



**HAL**  
open science

# Modélisation et optimisation de la maintenance des infrastructures routières pour le véhicule autonome

Ikram Najeh

► **To cite this version:**

Ikram Najeh. Modélisation et optimisation de la maintenance des infrastructures routières pour le véhicule autonome. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Gustave Eiffel, 2022. Français. NNT : 2022UEFL2053 . tel-04052804

**HAL Id: tel-04052804**

**<https://theses.hal.science/tel-04052804>**

Submitted on 30 Mar 2023

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

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



THÈSE PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR  
UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

Thèse soutenue le 17 novembre 2022

Présentée par Ikram Najeh

---

# Modélisation et optimisation de la maintenance de l'infrastructure routière pour le véhicule autonome

---

**Directeur de thèse** : Laurent Bouillaut, Chargé de Recherche HDR (Université G. Eiffel)

**Rapporteur** : Bruno Castanier, Professeur des universités (Université d'Angers)

**Rapporteur** : Benoit lung, Professeur des universités (Université de Lorraine)

**Examinatrice** : Zohra Cherfi Boulanger, Professeur des universités (UTC)

**Examineur** : Dimitri Daucher, Chargé de Recherche (Université G. Eiffel)

**Invité** : Maxime Redondin, Ingénieur de Recherche (Colas Research Center)

**Invité** : Mohamed Cherif Rahal, Directeur du domaine véhicule automatisé (VEDECOM)

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>Description de l'infrastructure routière et de sa maintenance</b>	<b>21</b>
2.1	Véhicule autonome et infrastructure routière . . . . .	22
2.2	Généralités sur le marquage rétroréfléchissant . . . . .	25
2.2.1	Présentation du marquage rétroréfléchissant . . . . .	25
2.2.2	Inspection et maintenance du marquage rétroréfléchissant . . . . .	27
2.3	Généralités sur la chaussée . . . . .	31
2.3.1	Présentation structurelle de la chaussée . . . . .	31
2.3.2	Principales dégradations de la chaussée . . . . .	32
2.3.3	Modélisation de la dégradation de la chaussée . . . . .	35
2.3.3.1	Modèles mécaniques de la dégradation : . . . . .	35
2.3.3.2	Modèles statistiques pour la modélisation de la dégradation de la chaussée . . . . .	37
2.3.4	Stratégies de maintenance proposées pour la chaussée . . . . .	41
2.4	Algorithmes d'identification de zones stratégiques de maintenance . . . . .	44
2.5	Etude de cas : Infrastructure routière . . . . .	46
2.5.1	Données relatives aux marquages routiers : la Route Nationale 4 . . . . .	46
2.5.2	Données relatives à la chaussée : Long Term Pavement Performance (LTPP) . . . . .	46
2.5.3	Application d'algorithmes de classification sur les données de l'infrastructure . . . . .	52
2.5.3.1	Identification de zones stratégiques de maintenance pour la Route Nationale 4 . . . . .	52
2.5.3.2	Identification de zones de maintenance pour les données de la chaussée . . . . .	58
2.5.4	Construction d'un exemple test d'infrastructure routière . . . . .	60
2.6	Conclusion . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Regroupement statique d'actions de maintenance</b>	<b>63</b>
3.1	Histoire et généralité de la maintenance . . . . .	63
3.2	Modélisation des systèmes à plusieurs composants . . . . .	68
3.2.1	Modélisation de la structure du système . . . . .	68

3.2.2	Modélisation économique entre les composants . . . . .	71
3.2.3	Modélisation stochastique entre les composants . . . . .	72
3.2.4	Modélisation d'un système multi-composant : infrastructure routière	72
3.3	Stratégie de regroupement d'actions de maintenance statique . . . . .	74
3.3.1	Panorama sur les méthodes de regroupement statique d'actions de maintenance . . . . .	74
3.3.2	Identification de l'horizon de planification . . . . .	77
3.3.3	Estimation de la solution de regroupement optimale par un algorithme génétique . . . . .	79
3.3.3.1	Algorithme d'optimisation de la solution : Algorithme génétique . . . . .	80
3.3.4	Optimisation des fonctions de coût de maintenance . . . . .	84
3.3.4.1	Regroupement des actions de maintenance : problématique	84
3.3.4.2	Stratégie de regroupement des actions de maintenance :	85
3.4	Stratégie de regroupement d'actions de maintenance statique d'une infrastructure routière . . . . .	87
3.4.1	Modèle de durée de vie et remplacement systématique par rapport à l'âge . . . . .	88
3.4.1.1	Modèle de durée de vie pour les données censurées . . . . .	88
3.4.1.2	Modèle de durée de vie pour l'infrastructure routière . . . . .	93
3.4.1.3	Remplacement systématique par rapport à l'âge . . . . .	93
3.4.2	Analyse du système : . . . . .	95
3.4.2.1	Analyse structurelle du système : . . . . .	95
3.4.2.2	Analyse stochastique du système : . . . . .	96
3.4.2.3	Analyse économique du système : . . . . .	96
3.4.3	Regroupement statique des actions de maintenance : . . . . .	96
3.4.3.1	Plan individuel de maintenance : . . . . .	96
3.4.3.1.1	Regroupement optimal des actions de maintenance	98
3.4.3.2	Regroupement statique des actions de maintenance de la signalisation horizontale . . . . .	98
3.4.3.3	Regroupement statique des actions de maintenance de l'infrastructure routière . . . . .	105
3.4.3.3.1	Horizon de planification : . . . . .	106
3.5	Conclusion . . . . .	110
<b>4</b>	<b>Regroupement dynamique des actions de maintenance</b>	<b>113</b>
4.1	Panorama sur les méthodes de regroupement dynamique d'actions de maintenance . . . . .	114
4.1.1	Stratégies de regroupement dynamiques sur un horizon fini . . . . .	115
4.1.2	Stratégies de regroupement dynamiques sur un horizon roulant . . . . .	117
4.1.3	Regroupement dynamique d'actions de maintenance en tenant compte de la structure du système . . . . .	118
4.2	Procédures de mise à jour du plan de regroupement . . . . .	120
4.2.1	Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type structure . . . . .	121

4.2.2	Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type composant . . . . .	121
4.2.3	Procédures de mise à jour du plan de regroupement de type externe	122
4.3	Stratégie de regroupement dynamique pour les systèmes à plusieurs composants . . . . .	123
4.4	Stratégie de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour l'infrastructure routière : . . . . .	127
4.4.1	Modèles de dégradation courante et remplacement conditionné par rapport à la dégradation courante . . . . .	127
4.4.1.1	Généralité sur les modèles de dégradation courante et les stratégies de maintenance conditionnelle . . . . .	128
4.4.1.2	Application sur le cas de l'infrastructure routière . . . . .	131
4.4.2	Stratégie de regroupement dynamique pour l'infrastructure routière	133
4.4.2.1	Regroupement dynamique des actions de maintenance pour la signalisation horizontale . . . . .	135
4.4.2.2	Regroupement dynamique des actions de maintenance de l'infrastructure routière . . . . .	138
4.5	Conclusion . . . . .	145
<b>5</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>148</b>

# Table des figures

2.1	Exemple d'une détection d'une ligne de marquage [136] . . . . .	24
2.2	Une détection perturbée à cause d'une infrastructure dégradée [137] . . . . .	24
2.3	Phénomènes de rétro réflexion d'un marquage . . . . .	25
2.4	Quatre machines de pose : (a) Trassar 8, (b) Trassar 131, (c) Trassar 351, (d) Trassar 16 T ([78]) . . . . .	26
2.5	Coupe d'un marquage rétro réfléchissant à base de peinture blanche à l'eau [78] . . . . .	26
2.6	Visibilité de nuit en fonction du niveau de rétro réflexion des marquages [78] . . . . .	27
2.7	Le rétro réflectomètre Ecodyn et le processus de mesure [26] . . . . .	27
2.8	Coupe transversale d'une chaussée [148] . . . . .	32
2.9	Exemples de fissuration de la chaussée de la base de données [13] . . . . .	33
2.10	Exemple pédagogique de dendrogramme . . . . .	45
2.11	Localisation de la RN4 dans le département de la Marne . . . . .	46
2.12	Modèle numérisé de calcul de pourcentage de fissuration . . . . .	49
2.13	Présentation des sections de routes du Texas sur la carte donnée par LTPP [25] . . . . .	50
2.14	Niveau de rétro réflexion observée des marquages de la RN4 . . . . .	52
2.15	Dendrogramme associé à la segmentation en 9 clusters du suivi de la ligne axiale de la RN4 . . . . .	53
2.16	Projection de la classification sur la carte de la RN4 . . . . .	53
2.17	Cercle de corrélation avec confrontation des deux premières composantes principales . . . . .	54
2.18	Présentation des individus suivant les deux premières composantes principales . . . . .	54
2.19	Rétro réflexion moyenne des clusters de la ligne axiale . . . . .	55
2.20	Rétro réflexion moyenne des clusters de la bande d'arrêt d'urgence . . . . .	56
2.21	Rétro réflexion moyenne des clusters de la ligne TPC . . . . .	56
2.22	Niveau de fissuration de la chaussée des sections du Texas . . . . .	58
2.23	Dendrogramme des sections du Texas avec une segmentation en 8 clusters . . . . .	59
2.24	Fissuration moyenne par cluster . . . . .	59
3.1	Types de stratégies de regroupement d'actions de maintenance . . . . .	67
3.2	Système en série . . . . .	69
3.3	Système en parallèle . . . . .	70

