements d'huile est de 10000 km. L'inspection porte sur l'état général du pneu, c'est-à-dire la recherche des symptômes de dégradation et la mesure de l'usure de la semelle. Si l'état général d'un ou de plusieurs pneus de l'autobus est jugé critique ou que l'usure a atteint la limite de 5/32 pouce, alors le préposé aux pneus planifie l'autobus dans sa cédule d'autobus à rappeler durant les prochains jours.

Lorsque l'autobus est rappelé, dépendamment du nombre de pneus à remplacer et des pneus disponibles en stock, le préposé choisit dans son stock les meilleurs pneus pour effectuer les remplacements. Pour ce faire, il applique une règle simple qui consiste à ne choisir un pneu que si la différence d'épaisseur de la semelle est inférieure à 4/32 pouce pour tous les pneus composant le quatuor.

Maintenant, si nous traduisons ce processus en utilisant le langage des stratégies de maintenance présentées dans le chapitre 1, alors le préposé aux pneus applique trois stratégies : une pour

l'inspection, une pour le remplacement avec un seuil limite d'usure et une troisième opportuniste pour obtenir les meilleures combinaisons de pneus pour respecter la différence d'usure entre les pneus installés sur un même essieu.

Comme il s'agit ici d'une première modélisation du problème de planification des remplacements des pneus, nous avons choisi d'appliquer les stratégies actuelles de remplacement des pneus. C'est-à-dire, nous ne chercherons pas à optimiser chacune des stratégies appliquées, par exemple optimiser la périodicité des inspections ou proposer d'autres stratégies d'inspection. Il sera de même pour la stratégie de remplacement avec seuil limite et la stratégie opportuniste.

Ainsi, le processus de planification s'effectuera comme suit :

Étape 1 : Lire les informations sur les pneus installés sur un autobus (Tableau 3.1). Nous considérons ici uniquement les 4 pneus installés sur l'essieu arrière de l'autobus. Les informations se trouvant dans le tableau décrivant le fichier autobus sont : le numéro de chaque pneu, le type de semelle (O, UD ou AD), la position du pneu sur l'autobus (3, 4, 5 ou 6), le nombre de reconditionnement appliqué au pneu (0, 1, 2 ou 3) et son usure mesurée en 32° de pouce (1 pouce = 25,4 mm).

Tableau 3.1 Exemple de fichier autobus

<i>No Pneu</i>	<i>Semelle</i>	<i>Position</i>	<i>Nombre de reconditionnement</i>	<i>Usure (32° po)</i>
9887	UD	3	3	5
9723	UD	4	2	19
9764	UD	5	1	22
9902	UD	6	2	21

Étape 2 : Évaluer le risque associé à chaque pneu en utilisant le modèle de défaillance complète (équations 1, 2 et 3 chapitre 2) et calculer l'usure de la semelle en utilisant un des modèles de dégradation (équations 3, 4 et 5, chapitre 2) pour une mission de 10000 km. Ainsi chaque pneu, dépendamment de son type de semelle et du nombre de reconditionnement, est caractérisé par deux fonctions : une pour le risque de défaillance complète et une pour la prédiction de son usure

en fonction du nombre de kilomètres parcourus. Ces calculs sont effectués sur tous les pneus, qu'ils soient installés sur les autobus ou en stock. Le tableau 3.2 présente les informations contenues dans le fichier d'inventaire des pneus.

Tableau 3.2 Fichier d'inventaire des pneus

N° pneu	semelle	nombre de reconditionnement	km (X)	U(X) (32 ^e po)	F(X) (%)	F(X+10000) (%)	U(X+10000) (32 ^e po)
240	O	0	11356	17	0	6	13
67	UD	2	19412	15	4	22	12
112	O	0	14992	15	1	11	12
21	UD	3	19635	14	5	22	10
24	O	0	21257	14	6	29	11
31	O	0	20219	14	5	24	11

Ce fichier donne les informations nécessaires sur les pneus en inventaire. Un pneu est caractérisé par un numéro, le type de semelle, le nombre de reconditionnement effectué, le nombre de kilomètres parcourus (X), le risque de défaillance (F(X)) et son usure actuelle (U(X)), le risque de défaillance et l'usure après 10000 km. Ces deux dernières évaluations sont obtenues par l'application des modèles de défaillance complète et de dégradation par usure développés au chapitre 2.

Étape 3 : Évaluer les différentes possibilités de couplage des pneus au moment du remplacement d'un ou de plusieurs pneus. Les différentes possibilités ou scénarios de remplacements de pneus sur l'essieu arrière d'un autobus sont au nombre de 15, ce qui correspond à $2^N - 1$ possibilités (N = 4 pneus). Les différents scénarios étudiés pour un seul autobus sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Tableau résumant les différents scénarios

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	V	F	F	F	V	V	V	F	F	F	V	V	V	F	V
4	F	V	F	F	V	F	F	V	V	F	V	V	F	V	V
5	F	F	V	V	F	V	F	V	F	V	V	F	V	V	V
6	F	F	F	F	F	F	V	F	V	V	F	V	V	V	V

Nous désignons par V (Vrai) et F (Faux) le rejet ou non d'un pneu. Nous entendons par rejet le fait que le pneu ne fera pas partie du prochain quatuor qui sera installé sur l'autobus ou encore de la solution proposée pour le prochain remplacement. Ce pneu n'ira pas forcément au rechapage ou à la récupération s'il est retiré de l'autobus. Il pourra être mis en stock pour d'autres remplacements.

Le tableau 3.3 présente tous les différents cas où un pneu doit être rejeté, et ce suivant sa position. Nous remarquons que nous avons 4 possibilités pour un seul rejet, 6 possibilités pour 2 rejets, 4 possibilités pour 3 rejets et une seule possibilité si nous remplaçons les 4 pneus ensemble.