3.4	Système K sur N . . . . .	71
3.5	Modélisation de l'infrastructure en parallèle . . . . .	73
3.6	Modélisation de l'infrastructure en série . . . . .	73
3.7	Modélisation de l'infrastructure en série parallèle . . . . .	74
3.8	Exemple de définition d'horizon de planification pour l'infrastructure routière	78
3.9	Exemple de définition d'horizon de planification pour l'infrastructure rou- tière sur deux cycles . . . . .	78
3.10	Exemple de structure groupante . . . . .	81
3.11	Phase de croisement . . . . .	83
3.12	Phase de mutation . . . . .	83
3.13	Changement de date d'exécution de maintenance . . . . .	86
3.14	Stratégie de regroupement . . . . .	88
3.15	Stratégie de remplacement par rapport à l'âge . . . . .	94
3.16	Exemple d'infrastructure multi défaillante . . . . .	95
3.17	Représentation structurelle de l'infrastructure routière . . . . .	96
3.18	Plan de maintenance individuel pour les lignes de marquage . . . . .	97
3.19	Fiabilité du sous-système 1 suivant 3 stratégies de maintenance . . . . .	103
3.20	Fiabilité du sous-système 9 suivant 3 stratégies de maintenance . . . . .	104
3.21	Fiabilité du sous-système 5 suivant 3 stratégies de maintenance . . . . .	105
3.22	Plan de maintenance individuel pour le sous-système $S'_1$ . . . . .	106
3.23	Plan de regroupement statique pour le sous-système $S'_1$ . . . . .	107
3.24	Plan de regroupement des actions de maintenance du sous-système 1 sur deux cycles . . . . .	107
3.25	Regroupement d'action de maintenance à la fin du premier cycle . . . . .	109
3.26	Comparaison entre le regroupement des actions de maintenance sur un cycle et sur deux cycles . . . . .	109
3.27	Plan de maintenance individuel du sous-système 2 . . . . .	110
4.1	Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type1 . . .	121
4.2	Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type 2 . .	122
4.3	Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type 3 . .	123
4.4	Stratégie de maintenance dynamique . . . . .	123
4.5	Stratégie de mise du plan de regroupement statique . . . . .	125
4.6	Stratégie de maintenance dynamique pour l'infrastructure routière . . . .	134
4.7	Fiabilité des marquages routiers sous les deux stratégies de regroupement des actions de maintenance . . . . .	137
4.8	Fiabilité des marquages routiers du cluster 5 sous les deux stratégies de regroupement des actions de maintenance . . . . .	139
4.9	Fiabilité des marquages routiers du cluster 6 sous les deux stratégies de regroupement des actions de maintenance . . . . .	139
4.10	Stratégie de maintenance des sections de chaussée sans tenir compte de la classification . . . . .	140
4.11	Stratégie de remplacement conditionnelle pour le cluster 1 . . . . .	140
4.12	Plan de maintenance individuelle des composants du cluster 1 . . . . .	142
4.13	Plan de regroupement statique pour le cluster 1 . . . . .	142

4.14	Plan de maintenance regroupée et dynamique avec inspections des lignes de marquages tous les 12 mois . . . . .	144
4.15	Profit économique associée à chaque pas d'inspection pour le cluster 1 . .	145

# Liste des tableaux

2.1	Défaillance de l'infrastructure routière et son impact sur le véhicule autonome [73]	23
2.2	Types de défaillance de la chaussée , définitions et évolutions [12]	34
2.3	Types de route du réseau de Texas et leurs caractéristiques [25]	51
2.4	Stratégie de construction de la route simulée	60
3.1	Analyse de durée de vie pour les clusters et pour chaque ligne de marquages	93
3.2	Paramètres de la loi de Weibull associés à chaque cluster	94
3.3	Plan de maintenance individuel pour les sections de la chaussée	97
3.4	Regroupement optimal des lignes de marques par cluster	102
3.5	Fiabilité moyenne des systèmes suivant les 3 stratégies de maintenance	105
3.6	Instants de maintenance simultanée pour chaque groupe pour un regroupement sur 1 cycle	108
3.7	Instants de maintenance simultanée pour chaque groupe pour un regroupement sur 2 cycles	108
3.8	Instants de maintenance simultanée pour chaque groupe du sous-système 2	110
4.1	Vitesse de dégradation de la ligne axiale	135
4.2	Vitesse de dégradation de la bande d'arrêt d'urgence	135
4.3	Vitesse de dégradation de la ligne TPC	136
4.4	Coûts d'inspection des lignes de marquage par cluster	137
4.5	Solution de maintenance du cluster 1 sous un regroupement dynamique	138
4.6	Résultats du processus Gamma appliqué aux clusters de la chaussée	141
4.7	Instants de maintenance simultanée pour chaque groupe pour un regroupement dynamique pour le cluster 1	143
4.8	Profit économique et fiabilité moyenne associés à chaque cluster sous les deux stratégies de regroupement	143
4.9	Nombre d'actions de maintenance pour chaque cluster sous deux stratégies de regroupement sur un horizon de planification de 300 mois	144

# Liste des abréviations

$S$	Système multi-composants
$N$	Nombre de composants du système $S$
$C$	Coût de maintenance
$C_{p(i)}$	Coût de maintenance préventive du composant $i$
$C_{c(i)}$	Coût de maintenance corrective du composant $i$
$S_p$	Coût de la mise en oeuvre préventif
$S_c$	Coût de la mise en oeuvre correctif
$C_{sp(i)}$	Coût d'arrêt planifié du composant $i$
$CT_p$	Coût total d'arrêt planifié lorsque toutes les actions de maintenance sont effectuées à l'instant $t_{G^k}^*$
$CT_s$	Coût planifié lorsque les actions de maintenance sont effectuées séparément
$C_{insp(i)}$	Coût d'inspection du composant $i$
$i^j$	$j^{\text{ème}}$ occurrence de maintenance du composant $i$
$t_{ij}$	L'instant d'exécution de la $j^{\text{ème}}$ occurrence de maintenance du composant $i$
$T_i^*$	Pas de remplacement optimal du composant $i$
HZ	horizon de planification
$T_{Début}$	L'instant de début de l'horizon de planification
$T_{Fin}$	L'instant de fin de l'horizon de planification
$e_i$	Indicateur de l'état du composant $i$
$\phi$	Indicateur de l'état du système
$\pi_i$	Indicateur de l'état critique du composant $i$
$SG$	Structure groupante
$SG^*$	Structure groupante optimale
$M$	Nombre de groupes d'une structure groupante $SG$
$age_i$	l'âge du composant $i$
$G^k$	Le $k^{\text{ème}}$ groupe de maintenance

$N_{pop}$	Nombre d'individus d'une population
$t_{G^k}$	Instant de maintenance regroupée du groupe $G^k$
$U_{G^k}$	Coût de mise en oeuvre du groupe $G^k$
$\Delta H_{G^k}^1$	Coût lié au changement de date de maintenance des composants du groupe $G^k$
$\Delta H_{G^k}^2$	Coût d'arrêt du système dans le cas de maintenance du groupe $G^k$
$PE$	Profit économique associé à un groupe
$PET$	Profit économique associé à une solution groupante $SG$
$PET_D$	Profit économique associé à une solution groupante $SG$ dans le contexte dynamique
$OM$	Ordre de maintenance
$\theta_i$	Indicateur de l'état du système au moment de l'inspection
$MV$	Maximum de vraisemblance
$EM$	Expectation Maximization
$AG$	Algorithme génétique
$CBM$	Conditional Based Maintenance
$CAH$	Classification Ascendante Hiérarchique
$RL$	Niveau de rétroflexion
$PFL$	Pourcentage de fissuration longitudinale

# Remerciements

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse. Ces travaux marquent une période importante dans ma vie.

Merci tout d'abord aux membres du jury d'avoir accepté de juger ces travaux. Je remercie les professeurs Bruno Castanier et Benoit Iung pour la qualité des rapports concernant le manuscrit, la pertinence des questions posées et l'agréable discussion qui a suivi la présentation lors de la soutenance.

Je voudrais remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Laurent Bouillaut, pour ses conseils, son soutien et son aide. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie.

Je remercie également mon encadrant, Dimitri Daucher, pour sa disponibilité et ses conseils. Outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je remercie également mon encadrant, Maxime Redondin, pour tout le temps qu'il a consacré pour la réalisation de ces travaux. Cette thèse est le fruit d'une collaboration de quatre ans avec lui. C'est à ses côtés que j'ai compris ce que rigueur et précision voulaient dire.

Je remercie tout particulièrement mes amis, qui me posaient tout le temps la même question : "C'est quand ta soutenance de thèse?". Une question angoissante et stressante mais qui m'a permis de ne jamais dévier de mon objectif. Merci à Youssra, Lamya, Kaoutar, Hajer, Youness, Maxime, Julia, Abishek, Ilyess et Robin.

Mes derniers remerciements vont bien sûr à ma famille et à mes proches. Merci à mes parents pour leur soutien sans faille tout au long de mes études, ils ont grandement contribué à ma réussite et à arriver là où j'en suis aujourd'hui. Ils étaient toujours à mes côtés malgré la distance. J'espère par ce travail de thèse que je les rends encore plus fière de moi. Leur présence et leurs encouragements sont les piliers de ce que je suis et ce que je fais. Je remercie également mon frère, Abderrahamane pour son soutien et son encouragement. Il a eu la lourde tâche d'assister aux répétitions de la soutenance.

Enfin, je ne pourrais oublier tous les collègues de l'institut VEDECOM. Leurs sincé-  
rités m'ont vraiment touchées. Ils ont contribué à cette réussite et je tiens également à  
leur souhaiter le meilleur.

# Résumé

L'automatisation de la conduite est souvent présentée comme une potentielle solution économique et sociale pour rendre le transport plus efficace, responsable et respectueux de l'environnement. Pour pouvoir accueillir le véhicule autonome sur les infrastructures routières existantes, il faut que celles-ci respectent des critères de qualité bien particuliers pour assurer tout autant la sécurité et la fiabilité de ces systèmes, de leurs usagers ainsi que de leur environnement (humain ou non).

L'effacement des marquages routiers, l'apparition de fissures longitudinales et transversales sont autant de phénomènes incompatibles avec le fonctionnement de ce genre de véhicule. Pour assurer une bonne évolution de la conduite autonome, il faut donc que l'infrastructure routière sur laquelle on souhaite les faire circuler soit maintenue d'une manière efficace et optimale. Le but de ces travaux de thèse est donc de proposer une stratégie de maintenance préventive de l'infrastructure routière en considérant cette dernière comme un ensemble de zones stratégiques de maintenance. L'infrastructure est alors découpée en sections homogènes (c'est-à-dire caractérisées par une même dynamique de dégradation), constituées par plusieurs composants à maintenir. Généralement, on identifie 4 composants : la chaussée et les 3 lignes de marquage (bande d'arrêt d'urgence, lignes axiale et centrale). Pour répondre aux besoins de positionnement, d'adhérence, de cinématique, etc., du véhicule autonome, le niveau de réflexion des marquages et l'état de la chaussée doivent respecter des seuils minimaux. Dans notre étude, l'état d'une section de route est représenté par l'état de ses composants et est considéré en état limite de service si un des composants l'est. L'infrastructure routière peut donc être vue ici comme un système multi-composant en série.

Dans un premier temps, les sections de route sont groupées suivant leur modèle de dégradation. Cette étape identifie donc les zones de stratégies de maintenance. Elle est basée sur une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Chaque cluster est traité individuellement et est considéré comme un sous-système de l'infrastructure routière.

Dans un deuxième temps, un plan de maintenance individuel est proposé pour chaque cluster. Il a pour but de déterminer un pas de remplacement optimal pour chacun en tenant en compte des contraintes de budget et de fiabilité avec une maintenance systématique par rapport à l'âge.

Dans un troisième temps, un plan de regroupement statique des actions de maintenance est proposé. Il a pour but de déterminer des dates de maintenance optimales où plusieurs occurrences de maintenance sont simultanément effectuées. Cette stratégie prend en considération les différentes interactions entre les composants de l'infrastructure routière. Elle a pour avantage aussi d'augmenter le niveau de la fiabilité du système, mais aussi de minimiser le coût alloué à la maintenance préventive.

Finalement, pour tenir compte des différents changements dynamiques qu'un système peut subir durant l'horizon de planification, un plan de regroupement dynamique des actions de maintenance est proposé. Il vient affiner la solution optimale donnée par le regroupement statique en le mettant à jour en fonction des informations obtenues à court terme.

# Abstract

Vehicle automatization is an important economic, social and technologic issue. It is proposed as a solution to make the transport safer, more efficient, more comfortable and more respectful. The autonomous vehicles contain cameras and lidars able to detect road marking, obstacle and other vehicles. They rely on a series of sensors that help the cars understanding the environment in which they are traveling in real time. Thus, the autonomous vehicles must interact with the road infrastructure to drive around without any human interactions in all circumstances and with a high automatization level. The erasure of the road marking, the appearance of longitudinal and transverse cracks are incompatible phenomena with the operation of autonomous vehicles. Those infrastructure failures are responsible for the errors to calculate the distance between objects, vehicles stability and users' comfort. As the automatization level increases, the expectations of the autonomous vehicles opposite the road infrastructure are becoming stronger. So that, to insure a good evolution of this kind of vehicles, the infrastructure and the vehicles must cooperate, each providing a certain level of service. Thus, an efficient infrastructure maintenance should be considered.

To insure a good success of the vehicle automatization, we propose a grouped maintenance strategy that combine the both maintenance strategies (road markings and pavement) . We consider the road section as a multi components system. Each component has its own maintenance strategy. The main aim is to propose an optimal time where maintenance actions can be performed simultaneously.

First, the sections are grouped according to their degradation pattern. This step identifies the strategic maintenance areas. It is based on a Hierarchical Ascending Classification (HAC). Each cluster is treated individually and is considered as a subsystem of the road infrastructure.

Second, an individual maintenance plan is proposed for each cluster. Its purpose is to determine an optimal replacement step for each cluster, taking into account budget and reliability constraints with systematic maintenance according to age.

Third, a static grouping plan of maintenance actions is proposed. It aims to determine optimal maintenance dates where several maintenance occurrences are simultaneously performed. This strategy takes into consideration the different interactions between the

components of the road infrastructure. It also has the advantage of increasing the level of reliability of the system, but also of minimizing the cost allocated to preventive maintenance.

Finally, in order to take into account the different dynamic changes that a system may undergo during the planning horizon, a dynamic grouping plan of maintenance actions is proposed. It refines the optimal solution given by the static grouping by updating it according to the information obtained in the short term.

## Introduction

Aujourd'hui, la France compte environ 1,1 million de km de routes, ce qui en fait un des réseaux les plus longs et les plus denses d'Europe. Les routes sont au cœur de la mobilité quotidienne. Elles assurent 90% des déplacements des personnes et des biens. Ces routes sont gérées principalement par les collectivités territoriales, les départements et les communes [28]. La qualité et la disponibilité des infrastructures routières jouent un rôle très important pour assurer la sécurité et la fiabilité des services de transport.

Pour des raisons pratiques, économiques et écologiques, les besoins humains nous obligent aujourd'hui à optimiser les déplacements. La conduite autonome est donc proposée comme une solution pour faciliter la mobilité routière. La conduite totalement humaine sera probablement peu à peu remplacée par une conduite partagée entre l'humain et le véhicule par l'intermédiaire de systèmes d'aide à la conduite. La conduite automatisée est donc proposée pour améliorer la sécurité routière en éliminant le principal facteur d'accidents : l'erreur humaine.

Le niveau d'autonomie va du niveau 0 (conduite 100% humaine) au niveau 5 (conduite entièrement autonome). Plus le niveau d'automatisation de la conduite est élevé, plus les attentes du véhicule en matière d'infrastructure routière sont élevées également. Pour pouvoir accueillir le véhicule autonome sur l'infrastructure routière existante, il faut que cette dernière coopère avec le véhicule autonome afin de fournir un bon niveau de service. En effet, le véhicule autonome met en jeu des techniques hypersophistiquées. Il repose sur un ensemble de capteurs, caméras, radars et lidars qui leur permettent de se localiser et de percevoir son environnement proche, dans le but de se maintenir dans sa voie de circulation et éviter d'éventuels obstacles sur son chemin. Selon M. Revillourd [135], le véhicule autonome utilise caméras et lidars pour détecter le marquage routier et ainsi l'aider à se positionner et à se repérer dans l'espace.

Que ce soit en urbain, péri ou interurbain, les véhicules autonomes devraient continuer à interagir physiquement avec l'infrastructure et ses équipements. Contrairement au véhicule classique, le véhicule autonome s'appuie presque entièrement sur ses capteurs pour décoder l'environnement dans lequel il circule. L'infrastructure routière existante doit encore se "développer" pour s'adapter à ce nouveau mode de transport. Par exemple,

le véhicule autonome utilise le marquage routier, conçu à l'origine pour être visible par l'œil humain, pour se localiser avec précision sur les voies de circulation. Il est donc indispensable, à chaque instant, d'évaluer la confiance qu'on peut avoir du fonctionnement des capteurs embarqués et la qualité de l'évaluation de l'infrastructure qu'ils fournissent.

De tels enjeux soulèvent la question de savoir s'il est nécessaire de réviser les normes relatives aux équipements routiers et aux systèmes de certification associés. Plus le niveau de l'automatisation du véhicule augmente, plus les attentes vis-à-vis de l'infrastructure routière deviennent importantes.

Certains scénarios peuvent ainsi représenter des situations à risques pour le véhicule autonome. D'après Erlich 2017 [73], pour l'uni d'une chaussée, la présence de fissures longitudinales ou transversales peut avoir des conséquences graves sur la stabilité du véhicule autonome et peut engendrer des erreurs de calcul des distances aux objets. La perte ou l'absence de la signalisation horizontale peut, quant à elle, rendre le véhicule "aveugle" : le véhicule rencontre alors une difficulté pour se positionner dans les voies. Dans ce cas, le véhicule autonome doit revenir à une conduite humaine.

L'infrastructure routière et ses équipements se trouvent donc au cœur des enjeux de déploiement des nouvelles technologies de transport. Si à court terme, c'est au véhicule de s'adapter aux infrastructures actuelles, la route et ses équipements doivent commencer à amorcer leur évolution. Pour assurer un bon fonctionnement du véhicule autonome, un gestionnaire d'infrastructure doit donc être attentif à l'apparition des dégradations de l'infrastructure routière (signalisation horizontale et chaussée). Un autre enjeu s'ajoutant à tout cela est la réduction progressive des budgets d'entretien. Ces deux contraintes pousseront donc les chercheurs à proposer des plans de maintenances de l'infrastructure routière permettant de tenir compte à la fois des exigences de disponibilité et sécurité mais également des contraintes organisationnelles et budgétaires.

Le rapport de Cour des comptes [28] souligne l'absence d'une véritable politique d'entretien de l'infrastructure routière. Il est donc important d'établir une véritable stratégie de maintenance pour l'infrastructure routière. La littérature propose des modèles de dégradation du marquage routier basés sur des modèles de régression. Ces modèles considèrent le niveau de rétroréflexion <sup>1</sup> d'une ligne de marquage comme le critère de décision. Le plan de maintenance des marquages routiers consiste alors à prédire l'instant où la rétroréflexion atteindra une valeur limite et à planifier une action de maintenance. Dans le même contexte, des études ont proposé des plans de maintenance pour la chaussée. Vu leurs structures complexes, les plans de maintenance ne prennent en compte que la couche de roulement. La politique d'entretien des chaussées repose sur : la connaissance de l'état des chaussées, l'étude et la connaissance des phénomènes de dégradation, l'étude de la connaissance des techniques de réparation et de leur coût. Dans la littérature, nombreux sont les travaux qui étudient la maintenance de la chaussée ou du marquage routier. À titre d'exemple, M. Redondin [131] a proposé deux plans de maintenance pour le marquage routier. Un premier plan de maintenance systématique par rapport à l'âge et un

---

1. La rétroréflexion désigne la quantité de lumière renvoyée par un marquage appliquée sur chaussées dans les conditions géométriques de visibilité de nuit [6]. Cette notion sera détaillée dans la deuxième section du chapitre 2.

deuxième plan conditionnel par rapport au niveau de la dégradation. M. Zouch [178] a suggéré un plan de maintenance pour la chaussée en prenant en considération le pourcentage de fissuration présente sur la chaussée basé sur une chaîne de Markov partiellement observable. Les travaux F. Menant (2014) proposent un véhicule traceur évaluant l'uni de la chaussée ainsi qu'une méthode de fusion de données dans l'hypothèse d'une flotte de tels véhicules.

Par ailleurs, pour répondre aux besoins croissants de productivité des industries, des nouvelles approches d'optimisation de la maintenance par regroupement des tâches ont été proposées dès la fin des années 60 [19]. Il s'agissait d'effectuer un choix optimal entre le budget alloué à la maintenance, le type de la maintenance (préventive ou corrective), les composants à maintenir et la fréquence des réalisations. Les productions sont devenues de plus en plus importantes, ce qui a poussé les chercheurs à proposer des plans de maintenance permettant une bonne production. Mais c'est essentiellement durant les 20 dernières années que l'optimisation de la maintenance par regroupement a été réellement conçue par la communauté scientifique. Pour cela, plusieurs approches ont été proposées : stationnaire et dynamique. La politique de regroupement stationnaire considère que les règles de maintenance ne changent pas (restent statiques) durant l'horizon de planification. Cette hypothèse est souvent considérée pour les systèmes dont l'environnement d'évolution est stable et dont l'ensemble des composants conservent leurs caractéristiques de fiabilité. Dans le cas contraire, les applications de regroupement dynamiques seront considérées prenant en compte des informations sur le système fourni par des procédures de monitoring.

La structuration d'un système multi-composant a naturellement un lien fort avec la manière dont les actions de maintenance pouvaient être regroupées. En fonction du système étudié différentes dépendances peuvent exister : économique, stochastique ou structurelle. Généralement, les stratégies de regroupement d'actions de maintenance se basent au moins sur la prise en compte des dépendances économiques entre les composants. Une dépendance économique positive correspond à une situation dans laquelle le coût de maintenance peut diminuer quand plusieurs actions de maintenance sont effectuées simultanément. Dans certains cas, la structure complexe des systèmes peut engendrer des coûts liés à l'arrêt partiel ou complet du système. La structure du système joue un rôle majeur dans la construction de la politique de maintenance. En effet, dans le cas d'un système en série, la défaillance d'un composant entraîne l'arrêt du système. Le temps alloué à sa maintenance présente donc une opportunité pour remplacer ou entretenir les autres composants.