Étape 4 : Choisir le meilleur scénario de remplacement. Pour ce faire, le coût de chaque scénario est évalué. Le détail du calcul des coûts sera présenté dans la section 3.2. Le scénario retenu est celui qui favorisera un meilleur couplage des pneus tout en minimisant les coûts encourus de remplacement. Pour chaque scénario à l'étude, la compatibilité des pneus est testée. Nous devons nous assurer que la solution étudiée propose le même type de semelle pour les quatre pneus. Nous calculons ensuite les différences d'usure, deux par deux, entre les quatre pneus. Si les différences d'usure ne respectent pas le seuil de 4/32 de pouce, alors nous cherchons dans le fichier des pneus en inventaire le ou les pneus de remplacement qui seront compatibles avec les pneus non rejetés. Ce processus est itératif, il étudie scénario par scénario.

3.2 Coûts de remplacement des pneus

Le calcul du coût de remplacement des pneus intervient à l'étape 4 du processus de planification. Le fait que le préposé aux pneus inspecte et change des pneus, ceci va engendrer des coûts pour la STU. Parmi ces coûts, nous citons les coûts d'inspections et les coûts des remplacements des pneus (coûts de main d'œuvre). Comme dans le processus actuel, l'inspection se fait au moment du changement d'huile moteur, alors les coûts d'inspection seront négligés.

En ce qui concerne les coûts de remplacement et pour un scénario de remplacement j donné, nous cherchons à minimiser la fonction objectif Z permettant le calcul du coût total en fonction du kilométrage parcouru ci-dessous :

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{15} (C_{i,j}^{R0} + C_{i,j}^d * F_j^* + (1 - F_j^*) * C_{i,j}^{R1}) * y_{i,j}$$

Dans cette formule :

- $y_{i,j}$ est une variable binaire (vaut 1, si le pneu i appartient au scénario j , et 0 sinon);
- n est le nombre de pneus en stock;
- $C_{i,j}^{R0}$ représente le coût de remplacement actuel;
- $C_{i,j}^d * F_j^*$ représente les coûts indirects liés au risque de défaillance complète sur un horizon de 10000 km, $F_j^* = \max \{y_{i,j} F_i\} \forall i$ où F_i exprime le risque estimé à 10000 km pour les 4 pneus montés respectivement aux positions 3, 4, 5 et 6;
- $(1 - F_j^*) * C_{i,j}^{R1}$ représente le coût de remplacement après 10000 km.

Le coût de remplacement actuel $C_{i,j}^{R0}$ regroupe les coûts de changement et de remplacement de l'ensemble des pneus concernés par le scénario j étudié. Par exemple, si le scénario prévoit le remplacement d'un seul pneu alors le coût total sera composé des coûts de changement du pneu et son remplacement sur l'autobus. Selon les données fournies par la STU, la durée moyenne pour effectuer le changement d'un pneu et son remplacement sur l'autobus est d'une heure. Le tableau 3.4 résume les coûts de remplacements actuels pour les 15 scénarios et ce, en tenant compte de la position du pneu.

Tableau 3.4 Tableau résumant les coûts $C_{i,j}^{R0}$ par scénario en fonction de la position du pneu sur l'essieu

Scénario j	1 et 4	2, 3 et 7	5, 6, 9 et 10	8, 12 et 13	11 et 14	15
Coût $C_{i,j}^{R0}$ (\$)	100	150	200	250	300	350

Le coût indirect $C_{i,j}^d * F_j^*$ lié au non remplacement du ou des pneus prévus dans un scénario est également calculé et pris en compte dans le coût total d'un scénario. Ce coût prend en compte le risque de défaillance des pneus sélectionnés par le scénario sur un horizon de 10000 km. Comme l'autobus sera rappelé au garage si au moins un des 4 pneus est défaillant, alors nous avons choisi de pondérer le coût de défaillance $C_{i,j}^d$ par le risque maximum calculé à partir du risque de défaillance de chaque pneu. Dans notre cas, le coût de défaillance $C_{i,j}^d$ représente les frais de remorquage. Nous n'avons pas pris en compte le coût de mobilisation d'un autre autobus par exemple ou du dédommagement des voyageurs.

Pour le calcul du risque de défaillance de chaque pneu, noté F , pour une mission de 10000 km, nous avons utilisé les formules (1), (2) et (3) établies à la section 2.3 du chapitre 2. Notons que ce risque permettra d'estimer le pourcentage de chance que le pneu n'ait pas de défaillance sur les prochains 10000 km. Ainsi, nous aurons à calculer les risques de défaillance des 4 pneus selon leur position sur l'autobus. Le coût engendré par le choix d'une solution sera donné par le coût de défaillance $C_{i,j}^d$ multiplié par le risque maximal prévu dans 10000 km.

Toutefois, la meilleure solution d'aujourd'hui pourrait engendrer des coûts importants lors de la prochaine prise de décision dans 10000 km. Nous devons alors estimer combien coûtera le remplacement des pneus sélectionnés dans 10000 km. Pour cela nous calculerons l'usure de chaque pneu dans 10000 km. Nous utilisons les formules (3), (4) et (5) développées à la section 2.4 du chapitre 2. Rappelons que ces formules permettent de prendre en compte le nombre de reconditionnement d'un pneu. Nous notons $(1 - F_j^*) * C_{i,j}^{R1}$ le coût de remplacement prévu après 10000 km. Pour pouvoir le calculer, nous avons développé une routine qui permet de vérifier la compatibilité d'usure entre les pneus dans 10000 km et d'estimer le nombre de pneus qui seront

changés. Ainsi, le coût de remplacement de pneus dans 10000 km sera le produit du coût de changement C_{R1} par la probabilité que cette situation se réalise $(1 - F_j^*)$. Ce coût sera fonction entre autres du nombre de rejet futurs des pneus.

Le coût total C_T pour un scénario donné sera alors la somme des trois coûts soient le coût de remplacement actuel, le coût lié au risque de défaillance et le coût de remplacement dans 10000 km.