Comme illustré précédemment, les travaux sur la maintenance de l'infrastructure routière ne considèrent généralement que le marquage routier ou la chaussée et ne proposent que très rarement des politiques de maintenance l'ensemble de l'infrastructure routière. Pour cette raison, le but de cette thèse est de proposer un plan de regroupement des actions de maintenance pour l'infrastructure routière en la considérant comme un système multi-composants.

Ce manuscrit comporte 3 chapitres principaux. Le chapitre 2 présente les données

utilisées dans le cadre de ces travaux. En l'absence d'une base de données française "complète" qui regroupe des données d'inspections du marquage routier et de la chaussée, deux sources de données sont prises en compte. Pour le marquage routier, les données de la Route Nationale 4 françaises (RN4) sont utilisées. Elles résument le niveau de rétroreflexion des marquages sur 9 ans. Pour la chaussée, une base de données américaine nommée Long Time Pavement Performance (LTPP) est considérée. Comme son nom l'indique, ce programme suit la performance de la chaussée aux Etats Unis et au Canada depuis 30 ans. Dans ces travaux, il a été choisi de ne considérer que les données du Texas en suivant le niveau de fissuration de ses sections. Ce chapitre propose également une stratégie de traitement des données d'inspection de l'infrastructure routière. Comme l'infrastructure routière est divisée en points de repère kilométriques, il est préférable de déterminer des zones stratégiques de maintenance à l'échelle du réseau. Une zone de maintenance regroupe les points de repère ou les sections de route qui ont tendance à se dégrader de la même façon. De cette manière, une même politique de maintenance est appliquée pour l'ensemble des points de repère de chaque zone. La définition de ces clusters est basée sur une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), technique de classification non supervisée itérative. Elle commence par calculer la dissimilarité entre les objets puis regroupe ceux dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces objets. Cette classification est appliquée à la fin de ce chapitre sur les données préalablement introduites.

Le troisième chapitre propose une stratégie de regroupement statique des actions de maintenance. Il est divisé en 4 sections. La première section résume "l'histoire" des stratégies de regroupement de maintenance. La seconde section propose la modélisation de système à plusieurs composants. Elle introduit notamment les différentes interactions entre les composants d'un système (structurelle, économique et stochastique) ainsi que l'impact que chaque composant peut avoir sur la fonctionnalité du système dans le cas où il tomberait en panne. La section suivante est réservée aux stratégies de regroupement statique, présentant successivement un panorama des méthodes de regroupements présentes dans la littérature, l'identification de l'horizon de planification, l'optimisation de la solution groupante avec un algorithme génétique et les étapes de la stratégie de regroupement statique adaptée dans le cas de l'infrastructure routière. L'application de cette stratégie aux données RN4 et LTPP est ensuite présentée à la dernière section de ce chapitre.

Comme indiqué précédemment, les stratégies de regroupement statique ne prennent pas en considération les changements dynamiques qu'un système peut éventuellement subir durant l'horizon de planification. Pour cette raison, le chapitre 4 de ce manuscrit s'intéresse aux stratégies de regroupement dynamique prenant en considération les changements observés à court terme sur un ou plusieurs composants du système. Pour évaluer l'état des composants, une inspection doit être effectuée régulièrement. Dans nos travaux, le résultat de ces inspections est simulé par un processus Gamma. Ce dernier évalue la variabilité temporelle de la détérioration au cours du temps. En fonction de l'état du système au moment de l'inscription, le plan de regroupement statique initialement proposé est mis à jour. Dans notre cadre applicatif, en fonction des contraintes externes (climat, trafic, ...), un marquage routier, par exemple, peut se dégrader différem-

ment par rapport à la dynamique initialement prévue. Le regroupement dynamique vient donc adapter les dates d'actions de maintenance proposées par le regroupement statique en fonction de la dégradation courante observée. Enfin, des conclusions et perspectives à ces travaux de thèse seront proposées en clôture de ce manuscrit.

## Description de l'infrastructure routière et de sa maintenance

L'infrastructure routière est constituée de l'ensemble des aménagements linéaires permettant d'assurer le déplacement des personnes et des marchandises par le biais de véhicules motorisés à deux degrés de liberté de mouvement [154]. Elle joue donc un rôle clé dans le déplacement de tout véhicule et en particulier du véhicule autonome. Ce dernier est proposé comme une potentielle solution pour rendre le transport plus sûr, plus responsable et économique. Il est en interaction directe avec l'infrastructure routière pour comprendre l'environnement dans lequel il circule. Comme nous le verrons dans ce chapitre, les marquages routiers ont un rôle crucial dans la sécurité routière de ce type de véhicule. Pour cette raison, les véhicules autonomes utilisent les capteurs pour les "lire". Pour évoluer sur l'infrastructure existante, les véhicules autonomes auront bien évidemment besoin d'une chaussée de qualité, mais aussi d'équipements de la route performants (marquage routier, panneaux de signalisation et la couche de roulement) bénéficiant d'une maintenance adaptée et régulière.

Ce chapitre se divise en 5 sections, la première section présente l'interaction et la relation entre le véhicule autonome et l'infrastructure routière. La deuxième section est un descriptif du marquage routier : sa composition, les techniques de poses et les plans de maintenance préventifs présents dans la littérature. La troisième section est une présentation générale de la chaussée. Nous présentons la composition structurelle de la chaussée, les types de dégradation observés sur la couche de roulement de la chaussée ainsi que les plans de maintenance proposés dans la littérature. Nous mettons en relief une stratégie de traitement de données afin d'identifier les zones stratégiques de maintenance dans la section quatre. La dernière section présente les bases de données utilisées dans ces travaux de recherche. Elles sont constituées de l'historique d'inspections de l'infrastructure routière.

## 2.1 Véhicule autonome et infrastructure routière

L'infrastructure routière s'est constamment adaptée aux évolutions des technologies et des usages. Les promesses portées par les nouvelles mobilités ne doivent pas faire oublier que l'infrastructure est la condition de la production du service : elle permet de répondre à un ensemble de besoins, en même temps qu'elle est aussi un outil de régulation des usagers.

Selon une étude MIRE "Impact de la révolution des usagers de la Mobilité sur les Infrastructures Routières et leurs Équipements" réalisée par l'Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM) [30], ces nouveaux véhicules mettent en jeu des technologies hypersophistiquées. Le véhicule autonome repose sur un ensemble de capteurs « proprioceptifs » (accéléromètres, GPS entre autres) et « extéroceptifs » (caméra, radar, lidar entre autres) qui lui permettent de se localiser et de percevoir son environnement proche, de façon à se maintenir dans sa voie de circulation et à éviter d'éventuels obstacles sur sa trajectoire. Dans le cas où les capteurs n'arriveraient pas à analyser et à décoder la route, le système embarqué de cartographie numérique prendra le relais pour compléter les informations manquantes.

Le véhicule autonome développe des services correspondant aux différents niveaux d'autonomie. Ces niveaux sont définis par différents critères établis par des organismes nationaux ou internationaux tels que la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), l'Organisation Internationale des Constructeurs Automobiles (OICA) et Society of Automotive Engineers (SAE). La classification donnée par NHTSA comporte 5 niveaux [20]. Le niveau 1 permet au système d'assister le conducteur dans sa conduite avec un régulateur de vitesse, ABS... sur certaines routes. Par contre le conducteur se charge d'accélérer, freiner, diriger le véhicule, surveiller la route et contrôler le véhicule en cas de problème. Le niveau 2 de l'autonomie permet au véhicule d'accélérer, freiner et diriger le véhicule tandis que le conducteur surveille la route et contrôle de véhicule en cas de problème. Une autonomie de niveau 3 laisse le véhicule gérer l'accélération, le freinage, direction et la surveillance de la route sur certaines routes alors que le conducteur prend le contrôle de la voiture en cas de problème. Le niveau 4 d'autonomie permet au véhicule de gérer tout sur certaines routes (par exemple l'autoroute). Le niveau 5 gère tout, qu'importe le type de route. Pour ces deux derniers niveaux, le conducteur ne fait rien, c'est-à-dire que dans ce cas le véhicule n'a pas besoin de conducteur au volant. Le véhicule doit piloter et décider seul des mouvements de la voiture sur une infrastructure quelconque et dans n'importe quel environnement, pour se déplacer d'un point A à un point B défini préalablement.

En particulier, l'importance de l'infrastructure physique et de son lien avec l'infrastructure numérique a été soulignée par J. Erlich et al [73]. En effet, pour se déplacer en toute sécurité (pour les usagers), les véhicules devront avoir une connaissance précise de l'état de la route sur laquelle ils circulent. Les véhicules autonomes attendent donc de l'infrastructure qu'elle remplisse certaines exigences afin d'optimiser la sécurité. D'une manière générale, l'infrastructure doit être "lisible" par le véhicule.

Caractéristiques de l'infrastructure	Rôle / Influence
Lisibilité du marquage des voies	Guidage du véhicule pour le contrôle latéral
Courbure et dévers de la route	Stabilité du véhicule, prévention des dépassements de courbe
Pente de la route	Évitement des collisions lors d'une manœuvre de dépassement.
Résistance au dérapage routier	Stabilité du véhicule en situation de ligne droite et de virage

TABLE 2.1 – Défaillance de l'infrastructure routière et son impact sur le véhicule autonome [73]

Les véhicules autonomes reposent sur des opérations clés dont le fonctionnement doit être assuré avec un haut niveau de fiabilité. Il s'agit principalement des fonctions de contrôles de trajectoire, mais aussi de la capacité d'anticiper et de gérer des situations routières simples ou complexes dans le respect du code la route [27]. Les principales fonctions sont : le maintien de la trajectoire, la prévention du dépassement des courbes, le contrôle de la distance de passage, l'évitement ou l'atténuation des collisions sur des obstacles mobiles ou statiques (véhicule à l'arrêt, file d'attente dans un embouteillage...), contrôle de vitesse en fonction de la géométrie de la route, de la surface de la route, des conditions météorologiques et des limites de vitesse légales, le dépassement en toute sécurité, le franchissement en toute sécurité des carrefours et ronds-points et la stabilité du véhicule en tout contexte.

J.Erich et al étudient le concept de High Quality of Service Highway HQoSH (l'autoroute à haute qualité de service), et les principales caractéristiques de l'infrastructure (et leurs paramètres) ont été identifiées [73]. Cette étude a illustré les différents défauts des composants de l'infrastructure routière qui peuvent influencer le fonctionnement du véhicule autonome. Parmi ces défauts, on peut identifier la dégradation du marquage des voies, l'état des feux de circulation et la lisibilité des panneaux de signalisation. De plus, les attributs de la route (courbure inclinaison, pente et adhérence), la visibilité géométrique et météorologique, et la détection des singularités (ornières, nids de poule et fissures) sont également pertinents. Toutes ces caractéristiques sont utiles pour la stabilité et le guidage des véhicules.

La table 2.1 illustre le rôle de chaque composant de l'infrastructure routière pour le bon fonctionnement du véhicule autonome. A titre d'exemple, un marquage de qualité (lisible par le véhicule autonome) aide ce dernier à avoir le contrôle de guidage sur le chemin de roulement. Elle met donc en évidence l'importance d'avoir une infrastructure routière "de bonne qualité" [73].

Dans le cas d'une étude menée à l'institut VEDECOM, la figure 2.1 présente un cas

de bonne détection du marquage routier par les caméras du véhicule. La partie supérieure de la figure est l'image "originale" et la partie inférieure est son interprétation par la détection multi-agent. L'image est décomposée par niveau de gris. Les points rouges correspondent à la détection de marquage. Les triangles verts indiquent le sens dans lequel les marquages sont parcourus. Et finalement, les lignes orange modélisent la ligne de marquages [136].

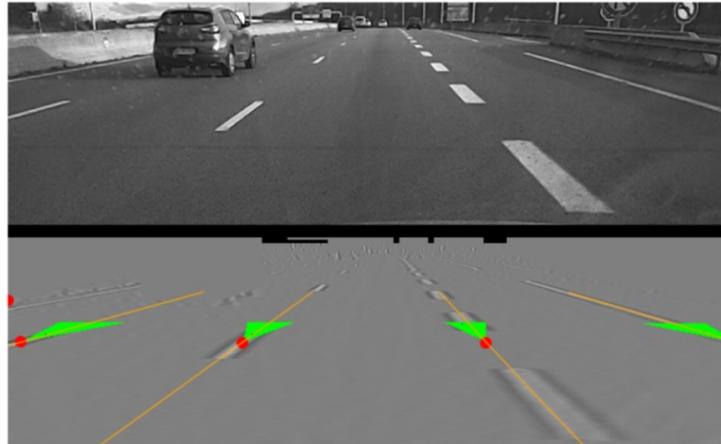


FIGURE 2.1 – Exemple d’une détection d’une ligne de marquage [136]



FIGURE 2.2 – Une détection perturbée à cause d’une infrastructure dégradée [137]

D’après les travaux de thèse de M. Revilloud en 2016 au sein de l’institut VEDECOM [135], la figure 2.2 la ligne de marquage à droite est bien détectée tandis que la ligne à gauche ne l’est pas à cause de la forte dégradation de l’infrastructure routière. La ligne de marquages est comprise à hauteur de 85%. La dégradation des marquages empêche donc 15% de visibilité. Cette image est un bon exemple qui souligne l’importance de la maintenance préventive de l’infrastructure routière pour assurer la sécurité et le bon fonctionnement du véhicule autonome.

Le véhicule autonome est donc en interaction directe avec l’infrastructure routière. Pour pouvoir accueillir ce type de véhicule sur le réseau routier actuel, et avec un niveau

d'automatisation élevé, il faut que les deux coopèrent afin de fournir un bon niveau de service. Dans les prochaines sections, les caractéristiques et les propriétés des composants de l'infrastructure routière sont étudiées dans le but de mieux les comprendre et d'établir une stratégie de maintenance optimisée.

## 2.2 Généralités sur le marquage rétro réfléchissant

### 2.2.1 Présentation du marquage rétro réfléchissant

La qualité d'un marquage routier rétro réfléchissant est principalement basée sur sa visibilité de nuit mesurée avec l'unité de réflexion. Selon la norme NF EN 1436 [?], la rétro réflexion des marquages est reconnue comme une des mesures principales permettant de qualifier la dégradation du marquage routier. Le niveau de rétro réflexion est donc le paramètre d'évaluation de la qualité d'un marquage et son unité de mesure est millicandela par mètre carré et par lux ( $mcd/m^2/lux$ ). Le coefficient de lumière rétro réfléchi (d'une surface de marquage) noté  $RL$  est donc le coefficient de lumière  $L$  de la surface du marquage routier dans la direction d'observation, divisée par l'éclairement  $E$  au niveau de la surface mesuré perpendiculairement à la direction de la lumière incidente. La figure 2.3 présente les conditions retenues par la norme NF EN 1436 pour définir le phénomène de rétro réflexion d'un marquage.

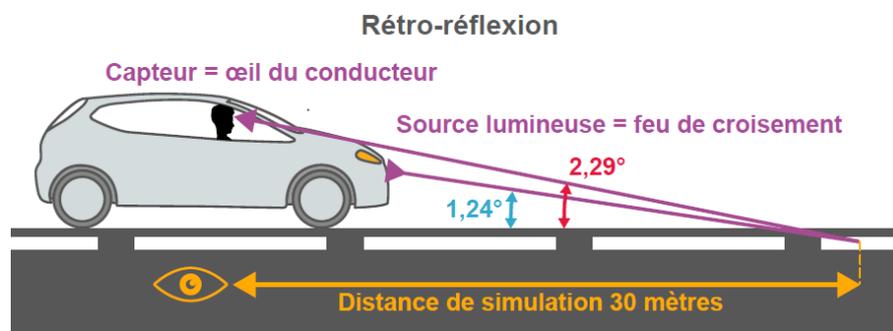


FIGURE 2.3 – Phénomènes de rétro réflexion d'un marquage

Les techniques de pose d'un marquage routier sont très variées et le choix de la méthode à adopter est principalement lié au chantier considéré. Dans ce manuscrit, les techniques standards adaptées aux marquages à base de peinture sont présentées. À noter que les enduits et les bandes préfabriquées disposent de leurs propres machines de pose.

La figure 2.4 présente quatre équipements de pose des lignes de marquage. Pour une application à petit rendement (exemple dans les milieux urbains), les machines poussées comme le Trassar 8 sont adaptés (voir 2.4 (a)). Pour les zones pré-urbaines, le Trassar 131 est le plus adapté dans ce cas (voir 2.4 (b)). Le Trassar 351 représenté par la figure 2.4(c) est la machine utilisée dans les routes nationales et les chantiers linéaires. Les camions applicateurs exemple le Trassar 16 T représenté par la figure 2.4(d) sont réservés pour

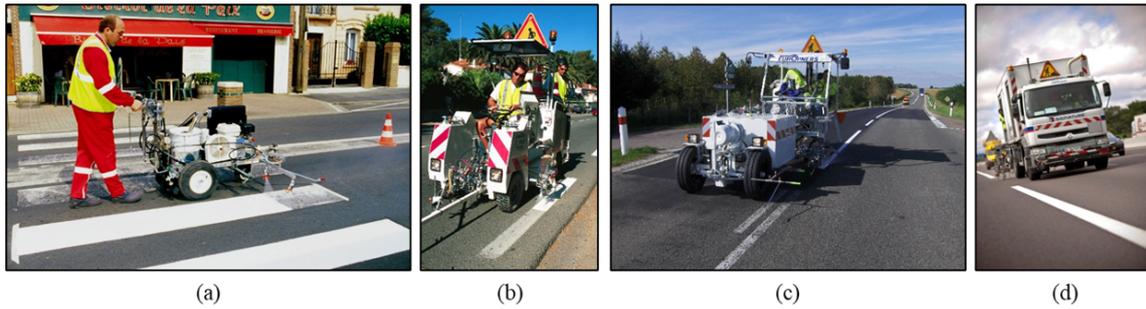


FIGURE 2.4 – Quatre machines de pose : (a) Trassar 8, (b) Trassar 131, (c) Trassar 351, (d) Trassar 16 T ([78])

les chantiers conséquents comme les autoroutes. Dans certains cas particuliers (la pose d'une ligne de stop par exemple), la pose de marquage peut être faite par le biais d'un pulvérisateur de peinture ou manuellement en utilisant une spatule [78].

La pose de marquage rétro réfléchissant commence tout d'abord par l'application d'une première couche de peinture qui est ensuite saupoudrée de microbilles. Une couche antidérapante ou une deuxième couche de microbilles et/ou d'agrégat de verre peut être appliquée dans le but d'augmenter l'adhérence ou la réflexion de la marque, comme illustré sur la figure 2.5. Cette dernière représente une coupe d'un marquage rétro réfléchissant à base de peinture blanche à l'eau. Il est clair que le marquage est directement posé sur la couche de roulement de la chaussée. Les microbilles positionnées sur cette peinture garantissent la propriété d'un marquage rétro réfléchissant. Les techniques de pose, les caractéristiques et la performances des marquages routiers sont propres à chaque type de marquage [133][130].

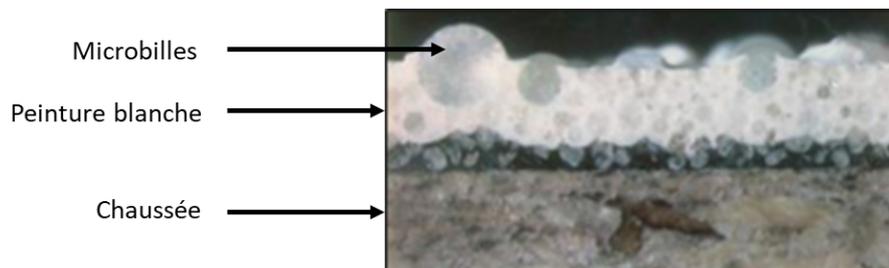


FIGURE 2.5 – Coupe d'un marquage rétro réfléchissant à base de peinture blanche à l'eau [78]

La pose d'un marquage routier peut entraîner la fermeture de la voie de circulation. Le chantier de remplacement de marquage est généralement difficile. Une maintenance préventive du marquage routier est proposée comme une solution pour pouvoir respecter un seuil de réflexion minimum et prévoir à l'avance le chantier.

La visibilité de nuit des marquages est illustrée par la figure 2.6. Un bon niveau de réflexion indique que le marquage est parfaitement blanc et bien visible. Plus le temps passe, plus le marquage devient gris et non lisible. Le niveau de réflexion minimum

à accepter et à garantir pour un marquage routier change selon les normes posées par chaque pays. Certains états américains se réfèrent à un seuil de 100 ( $mcd/m^2/lux$ ) [?]. L'arrêt français du 10 mai 2000 indique qu'un marquage neuf non-temporaire doit assurer un minimum de 150  $mcd/m^2/lux$  à la certification d'un produit de marquage. Le seuil de rétro-réflexion à respecter peut être modifié afin d'optimiser la détection des marquages par le véhicule autonome. Pour cette raison, le seuil minimum à respecter est préalablement fixé à 150  $mcd/m^2/lux$  car c'est le seuil conseillé pour le marquage de sol en France.