3.3 Stratégie de résolution et exemple

Le processus de planification présenté à la section 3.1 est implémenté à l'aide du langage Visual Basic for Application «VBA» du logiciel Microsoft Excel. Le programme obtenu est présenté en annexe. Pour remplacer un pneu prévu par un scénario de remplacement, le programme cherche toujours le premier pneu dans le stock qui permet de compléter le quatuor.

Pour sélectionner un pneu dans la liste des pneus en inventaire, nous pouvons appliquer différentes stratégies. Nous pouvons trier les pneus en stock en ordre décroissant d'usure. Nous classons, ainsi, les pneus du plus neuf au plus usé. Cette stratégie favorise l'utilisation des pneus neufs par rapport aux pneus usés. Comme le flux de pneus neufs est constant, cette stratégie présentera l'inconvénient de ne jamais utiliser les vieux pneus encore valables.

Par ailleurs, nous pouvons trier les pneus selon la règle FIFO «First In First Out». En pratique le pneu qui est arrivé le premier dans le stock sera le premier à être proposé dans la solution de remplacement, donc le premier à sortir du stock s'il satisfait les exigences de remplacement. Si l'avantage de cette règle d'ordonnement réside dans sa simplicité et sa rapidité, son inconvénient c'est qu'on ne peut pas affirmer qu'il y a vraiment de priorités au niveau des pneus choisis. De plus, le mode FIFO n'assure pas une bonne qualité de la solution proposée à long terme.

Par rapport à ces deux dernières stratégies de recherche et de sélection de pneus à partir du fichier des pneus en inventaire, nous avons pris la première stratégie pour effectuer les tests. Nous prendrons alors le premier pneu trouvé dans le stock qui soit compatible avec les autres pneus.

Pour évaluer les différents scénarios, le programme teste pour chaque scénario les différentes solutions possibles et affiche les résultats avec le ou les nouveaux pneus recherchés dans le stock ainsi que les coûts correspondants. Nous aurons ainsi 15 cas possibles pour chaque autobus. Lorsque le programme ne trouve pas de solution réalisable, il affichera « Aucune combinaison possible ». Une fois les 15 scénarios évalués, le programme affichera le coût de chaque scénario et sélectionnera le scénario ayant le moindre coût comme le scénario optimal.

L'exemple suivant explique le fonctionnement du programme. Le tableau 3.5 représente un Autobus qui est envoyé à l'inspection.

Tableau 3.5 Exemple de solution

N° pneu	semelle	nb recond	U(X) (32° po)	U(X+10000) (32° po)	F(X+10000) (%)
9887	UD	2	18	15	5
9723	UD	2	12	9	99
9764	UD	1	18	15	3
9902	UD	2	19	16	3

D'après les critères énumérés dans la section 3.1, le pneu portant le numéro 9723 n'est pas compatible avec les trois autres en raison de son usure. Le programme teste les différents scénarios possibles, il parcourt à chaque fois le stock et prend le premier pneu trouvé permettant de compléter le quatuor.

Nous notons que parmi les 15 solutions possibles, seulement 9 solutions qui sont admissibles. Les combinaisons 1, 3, 4, 6, 7 et 10 sont impossibles puisqu'elles impliquent de garder le pneu numéro 9723 avec au moins l'un des trois autres ce qui cause une violation de la règle d'usure entre les pneus du quatuor. Un résumé des différents résultats trouvés par le programme est donné par ce qui suit.

Tableau 3.6 Coût total pour les solutions admissibles

N°Solution	2	5	8	9	11	12	13	14	15
Coût C_{ij}^{R0} (\$)	150	200	250	200	300	250	250	300	350
Coût total (\$)	175	215	275	225	315	265	505	325	350

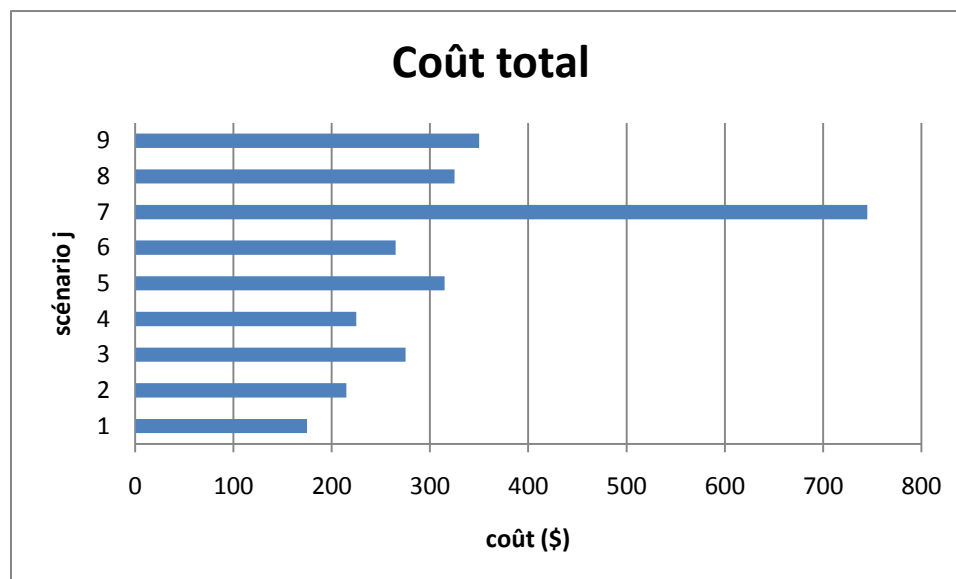


Figure 3.1 Coût total en fonction de solutions possibles

La meilleure solution dans 10000 km parmi les solutions possibles trouvées est la solution 2 qui consiste à remplacer uniquement le pneu 9723. Le coût de cette solution est 175 et est inférieur au coût des différentes autres solutions.

Si nous ne tenons pas compte des coûts de défaillance et des coûts de remplacements dans 10000 km, la meilleure solution sera aussi la solution 2 qui consiste à remplacer seulement le pneu 9723.

Ainsi, ceci n'est qu'un exemple de solution avec le cas d'un pneu rejeté. Par ailleurs, le programme examine tous les autres cas de rejet (2 rejets, 3 rejets et 4 rejets). Il cherche toujours dans le stock le premier pneu qui sera compatible avec les autres pneus, et ce pour former un bon couplage entre les pneus existant sur l'autobus et celui ou ceux que nous cherchons pour compléter le quatuor.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes intéressés au domaine de la fiabilité et de la maintenance de véhicules routiers, en particulier, le remplacement des pneus d'autobus sur le moyen terme. La finalité de ce travail est d'optimiser une stratégie de remplacement des pneus d'autobus en se basant sur la fiabilité et les coûts afférés.

Cette recherche nous a amené à appréhender les aspects suivants :

- Usure ou dégradation des pneus des autobus;
- Défaillances liées aux pneus des autobus;
- Optimisation des remplacements des pneus.

D'abord, nous avons réalisé une revue de littérature portant essentiellement sur les modèles phénoménologiques de dégradation des pneus, les modèles mathématiques déjà utilisés pour modéliser la défaillance des pneus et les différentes stratégies de maintenance ayant pour but d'augmenter la disponibilité et la fiabilité des pneus.

Ensuite, nous avons réalisé plusieurs tests préliminaires afin d'organiser les données avec lesquelles nous avons établi nos modèles. Par la suite nous avons caractérisé les pneus par deux modèles: Un premier modèle stochastique permettant de calculer le risque de défaillance des pneus en fonction du kilométrage parcouru et du type de semelles. Un second modèle d'usure basé sur la régression linéaire permettant de calculer une mesure de la dégradation par usure en fonction du kilométrage parcouru du pneu, du type de semelles et du nombre de reconditionnements.

Enfin, nous avons développé le modèle de planification et optimisé une stratégie de remplacement des pneus. Le programme est réalisé à l'aide du code VBA d'EXCEL. Il permet d'optimiser les remplacements des pneus en tenant compte des modèles d'usure et de défaillance avec le moindre coût. Ceci pourra être un meilleur outil d'aide à la décision permettant aux responsables de maintenance de mieux contrôler et gérer leur stock de pneus.

Comme perspectives de ce travail, nous envisageons les voies de développement et les recommandations suivantes :

- Améliorer le processus de recherche de la meilleure solution en explorant toutes les combinaisons possibles pour chaque scénario;
- Intégrer des contraintes liées à la gestion des pneus en stock afin d'assurer une rotation ou une meilleure gestion de ceux-ci;
- Nous utilisons dans ce projet une optimisation à un seul pas, on considère un horizon de 10000 km pour l'autobus alors que le choix que nous faisons aujourd'hui affecte nos choix futurs, il devient très convenable alors de considérer le choix de remplacement sur un horizon plus long (durée de vie du d'autobus = 60000 km). On optimise alors le remplacement des pneus d'une manière dynamique;
- Utilisation des modèles de risque proportionnel pour modéliser les données de défaillances en fonction du temps et les facteurs d'influences. Car d'après la littérature, le taux de défaillance pour les systèmes mécaniques n'est pas constant et ne dépend pas uniquement du temps.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Michelin. (2005). Qu'est-ce qu'un pneu ?
http://www.michelin.fr/fr/auto/auto_cons_bib_qu_est_pne.jsp.
- [2] Michelin. (2005). L'architecture d'un pneu.
http://www.michelin.fr/fr/auto/auto_cons_bib_arc_pne.jsp.
- [3] René Benoît, Michel Gou, Olivier Bellavigna, Toan Vu-Khanh, Patricia Dolez, Carlos Arrieta, Cédric Nohilé et Tung Ha-Anh (2006). Étude exploratoire sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus de camions lourds, Rapport d'étude, Service de la recherche, IRSST.
- [4] Cox DR (1972). Regression models and life tables. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*; 34: 187-220.
- [5] E.Courilleau, J.M.Marion (1999). Comparaison de modèles d'estimation de la fonction de survie appliquée à des données routières. *Revue de statistique appliquée*, **47**(1) p.81-97.
- [6] Ahmed Z. Al-Garni, Ahmet Z. Sahin, Abdulrahim S. Al-Ghamdi And Saif A. Al-Kaabi (1999). Reliability analysis of aeroplane brakes, Technical Report, Department of Mechanical Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia.
- [7] V.V. Krivtsov, D.E. Tananko, T.P. Davis (2002). Regression approach to tire reliability analysis Ford Motor Company, MD 412/PDC, 20901 Oakwood Blvd, Dearborn, MI 48121-2053, USA

- [8] Fact Book Michelin (2004). Comment lire un pneu?
http://gestdoc.webmichelin.com/repository/DocumentRepositoryServlet?codeDocument=523&codeRepository=MICHCORP&codeRubrique=FB_05_FR.
- [9] Fayolle, B., & Verdu, J. (2002). Vieillissement physique des matériaux polymères. In P. T. d. l'Ingénieur (Ed.), Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites (Vol. AM 3150).
- [10] Verdu, J. (2002). Vieillissement chimique des plastiques: aspects généraux. In P. t. d. l'ingénieur (Ed.), Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites (Vol. AM 3151)
- [11] P.I. Dolez, C. Nohile, T. Ha Anh, T. Vu-Khanh, R. Benoît and O. Bellavigna-Ladoux (2007). Exploring the chemical aspects of truck tire blowouts and explosions, Rapport technique, Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail, Montréal, QC, Canada.
- [12] Hofmann, W. (1989). Aging and aging protectors. In O. U. Press (Ed.), Rubber Technology Handbook, pp. 264–268.
- [13] Bobo, S. N. (1988). Fatigue life of aircraft tires. *Tire Science & Technology*, 16(4), 208-222
- [14] Barlow, R. & Proschan, F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*, John Wiley and Sons.
- [15] Nakagawa, T. (1984). Optimal policy of continuous and discrete replacement with minimal repair at failure. *Naval Research Logistics Quarterly* **31** (4), pp. 543–550