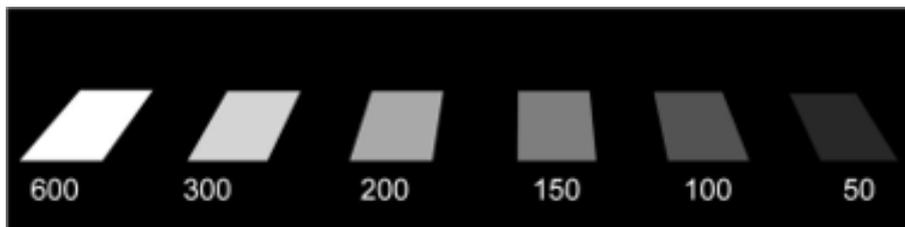


FIGURE 2.6 – Visibilité de nuit en fonction du niveau de rétro-réflexion des marquages [78]

## 2.2.2 Inspection et maintenance du marquage rétro-réfléchissant

Un appareil couramment utilisé en France pour inspecter le marquage routier est l'Ecodyn 3 qui est représenté à gauche de la figure 2.7. C'est un matériel compact qui mesure en continu les coefficients de luminance rétro-réfléchi des marquages routiers ainsi que leurs contrastes de jour et de nuit par rapport à la chaussée en respectant la géométrie de mesure donnée par la norme européenne NFEN1436 [26]. Son utilisation présente un grand avantage en termes de sécurité des opérateurs et des usagers. L'Ecodyn 3 est fixé sur le côté droit ou gauche du véhicule d'inspection (voir figure 2.7). Une source de lumière blanche éclaire le marquage à 6 m à l'avant de l'appareil et la quantité de lumière rétro-réfléchi est mesurée au moyen de cellules photos électriques. L'Ecodyn permet donc de déterminer la visibilité nocturne des produits de marquages. Le marquage routier rétro-réfléchissant est périodiquement inspecté par un rétro-réfléctomètre. Les mesures d'inspection sont alors exploitées afin de définir un modèle de dégradation qui aidera à établir un plan de maintenance préventif adapté. Cette section présente les principaux modèles de dégradation des marques disponible à la littérature.

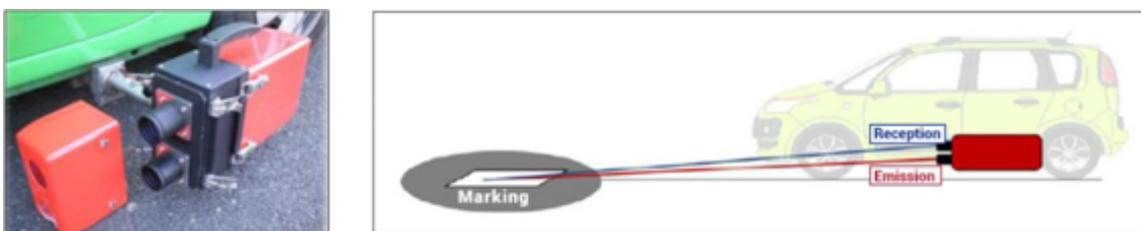


FIGURE 2.7 – Le rétro-réfléctomètre Ecodyn et le processus de mesure [26]

Le marquage routier étant principalement inspecté par un rétro-réfléctomètre, les mesures obtenues lors des inspections sont exploitées pour définir des modèles de dégradation

de ce dernier. La littérature illustre que la modélisation de la dégradation des marquages est généralement donnée par des modèles de régression. Peu nombreuses sont les études qui modélisent cette dégradation avec des modèles de durée de vie. Cette section présente donc les principaux modèles de dégradations des marquages présents dans la littérature.

Depuis des années, les modèles de dégradation réalisés par les méthodes de régression ont pour but de prédire le coefficient de rétro réflexion  $RL$  du marquage routier. Dans la littérature, plusieurs modèles de régression existent, mais ils ont tous un même objectif : analyser la relation d'une variable  $Y$  (variable à prédire) par rapport à une ou plusieurs variable(s)  $X$  (variable explicative) [56]. Ces modèles se basent sur l'hypothèse que  $X$  et  $Y$  ne sont pas indépendantes entre elles et que la connaissance de  $X$  permet de prédire  $Y$ . Il est donc nécessaire de choisir le type de régression à adopter (linéaire, multilinéaire, exponentielle ...) et aussi choisir les variables explicatives à prendre en considération (nombre de passages de roues, quantité de trafic, position du marquage, composition chimique du marquage, ...). Les modèles de dégradation ont pour objectif de prédire l'instant où les marquages franchissent un seuil de rétro réflexion minimal préalablement fixé qui aidera à planifier une opération de remplacement.

Un exemple est donné par N. Hautière et al [89]. Cette étude a pour objectif de modéliser et prédire la dégradation temporelle du marquage routier. Les auteurs ont obtenu un modèle qui semble être mieux ajusté aux données d'entrée. Le modèle est donné par l'équation 2.1 :

$$R_L = R_0 \cdot \exp(a \cdot \ln^2(r + 1) + b \cdot \ln(r + 1) + c) \quad (2.1)$$

Les valeurs  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont les paramètres qui dépendent de nombre de passage de roue, 50 000, 100 000, 500 000 et 1 000 000 de passages de roue,  $r$  le nombre de passages de roue circulant sur le marquage et  $R_0$  la valeur initiale du coefficient de rétro réflexion.

Un autre modèle est proposé par J. Lu [107]. Il propose un modèle de dégradation avec une régression exponentielle en fonction de l'âge des marquages en mois  $t$  (voir l'équation 2.2). Les coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  dépendent du type de marquage posé. Le critère  $R^2$  qui représente d'erreur du modèle varie entre [0.20, 0.90] selon la chimie du marquage.

$$RL = a + b \cdot \exp(c \cdot t) \quad (2.2)$$

Ces modèles de modélisation de la dégradation des marquages routiers ont impulsé 20 années de recherche et de modèle de régression concurrent. A ce jour, les modèles les plus recommandés sont ceux de A. thamizharasan2003methodology et al [151], W. Sitzabee et al [144], H. Lee et al [100] et celui de D. Babic et al [?].

La fiabilité d'un marquage est donnée par le temps de service utile annoncé par le modèle de dégradation. En 2008, S. Sathyanarayanan et al sont les premiers à modéliser la dégradation des marquages avec une analyse de Weibull [?]. Leur étude se base sur une route d'essai de l'Etat de Pennsylvanie remise à neuf et inspectée mensuellement entre juillet 2002 et juillet 2005. L'analyse distingue la couleur, la chimie et la position

des marquages et établit une distribution de Weibull. Les lois de Weibull présentées sont paramétrées en suivant la méthode de maximum de vraisemblance en considérant les censures présentes dans la base de test.

Cette approche a été adoptée par M. Redondin [131] qui a adapté la stratégie proposée par [?] dans le cas de données fortement censurées. Cette méthode résout la problématique avec des alternatives basées sur un algorithme Expectation-Maximization (EM) qui est détaillée dans les prochaines sections.

Les travaux de thèse de M. Redondin proposent deux plans de maintenance pour le marquage routier : une stratégie de remplacement systématique et une autre conditionnelle [131]. Dans ces travaux, trois scénarios de maintenance sont discutés : préventif par rapport à l'âge, préventif par bloc et conditionnel par rapport à la dégradation courante de la signalisation horizontale. Le remplacement préventif et systématique a l'avantage de proposer une stratégie de maintenance passive. Le concept de cette stratégie est de chercher un compromis entre maintenance préventive et corrective tout en minimisant les coûts de maintenance à long terme. Enfin, la stratégie de maintenance conditionnelle par la dégradation courante est basée comme son nom l'indique sur l'état du marquage au moment de la prise de décision.

Dans le cadre du projet CIVITAS Plus financé par l'université de Pérouse, une autre étude est proposée par [38]. Elle vise à développer une méthodologie d'évaluation de la qualité des marquages routiers, à la fois en termes de performance opérationnelle (visibilité et niveau de rétro réflexion) et de maintenance (durabilité et coût). Cette étude se base sur 3 paramètres : la surface de la route, le trafic et les matériaux des marquages. Grâce à l'expérience acquise dans le cadre de ce projet, un nouvel indicateur noté CIS-C et donné par l'équation 2.3. Il est défini dans le but de donner un rapport entre le budget annuel alloué par la municipalité AAB pour l'entretien des marquages et le budget nécessaire pour maintenir efficacement les marquages (ABEM) afin d'assurer un niveau de rétro réflexion minimum de  $100mcd/m^2/lux$ .

$$CIS - C(\%) = \frac{AAB[euros]}{ABEM[euros]} * 100 \quad (2.3)$$

M. Yang et al proposent une étude de reconnaissance et entretien automatiques des marquages routiers à partir de données laser en se basant sur un système MLS (Mobile LiDAR Systems) [172]. Un MLS est un système multi-capteurs qui intègre des scanners laser, un système de navigation et des caméras. Ces systèmes ont déjà été appliqués à l'infrastructure routière et aux corridors routiers environnants pour extraire des informations routières opportunes. Seul le paramètre d'élévation a été utilisé pour extraire les points de route. Huit types différents de marquages routiers ont été extraits à partir des données laser avec la méthode multi-seuil et la méthode de mise en correspondance des modèles avec la valeur de corrélation croisée normalisée (CCN). La valeur CCN de chaque marquage routier a été utilisée comme un indicateur de référence pour identifier le besoin de réparation du marquage routier par rapport à la base de données initiale. Si cette valeur est inférieure à celle de la base de données initiale, le marquage routier doit être réparé. Les résultats de la reconnaissance aident à la reconstruction et l'amélioration

de la base de données des caractéristiques de la route et peuvent être utilisés comme base de données de référence pour les analyses et évaluations futures.

Dans le même thème, M. Soilan et al proposent une méthode de détection et de classification automatique des marquages routiers en se basant sur des données issues d'un système MLS [145]. Ces travaux visent à évaluer l'état de la signalisation routière dans le contexte de Smart Cities. Les résultats de classification sont exportés vers une couche de système d'information géographique (SIG) et sont comparés aux inventaires précédents. Un processus automatique entre la couche  $L_i$  (la longueur de la section à l'étape  $i$ ) et celle précédente  $L_{i-1}$  créera trois scénarios possibles, qui correspondent à des vrais positifs, des faux positifs et des faux négatifs. Pour chaque scénario, un critère de maintenance est donc proposé :

- Vrais positifs : le même marquage est détecté dans  $L_i$  et  $L_{i-1}$ . Aucune action de maintenance ne serait nécessaire, et le marquage est mis à jour automatiquement.
- Faux positifs : un nouveau marquage apparaît dans  $L_i$  qui ne correspond à aucun marquage dans  $L_{i-1}$ . Cela est observé si le marquage a été récemment peint ou s'il s'agit d'un faux positif. Si le marquage est récemment peint, la base de données doit être mise à jour. S'il s'agit d'un faux positif, le marquage sera supprimé de la couche  $L_i$ .
- Faux négatifs : il n'y a pas de chevauchement à  $L_i$  pour un marquage routier dans  $L_{i-1}$ . Cela peut se produire si le marquage a perdu ses propriétés rétroréfléchissantes, ou s'il a été occulté pendant le relevé. Un avertissement est créé pour ce marquage.