- [16] Nakagawa, T. (1979). Optimum policies when preventive maintenance is imperfect, *IEEE Transactions on Reliability R-28* 4: 331–332.
- [17] Berg and Epstein, (1976). M. Berg and B. Epstein, A modified block replacement policy. *Naval Research Logistics* **23**, pp. 15–24.
- [18] Cipoire Y. (2006). Estimation d'une loi de Weibull pour des données de défaillance en âge et en distance. *Fiabilité- Maintenabilité, $\lambda\mu$* 15.
- [19] MC Poulin, L Poirier (2008). L'analyse des modes de défaillances et de leurs effets : une méthode d'analyse proactive des risques en établissement de santé *Pharmactuel* **41** (4), pp. 241-244.
- [20] Brice Lanternier, Patrick Lyonnet and Rosario Toscan (2008). Modèle à hasard proportionnel pour la fiabilité des composants mécaniques *Mécanique et Industries* **9**, 397 – 405.
- [21] Mortureux Yves (2002). Arbres de défaillance, des causes et d'événement *Techniques de l'ingénieur. Sécurité et gestion des risques* ISSN 1638-6981.
- [22] Ghasemi, A., Yacout, S., and Ouali, M. S. (2007). Optimal condition based maintenance with imperfect information and the proportional hazards model, **45** (4), pp. 989-1012.
- [23] Direction des communications, Société de l'Assurance Automobile de Québec (2002). Guide de vérification mécanique.
http://www.saaq.gouv.qc.ca/publications/lourds/guideverif_fr.pdf

- [24] Kevin J. Carroll (2003). On the use and utility of the Weibull model in the analysis of survival data, **24**, pp. 682 – 701.
- [25] Estelle Deloux, Bruno Castanier, Christophe Bérenguer (2007). Optimisation de la politique de maintenance pour un système à dégradation graduelle stressé 7ème Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Qualita, Tanger : Morocco.
- [26] CH Lie, YH Chun (1986). An Algorithm for preventive maintenance policy. IEEE Transactions on Reliability. **35** (1), pp. 71-5.
- [27] V Jayabalan, D Chaudhuri (1992). Cost optimization of maintenance scheduling for a system with assured reliability, IEEE Transactions on Reliability, **41** (1), pp. 21-25.
- [28] JK Chan, L Shaw (1993). Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance NSU Technol, NY Melville - IEEE Transactions on Reliability, **42** (4), pp. 566-571.
- [29] X Zheng, N Fard (1991). A maintenance policy for repairable systems based on opportunistic failure-rate tolerance, IEEE Transactions on Reliability, **40** (2), pp. 237-244.
- [30] JS Dagpunar (1996). A maintenance model with opportunities and interrupt replacement options. The Journal of the Operational Research Society, **47** (11), pp. 1406-1409.

ANNEXE A – PROGRAMME INFORMATIQUE

Sub DefinitionPlageStock()

,

'Déclaration des variables

,

Dim NbPneus As Integer, NbRejet As Integer

Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, w As Integer, Diff1 As Integer, Diff2 As Integer, Diff3 As Integer

Dim Costmin As Long

Dim Solopt As Integer

Dim Stock As Range, Autobus As Range, Pneu1 As Range, Pneu2 As Range, Pneu3 As Range, Pneu4 As Range, CAS As Range

Dim cell As Range, pointeur As Range

Dim TypeSemelle As String

Dim Co(15) As Integer

Const Cd As Integer = 500

Dim riskmax As Long

Dim riskrange As Range

Const Cr1 As Integer = 250

Dim V(4) As Integer

Dim Rejet10000 As Integer

Dim RejetMin As Integer

Dim CoûtTotal As Integer

Dim u As Integer

Dim usure(4) As Integer, no(4) As Integer

Dim uMin As Integer, uMax As Integer, uPneu1 As Integer, uPneu2 As Integer, uPneu3 As Integer

Dim NoSolution As Integer

Dim Match As Boolean

Dim Cost As Integer

Dim numsol As Integer

'Sélection de la plage stock

'On crée la plage stock et on calcule le nombre de pneus en stock

```
Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10")
NoSolution = 0
With Worksheets("Stock").Range("A1")
    Set Stock = Range(.Offset(1, 0), .End(xlDown).End(xlToRight))
    NbPneus = Range(.Offset(1, 0), .End(xlDown)).Rows.Count
End With
```

'On crée la plage Autobus, on calcule le nombre de pneus rejetés,

'On identifie l'usure de chaque pneu, le pneu le plus usé et celui qui l'est moins

```
With Worksheets("Autobus").Range("B4")
    Set Autobus = Range(.Offset(1, 0), .End(xlDown).End(xlToRight))
End With
For w = 0 To 14
    uMin = 100
    uMax = 0
    NbRejet = 0
    j = 0
    With Worksheets("Autobus").Range("B5")
        For i = 0 To 3
            usure(i) = 100
            If Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(i, w).Value = True Then
                NbRejet = NbRejet + 1
            Else
                usure(i) = .Offset(i, 3).Value
                no(j) = i
            End If
        Next i
    End With
Next w
```



```

    j = j + 1

    If usure(i) < uMin Then uMin = usure(i)

    If usure(i) > uMax Then uMax = usure(i)

    End If

    Next i

    TypeSemelle = .Offset(0, 1).Value

    End With

```

' La variable match permet de savoir s'il y a en stock un pneu qui peut compléter le quatuor
 ' On cherche dans le stock, un pneu ayant la bonne semelle et dont l'usure est compatible avec les
 ' pneus conservés

```

    Diff1 = (Abs(usure(no(0)) - usure(no(1))))
    Diff2 = (Abs(usure(no(0)) - usure(no(2))))
    Diff3 = (Abs(usure(no(1)) - usure(no(2))))

```

' Nb rejet = 1: Cas où un pneu est rejeté

```

    If NbRejet = 1 Then

        Match = False

        If (Diff1 <= 4) And (Diff2 <= 4) And (Diff3 <= 4) Then

            For Each cell In Stock

                ' Vérification de la semelle

                If cell.Offset(0, 2).Value = TypeSemelle Then

```

..'

'Vérification si l'usure est compatible

'

If (Abs(usure(no(0)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _

(Abs(usure(no(1)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And (Abs(usure(no(2)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then

Set Pneu1 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))

Match = True

NoSolution = w + 1

Exit For ' On sort de la boucle For si on ne cherche qu'un pneu, sinon il faut poursuivre

End If

End If

Next

End If

If Match = False Then

Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(8 * w, 0)

With pointeur

pointeur.Value = "Solution"

pointeur.Offset(0, 1).Value = w + 1

pointeur.Offset(1, 1).Value = "Aucune combinaison possible"

End With

Else

Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(8 * w, 0)

With pointeur

pointeur.Value = "Solution"

pointeur.Offset(0, 1).Value = w + 1

Worksheets("Autobus").Range(Range("B4").Offset(0, 6), Range("B4").Offset(4, 0)).Copy

Range(pointeur.Offset(1, 0), pointeur.Offset(1, 0)).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

'

'Calcul du coût de changement de la situation actuelle C_{R0}

'

$Co(w) = Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(4, w).Value$

$pointeur.Offset(6, 3).Value = Co(w)$

For i = 0 To 3

If Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(i, w).Value = False Then

Worksheets("Autobus").Range(Range("B5").Offset(i, 0), Range("B5").Offset(i, 3)).Copy

Worksheets("Autobus").Range(pointeur.Offset(i + 2, 0), pointeur.Offset(i + 2, 3)).PasteSpecial

Paste:=xlPasteValues

Else

With Pneu1

.Offset(0, 0).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 2).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 5).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 8).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 9).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

End With

pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value

End If

Next

'

'Calcul du coût lié à la défaillance $C_d * F^*$

'

Set riskrange = Range(Range("F12").Offset(8 * w, 0), Range("F12").Offset(8 * w + 3, 0))

```

riskrange.Select
riskmax = Application.WorksheetFunction.Max(riskrange)
pointeur.Offset(6, 4).Value = Cd * riskmax / 100
pointeur.Offset(6, 0) = "Coût"

```

▪

'Calcul du coût de changement dans 10000km $C_{R1}*(1-F)$ '

▪

```

RejetMin = 4
For i = 1 To 4
V(i) = .Offset(i + 1, 5).Value
Rejet10000 = 0
If V(i) <= 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
If Abs(.Offset(2, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
If Abs(.Offset(3, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
If Abs(.Offset(4, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
If Abs(.Offset(5, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
If Rejet10000 < RejetMin Then RejetMin = Rejet10000
Next i
pointeur.Offset(6, 5).Value = Cr1 * Rejet10000 * (1 - riskmax / 100)
pointeur.Offset(6, 6).Value = pointeur.Offset(6, 3) + pointeur.Offset(6, 4) + pointeur.Offset(6, 5)

```

End With

End If

End If

```

' Nb rejet = 2: Cas où deux pneus sont rejetés

```

```

If NbRejet = 2 Then

```

```

    Match = False ' Permettra de savoir si on a trouvé un pneu qui convient

```

```

    If (Diff1 <= 4) Then

```

```

        k = 0

```

```

        For Each cell In Stock

```

```

            '

```

```

            ' Verification de la semelle

```

```

            '

```

```

                If cell.Offset(0, 2).Value = TypeSemelle Then

```

```

                    '

```

```

                    ' Verification si l'usure est compatible

```

```

                    '

```

```

                        If k = 0 Then

```

```

                            If (Abs(usure(no(0)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _

```

```

                                (Abs(usure(no(1)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then

```

```

                                    Set Pneu1 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))

```

```

                                    uPneu1 = cell.Offset(0, 5).Value

```

```

                                    k = k + 1

```

```

                                End If

```

```

                        Else

```

```

                            If (Abs(usure(no(0)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _

```

```

                                (Abs(usure(no(1)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _

```

```

                                    (Abs(uPneu1 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then

```

```

                                        Set Pneu2 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))

```

```

                                        NoSolution = w + 1

```

```

                                        Match = True

```

```

        Exit For
    End If
End If
End If
End If
Next
End If

If Match = False Then
    Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(8 * w, 0)
    With pointeur
        pointeur.Value = "Solution"
        pointeur.Offset(0, 1).Value = w + 1
        pointeur.Offset(1, 1).Value = "Aucune combinaison possible"
    End With
Else
    Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(8 * w, 0)
    With pointeur
        pointeur.Value = "Solution"
        pointeur.Offset(0, 1).Value = w + 1
        Worksheets("Autobus").Range(Range("B4").Offset(0, 6), Range("B4").Offset(5, 0)).Copy
        Range(pointeur.Offset(1, 0), pointeur.Offset(1, 0)).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
        '
        'Calcul du coût de changement de la situation actuelle CR0
        '
        Co(w) = Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(4, w).Value
        pointeur.Offset(6, 3).Value = Co(w)

    End With

    k = 0
    For i = 0 To 3
        If Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(i, w).Value = False Then