De cette façon, la prise de décision dans le processus d'inventaire est simplifiée, et les coûts alloués à la maintenance sont minimisés. Cette méthode assure la mise à jour automatique de la grande majorité des marquages et juste un petit pourcentage nécessitera des décisions manuelles dans le but de faire face aux erreurs de traitement. Ces erreurs peuvent entraîner à la fois des faux positifs et des faux négatifs, aux marquages récemment peints (faux positifs) et aux occlusions pendant l'enquête (faux négatifs).

Actuellement un débat est en cours sur le lien entre la rétroréflexion et la machine vision [74], [40]. Pike et al a étudié la visibilité des marquages routiers par une vision humaine et artificielle [126]. Les résultats de cette étude indiquent que la vision humaine a besoin de niveaux de rétroréflexivité plus élevés que les systèmes de vision artificielle et qu'une norme de mesure du contraste diurne doit être élaborée afin que la visibilité diurne (ou le contraste) puisse être conçue, spécifiée et gérée, ce qui n'est pas sans rappeler les efforts actuels visant à fournir et à maintenir la visibilité nocturne grâce aux niveaux de rétroréflexivité. Ces travaux suggèrent que pour obtenir des taux de confiance élevés en matière de détection des véhicules à moteur, le rapport de contraste des marquages longitudinaux de la chaussée par rapport à la chaussée adjacente doit être adéquat. Dans le même contexte, T. Burghardt et al [54] ont montré que les algorithmes de vision artificielle, qui guident les véhicules autonomes émergents, exigent la même qualité et le même niveau élevé de rétroréflexion des marquages routiers que les conducteurs humains. Par conséquent, le maintien des marquages routiers horizontaux à un niveau élevé est

nécessaire jusqu'à ce que tous les véhicules soient autonomes. Les résultats de l'analyse des travaux de A. Stacy et al ont montré que les scores de qualité de vision industrielle de l'ADAS étaient généralement fiables dans chaque condition individuelle, mais pas dans les différentes conditions de collecte [146]. Une relation acceptable entre les caractéristiques actuelles d'évaluation du marquage et les scores de qualité de la vision artificielle n'a pas pu être établie de manière concluante en utilisant plusieurs approches de régression différentes à la suite de l'analyse de corrélation.

La littérature propose plus des modèles de dégradation du marquage routier, généralement avec des modèles de régression. À partir de 2008, on retrouve des modèles de dégradation se basant sur des lois de Weibull. La seule alternative aux modèles de Weibull est l'approche markovienne proposée par [57]. L'entretien des marquages routiers se fait de manière systématique avec un calendrier de maintenance prédéfini. Les modèles de maintenance conditionnelle nécessitent, quant à eux, un suivi régulier des marquages pour pouvoir établir l'instant optimal de remplacement. Comme les inspections se font une fois par an et sont "coûteuses", une alternative d'inspections des marquages utilisant les capteurs des véhicules autonomes semble pertinente à l'avenir. Cette approche peut affiner le plan de maintenance. Dans ces travaux de thèse, la dégradation de la signalisation horizontale est modélisée par une loi de Weibull comme proposé par M. Redondin [131].

## 2.3 Généralités sur la chaussée

### 2.3.1 Présentation structurelle de la chaussée

L'évaluation de l'état des chaussées repose généralement sur une série de mesures et d'observation visuelles qui permettent d'établir la condition de la structure, de diagnostiquer les causes des dégradations apparentes et de cibler les solutions de réhabilitation les plus appropriées. La figure 2.8 illustre le fait que la chaussée est une superposition de plusieurs couches de différents matériaux déposés sur un sol de support. La couche de forme qui est située en couche inférieure a pour rôle permettre aux engins de circuler pendant les travaux et de rendre le sol de support plus homogène et de le protéger également du gel. La couche d'assise, composée de deux sous-couches : la couche de fondation et la couche de surface, permettent à la chaussée de résister aux charges de trafic. Quant à la couche de liaison qui représente la couche de surface, elle lie la couche d'assise à une couche de roulement. La couche de roulement est appelée aussi la couche d'usure et c'est elle qui est en contact direct avec le trafic et les variations climatiques. Elle assure donc la protection pour les couches inférieures, l'imperméabilisation de la chaussée, l'adhérence des véhicules ainsi que la sécurité et le confort des usagers [148].

Selon le rapport de la première tâche du projet SBaDFoRM (State-Based Decision For Road Maintenance), financé par la Région Pays de la Loire, proposé par T. Lorino en 2008 [148], la couche de roulement doit impérativement respecter des normes de qualité. Pour la sécurité des usagers, elle doit posséder une bonne rugosité qui est la propriété anti-dérapante et qui s'apprécie par la profondeur moyenne de texture et par les coeffi-

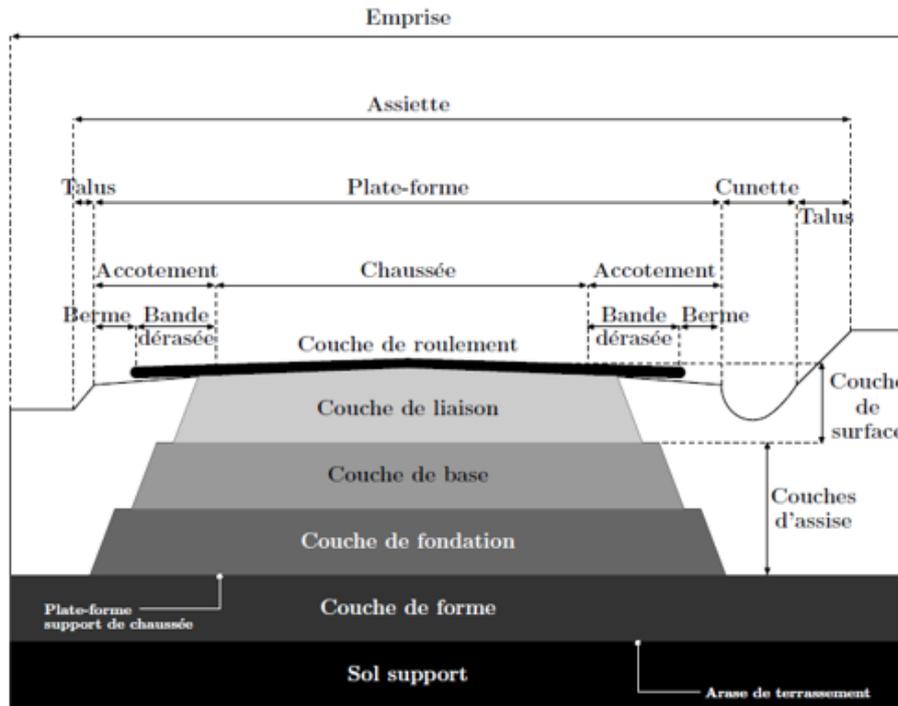


FIGURE 2.8 – Coupe transversale d'une chaussée [148]

cients de frottement longitudinal et transversal. Les travaux de M. Zouch [178] indiquent que pour assurer un bon confort pour les usagers, la couche de roulement doit présenter un bon uni, qui représente la régularité du profil de la chaussée, dans le but d'éviter les secousses brutales, les vibrations excessives ainsi que les bruits. Comme déjà précisée, la couche de roulement est en contact direct avec le trafic et le climat, la composition de cette couche (béton bitumineux, semi-grenu, béton bitumineux souple, béton bitumineux très mince) dépend de type de voie considérée et des types des sollicitations.

La dégradation observée de la chaussée dépend donc de sa composition, et plus précisément de la couche de roulement ainsi que des sollicitations a sujettes.

### 2.3.2 Principales dégradations de la chaussée

La dégradation de la couche de roulement constitue dans la plupart des cas un des indicateurs les plus précoces et les plus sensibles de l'évolution des caractéristiques structurales et de surface des chaussées. Afin que le relevé de dégradations soit efficace, il est obligatoire de bien définir des dégradations et leur niveau de gravité. Selon [29], le revêtement altéré laisse entrer l'eau, modifie l'uni longitudinal impacte la macro-texture et donne une mauvaise image de l'état de la chaussée.

Nombreux sont les types de dégradation de la chaussée. Citons par exemple l'ornièrage à grand rayon, les fissures (longitudinale, transversale, fatigue ...), l'affaissement de rive... (Voir la figure 2.9). La table 2.2 résume quelques types de dégradation de la chaussée, leurs causes et leurs évolutions. Afin d'assurer une bonne fiabilité de la chaussée, une maintenance adaptée pour chaque type de dégradation est donc à considérer. La

section suivante présentera un état de l'art sur la maintenance de la chaussée (couche de roulement).



A – Fissure transversale



B - Fissure par bloc



C – Fissure longitudinale

FIGURE 2.9 – Exemples de fissuration de la chaussée de la base de données [13]

Type de dégradation	Définition	Causes	Evolution
L'ornièrage à grand rayon	Déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est supérieure à 80 cm de large.	Sous-dimensionnement de l'assise /réduction de portance du support dû à un mauvais drainage ou l'action du dégel.	Faiçage dans l'ornière
L'affaissement de rive	Enfoncement prononcé localisé à la partie de la chaussée comprise entre le bord et la bande de roulement de rive.	Sous-dimensionnement de l'assise ou sol support ou épaulement/ drainage défectueux ou retrait hydrique du sol. Dégradation aggravée par la présence d'eau qui reste stockée dans le bas côté.	Faiçage au droit de l'affaissement
L'affaissement hors rive	Enfoncement ponctuel, flache quand l'affaissement a une forme circulaire.	Sous-dimensionnement localisé de l'assise ou du sol support/ présence d'eau provenant des couches supérieures.	Faiçage puis départ de matériaux
Fissure transversale	Fissure sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chaussée, isolée ou périodique d'espacement variable sur tout ou partie de la largeur de chaussée.	Remontée en surface d'une fissure de prise ou de retrait thermique ou remontée d'un joint transversal de mise en oeuvre de l'assise traitée ou joint de reprise d'un tapis d'enrobé.	Ouverture fine au début puis ramification, épaufrure puis faiçage puis départ de matériaux.
Fissure longitudinale	Fissuration sensiblement parallèle à l'axe de la chaussée, apparaissant exclusivement dans une bande de roulement.	Fatigue de la structure par excès de contrainte de la ou des couches traitées. Défauts de constructions (mouvement de sols, retrait sol argileux)	Ouverture fine au début puis ramification, épaufrure puis faiçage puis départ de matériaux.
Fissuration d'adaptation	Fissuration provenant de mouvements de sols : tassements d'épaulements, retrait hydrique, tassement de remblais	Voir la définition	Anarchique (fonction de la localisation sur la chaussée)
Faiçage	Ensemble de fissure entrelacées ou maillées	Fissure de fatigue dédoublées, décollement de la couche de roulement, portance insuffisante.	Ouverture progressive des fissures jusqu'au départ des matériaux.