```

```

Worksheets("Autobus").Range(Range("B5").Offset(i, 0), Range("B5").Offset(i, 3)).Copy
Worksheets("Autobus").Range(pointeur.Offset(i + 2, 0), pointeur.Offset(i + 2, 3)).PasteSpecial
Paste:=xlPasteValues

Else

If k = 0 Then
  With Pneu1
    .Offset(0, 0).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 2).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 5).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 8).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 9).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
  End With
  pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value
  k = k + 1
Else
  With Pneu2
    .Offset(0, 0).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 2).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 5).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 8).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 9).Copy
  End With

```

```

    pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
End With

    pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value
End If
End If
Next
'
'Calcul du coût lié à la défaillance  $C_d * F^*$ 
'
Set riskrange = Range(Range("F12").Offset(8 * w, 0), Range("F12").Offset(8 * w + 3, 0))

    riskrange.Select

    riskmax = Application.WorksheetFunction.Max(riskrange)
    pointeur.Offset(6, 4).Value = Cd * riskmax / 100
    pointeur.Offset(6, 0) = "Coût"
'
'Calcul du coût de changement dans 10000km  $C_{R1} * (1 - F^*)$ 
'

    RejetMin = 4
    For i = 1 To 4
        V(i) = .Offset(i + 1, 5).Value
        Rejet10000 = 0
        If V(i) <= 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
        If Abs(.Offset(2, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
        If Abs(.Offset(3, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
        If Abs(.Offset(4, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
        If Abs(.Offset(5, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
        If Rejet10000 < RejetMin Then RejetMin = Rejet10000
    Next i

    pointeur.Offset(6, 5).Value = Cr1 * Rejet10000 * (1 - riskmax / 100)
    pointeur.Offset(6, 6).Value = pointeur.Offset(6, 3) + pointeur.Offset(6, 4) + pointeur.Offset(6, 5)

```



```

    End With
  End If
End If
'
' Nb rejet = 3: Cas où trois pneus sont rejetés
'
If NbRejet = 3 Then
  Match = False ' Permettra de savoir si on a trouvé un pneu qui convient

  k = 0
  For Each cell In Stock
    '
    ' Verification de la semelle
    '
    If cell.Offset(0, 2).Value = TypeSemelle Then
      '
      ' Verification si l'usure est compatible
      '
      If k = 0 Then
        If (Abs(usure(no(0)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then
          Set Pneu1 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))
          uPneu1 = cell.Offset(0, 5).Value
          k = k + 1
        End If
      Else
        If k = 1 Then
          If (Abs(usure(no(0)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _

```

```

(Abs(uPneu1 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then
Set Pneu2 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))
uPneu2 = cell.Offset(0, 5).Value

k = k + 1

End If

Else

If (Abs(usure(no(0)) - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _
(Abs(uPneu1 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _
(Abs(uPneu2 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then
Set Pneu3 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))

NoSolution = w + 2

Match = True

Exit For

End If

End If

End If

End If

Next

If Match = False Then

Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(8 * w, 0)

With pointeur

pointeur.Value = "Solution"

pointeur.Offset(0, 1).Value = w + 1

pointeur.Offset(1, 1).Value = "Aucune combinaison possible"

End With

Else

Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(8 * w, 0)

With pointeur

pointeur.Value = "Solution"

```

```
pointeur.Offset(0, 1).Value = w + 1
```

```
Worksheets("Autobus").Range(Range("B4").Offset(0, 6), Range("B4").Offset(5, 0)).Copy
```

```
Range(pointeur.Offset(1, 0), pointeur.Offset(1, 0)).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
,
```

```
'Calcul du coût de changement de la situation actuelle CR0
```

```
,
```

```
Co(w) = Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(4, w).Value
```

```
pointeur.Offset(6, 3).Value = Co(w)
```

```
k = 0
```

```
For i = 0 To 3
```

```
  If Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(i, w).Value = False Then
```

```
    Worksheets("Autobus").Range(Range("B5").Offset(i, 0), Range("B5").Offset(i, 3)).Copy
```

```
    Worksheets("Autobus").Range(pointeur.Offset(i + 2, 0), pointeur.Offset(i + 2, 3)).PasteSpecial  
Paste:=xlPasteValues
```

```
  Else
```

```
    If k = 0 Then
```

```
      With Pneu1
```

```
        .Offset(0, 0).Copy
```

```
        pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
        .Offset(0, 2).Copy
```

```
        pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
        .Offset(0, 5).Copy
```

```
        pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
        .Offset(0, 8).Copy
```

```
        pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
        .Offset(0, 9).Copy
```

```
        pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
      End With
```

```
    pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value
```

k = k + 1

Else

If k = 1 Then

With Pneu2

.Offset(0, 0).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 2).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 5).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 8).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 9).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

End With

pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value

k = k + 1

Else

With Pneu3

.Offset(0, 0).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 2).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 5).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 8).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

.Offset(0, 9).Copy

pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

End With

```

    pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value
End If

End If

End If

Next
'
'Calcul du coût lié à la défaillance  $C_d * F$ 
'
Set riskrange = Range(Range("F12").Offset(8 * w, 0), Range("F12").Offset(8 * w + 3, 0))

riskrange.Select

riskmax = Application.WorksheetFunction.Max(riskrange)

pointeur.Offset(6, 4).Value = Cd * riskmax / 100

pointeur.Offset(6, 0) = "Coût"
'
'Calcul du coût de changement dans 10000km  $C_{R1} * (1 - F)$ 
'

RejetMin = 4

For i = 1 To 4
V(i) = .Offset(i + 1, 5).Value

Rejet10000 = 0

If V(i) <= 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1

If Abs(.Offset(2, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
If Abs(.Offset(3, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
If Abs(.Offset(4, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1
If Abs(.Offset(5, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1

If Rejet10000 < RejetMin Then RejetMin = Rejet10000

Next i

pointeur.Offset(6, 5).Value = Cr1 * Rejet10000 * (1 - riskmax / 100)

pointeur.Offset(6, 6).Value = pointeur.Offset(6, 3) + pointeur.Offset(6, 4) + pointeur.Offset(6, 5)

```

```

    End With
  End If
End If
'
' Nb rejet = 4: Cas où les quatre pneus sont rejetés
'

If NbRejet = 4 Then

    Match = False ' Permettra de savoir si on a trouvé un pneu qui convient
    k = 0

    For Each cell In Stock
    '
    ' Verification de la semelle
    '
        If cell.Offset(0, 2).Value = TypeSemelle Then
        '
        ' Verification si l'usure est compatible
        '

            If k = 0 Then

                Set Pneu1 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))
                uPneu1 = cell.Offset(0, 5).Value
                k = k + 1

            Else

                If k = 1 Then

                    If (Abs(uPneu1 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then

                        Set Pneu2 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))
                        uPneu2 = cell.Offset(0, 5).Value
                        k = k + 1

                    End If

                End If

            End If

        End If

    End For

End If

```

```

    End If
Else
    If k = 2 Then
        If (Abs(uPneu1 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _
            (Abs(uPneu2 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then
            Set Pneu3 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))
            uPneu3 = cell.Offset(0, 5).Value
            k = k + 1
        End If
    Else
        If (Abs(uPneu1 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _
            (Abs(uPneu2 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) And _
            (Abs(uPneu3 - cell.Offset(0, 5).Value) <= 4) Then
            Set Pneu4 = Range(cell.Offset(0, 0), cell.Offset(0, 5))
            NoSolution = w + 2
            Match = True
        Exit For
        End If
    End If
End If
End If
End If
End If
Next
End If

If Match = False Then
Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(8 * w, 0)
With pointeur
    pointeur.Value = "Solution"
    pointeur.Offset(0, 1).Value = w + 1

```

```

    pointeur.Offset(1, 1).Value = "Aucune combinaison possible"
End With
Else
Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(8 * w, 0)
With pointeur
    pointeur.Value = "Solution"
    pointeur.Offset(0, 1).Value = w + 1
    Worksheets("Autobus").Range(Range("B4").Offset(0, 6), Range("B4").Offset(5, 0)).Copy
    Range(pointeur.Offset(1, 0), pointeur.Offset(1, 0)).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    ,
    'Calcul du coût de changement de la situation actuelle CR0
    ,
    Co(w) = Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(4, w).Value
    pointeur.Offset(6, 3).Value = Co(w)
    k = 0
    For i = 0 To 3
        If Worksheets("CAS").Range("B3").Offset(i, w).Value = False Then
            Worksheets("Autobus").Range(Range("B5").Offset(i, 0), Range("B5").Offset(i, 3)).Copy
            Worksheets("Autobus").Range(pointeur.Offset(i + 2, 0), pointeur.Offset(i + 2, 3)).PasteSpecial
Paste:=xlPasteValues
        Else
            If k = 0 Then
                With Pneu1
                    .Offset(0, 0).Copy
                    pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
                    .Offset(0, 2).Copy
                    pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
                    .Offset(0, 5).Copy
                    pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
                    .Offset(0, 8).Copy

```



```

pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
.Offset(0, 9).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

```

End With

```

pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value
k = k + 1

```

Else

If k = 1 Then

With Pneu2

```

.Offset(0, 0).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
.Offset(0, 2).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
.Offset(0, 5).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
.Offset(0, 8).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
.Offset(0, 9).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

```

End With

```

pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value
k = k + 1

```

Else

If k = 2 Then

With Pneu3

```

.Offset(0, 0).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
.Offset(0, 2).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues

```

```

.Offset(0, 5).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
.Offset(0, 8).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
.Offset(0, 9).Copy
pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
End With
pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value
k = k + 1
Else
  With Pneu4
    .Offset(0, 0).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 0).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 2).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 1).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 5).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 8).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
    .Offset(0, 9).Copy
    pointeur.Offset(i + 2, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
  End With
  pointeur.Offset(i + 2, 2).Value = Worksheets("Autobus").Range("B5").Offset(i, 2).Value
End If
End If
End If
End If
Next

```

'Calcul du coût lié à la défaillance $C_d * F$ '

Set riskrange = Range(Range("F12").Offset(8 * w, 0), Range("F12").Offset(8 * w + 3, 0))

riskrange.Select

riskmax = Application.WorksheetFunction.Max(riskrange)

pointeur.Offset(6, 4).Value = Cd * riskmax / 100

pointeur.Offset(6, 0) = "Coût"

'Calcul du coût de changement dans 10000km $C_{R1} * (1 - F)$ '

RejetMin = 4

For i = 1 To 4

V(i) = .Offset(i + 1, 5).Value

Rejet10000 = 0

If V(i) <= 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1

If Abs(.Offset(2, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1

If Abs(.Offset(3, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1

If Abs(.Offset(4, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1

If Abs(.Offset(5, 5).Value - V(i)) > 4 Then Rejet10000 = Rejet10000 + 1

If Rejet10000 < RejetMin Then RejetMin = Rejet10000

Next i

pointeur.Offset(6, 5).Value = Cr1 * Rejet10000 * (1 - riskmax / 100)

pointeur.Offset(6, 6).Value = pointeur.Offset(6, 3) + pointeur.Offset(6, 4) + pointeur.Offset(6, 5)

End With

End If

Next

'Recherche de la solution optimale

,

Costmin = 100000

For j = 0 To 14

Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("H128").Offset(-8 * j, 0)

Cost = pointeur.Offset(0, 0).Value

numsol = pointeur.Offset(-6, -5).Value

If (Cost > 0) Then

If (Cost < Costmin) Then

Costmin = Cost

Solopt = numsol

End If

End If

Next

,

'Colorier la solution optimale

,

Set pointeur = Worksheets("Autobus").Range("B10").Offset(0, 0)

For j = 0 To 6

For i = 0 To 6

pointeur.Offset(8 * (Solopt - 1) + j, i).Interior.Color = 123456789

Next

Next

End Sub