TABLE 2.2 – Types de défaillance de la chaussée , définitions et évolutions [12]

### 2.3.3 Modélisation de la dégradation de la chaussée

La modélisation et la compréhension du comportement de la chaussée sont déterminantes pour sa durabilité. La modélisation de sa dégradation a fait l'objet de plusieurs travaux. La littérature divise la modélisation de la dégradation de la chaussée en deux grandes familles. La première se base sur le comportement mécanique de ces interfaces lors d'un processus de dégradation et la deuxième englobe des modèles statistiques en se basant sur des retours d'expérience.

#### 2.3.3.1 Modèles mécaniques de la dégradation :

Depuis les années 1960, la technique de la mécanique linéaire de la rupture s'est beaucoup développée. Cette méthode remonte aux travaux de Grattith en 1920 [84]. Elle tend à définir une propriété du matériau qui peut se traduire par sa résistance à la rupture [5]. La rupture est le changement de forme ultime pour les solides. Lorsqu'une fissure se propage, de nouvelles surfaces se créent dans un volume. Il y a deux grands types de rupture [11] :

- la rupture ductile : la propagation de fissure est maîtrisable par le changement extérieur,
- la rupture fragile : la propagation est instable ou soudaine.

L'évolution de la fissure est modélisée par Grattith [84] par le biais de la mécanique linéaire de la rupture en mettant en évidence une grandeur énergétique appelée "Taux de restitution de l'énergie élastique" notée  $G$ . L'analyse de la fissuration et de sa propagation est basée sur un bilan énergétique entre un état initial et un état final. Cette approche ne considère qu'un accroissement de fissure qui nécessite un apport d'énergie lié à la création d'une nouvelle surface. Cette énergie est fournie par la perte d'énergie potentielle du système de corps fissuré. Le bilan énergétique du système pour la propagation de fissure s'écrit :

$$dU_{total} = dW_{ext} - dU_e - dU_d - dU_c - 2\gamma \cdot dA = 0 \quad (2.4)$$

où :

- $U_{total}$  : Énergie totale du système ;
- $W_{ext}$  : Travail des forces extérieures appliquées lors de l'avancée de fissure ;
- $U_e$  : Énergie de déformation élastique emmagasinée dans le système ;
- $U_d$  : Énergie dissipée de façon irréversible ;
- $U_c$  : Énergie cinétique ;
- $\gamma$  : Énergie superficielle de cohésion du matériau ;
- $dA = Bda$  : Surface de fissuration créée par la propagation et  $da$  : longueur d'une lèvres de fissure dans l'épaisseur  $B$ .

La propagation de la fissure se produit alors lorsque l'énergie cinétique du système augmente. La condition de propagation s'écrit :

$$\frac{d(W_{ext} - U_e)}{dA} - 2\gamma = \frac{dU_c}{dA} \geq 0 \quad (2.5)$$

En notant  $\Pi = U_e - W_{ext}$ ,  $\Pi$  représente l'énergie potentielle stockée dans la structure et  $G = -\frac{d\Pi}{dA}$  l'énergie surfacique disponible pour la propagation de fissure. Une fissure se propage donc lorsque la quantité d'énergie disponible en pointe de la fissure atteint une valeur critique décrivant la ténacité du matériau qui caractérise le comportement d'un matériau à la rupture en présence d'une entaille.

En 1957, Williams a classé la propagation de la fissure selon 3 modes. Le mode I correspond à un mode de clavage par ouverture, qui correspond à un écartement relatif entre les lèvres de fissure par ouverture angulaire. Le mode II correspond au cisaillement longitudinal ou au mode de cisaillement plan. Enfin, le mode III concerne le cisaillement longitudinal ou mode de cisaillement plan [93]. Williams a montré que quel que soit le changement et la géométrie du corps, dans la zone de singularité, les travaux proposés par Grattith avec la mécanique linéaire de la rupture, [84], restent vrais et la propagation des fissures s'écrit sous la forme suivante avec  $\alpha =$  correspond au mode I, mode II, mode III. Le couple  $(r, \theta)$  sont les coordonnées polaires d'un point du solide repéré par rapport à la pointe de fissure. Les fonctions  $j_\alpha(r, \theta)$  sont des fonctions bornées lorsque  $r$  tend vers 0 et  $f_{ij}^\alpha(\theta)$  fonction de l'angle  $\theta$ . Les termes  $K_\alpha$  sont appelés facteurs d'intensité de contrainte en mode I, II et III.

$$\sigma(r, \theta) = \frac{K_\alpha}{\sqrt{r}} f_{ij}^\alpha(\theta) + j_\alpha(r, \theta) \quad (2.6)$$

D'autres modèles de dégradation de la chaussée sont basés sur les modèles de zone cohésive. Cette approche s'appuie à la fois sur le concept de la mécanique des milieux continus et sur la mécanique de la rupture [143]. Elle a été initialement développée dans les années 1960 par Dugdale [71] dans le but d'étudier la taille de la zone plastique et la répartition des contraintes en front de fissure. Ces modèles sont proposés comme une amélioration des travaux de Grittih [84] sous l'hypothèse que la taille de la fissure est négligeable devant les dimensions de la structure. Elle a été adoptée ensuite par d'autres chercheurs pour profiter de ses avantages. En effet, cette approche aide à résoudre le problème de singularité des contraintes qui est simple à implémenter dans les codes de calcul par éléments finis ou par éléments discrets [143].

Le modèle proposé par Dugdale décrit l'évolution de la contrainte cohésive normale en fonction du saut de déplacement avec une application pour les matériaux parfaitement fragiles et les matériau élastoplastique parfait. Pour les fissures de mode II, Palmer et Rice proposent un modèle décrivant l'évolution de la contrainte cohésive tangentielle en fonction du saut de déplacement tangentiel [121]. Cette étude est appliquée dans le cas de sols soumis à une compression constante. Un autre modèle de loi bilinéaire pour les fissures de mode I et II est proposé par Hillerborg et al [90] et Alfano et Crisfield [34]. La

loi cohésive bilinéaire décrit l'évolution de la contrainte cohésive en fonction du saut de déplacement pour les modes I et II découplés. Monerie quant à lui a proposé un modèle couplant adhésion et frottement avec dissipation visqueuse [113]. C'est un modèle d'adhésion interfaciale qui représente l'évolution de la contrainte cohésive normale en fonction de saut de déplacement normale avec régularisation des problèmes de sauts.

Certes la modélisation de la dégradation de la chaussée par le biais de modèles de zone cohésive reste une voie intéressante et prometteuse et plus améliorés par rapport à la méthode de la mécanique de rupture mais cette méthode présente certaines limites pour la prédiction et l'identification de la forme et des paramètres matériaux. L'inconvénient majeur de ces modèles est qu'ils peuvent conduire à des "sauts de solution" vu que l'unicité de la solution à un problème de solides cohésifs en évolution quasi statique est conditionnelle.

### 2.3.3.2 Modèles statistiques pour la modélisation de la dégradation de la chaussée

Pour étudier les différentes méthodes statistiques pour modéliser l'évolution de la chaussée appliquée sur des sections de route de test, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussée (LCPC) a proposé [102]. Cette étude a pour objectif de fixer un niveau de service à long terme et de proposer des stratégies d'entretien. Elle met en avant la corrélation entre le dimensionnement d'une chaussée et son comportement ainsi que les caractéristiques géométriques (épaisseur) mécanique (modules). Toutes les chaussées dimensionnées pour la même durée initiale, avec un même risque, connaîtront en théorie la même évolution, même si les caractéristiques du sol, des matériaux, les épaisseurs des couches, les trafics, varient d'une chaussée à l'autre. Ainsi, si les sections dont le comportement est étudié respectent ces règles de dimensionnement, ces différentes variables n'apparaîtront pas comme explicatives du comportement des chaussées, alors qu'on sait qu'elles le conditionnent fortement.

Cette étude s'appuie sur une base de données suivant un programme MTQ (Québec Ministry of Transportation) [3]. Le programme de suivi de sections tests du MTQ, dont sont extraites les données qui sont analysées plus bas, constitue un excellent exemple de cette démarche. Il porte sur environ 400 sections, suivies pendant en moyenne une dizaine d'années. Pour chaque section, des informations détaillées sur sa constitution, les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des différentes couches, l'état et la portance du sol, la nature des accotements, le trafic, ainsi que sur les dégradations sont disponibles. L'étude a proposé 3 méthodes statistiques pour la dégradation de la chaussée.

La première méthode a pour objectif d'analyser la dégradation de la chaussée avec une approche de formulation a priori des lois d'évolution proposée par [102]. Soit  $I$  l'indicateur à modéliser l'évolution et  $I_j(t)$  la valeur de l'indicateur à l'âge  $t$  sur la section de route  $j$ . Le loi d'évolution de cet indicateur sur cette section s'écrit comme donnée par l'équation 2.7 :

$$I_j(t) = I_d + k_j(t) \cdot (I_f - I_d) \quad (2.7)$$

Avec  $I_d$  la valeur initiale de l'indicateur,  $I_f$  la valeur finale et  $k_j(t)$  un coefficient de dégradation variant entre 0 et 1. Les caractéristiques mécaniques sont prises en compte, donc l'examen de l'évolution de la chaussée prend une fonction sigmoïde. D'un point de vue statistique, les études conduites sur la base de sections témoins du MTQ ont aussi montré que cette fonction permettait le meilleur lissage des observations de fissuration de fatigue. La loi sigmoïde répond à l'une ou à l'autre des formulations mathématiques suivantes :

$$k_j(t) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{t_{mj}}\right)^{p_j}} \quad (2.8)$$

$$k_j(t) = 2^{-\left(\frac{t_{mj}}{t}\right)^{p_j}} \quad (2.9)$$

Avec  $p_j$  le paramètre de forme de la courbe,  $t_{mj}$  l'âge auquel le coefficient  $k_j$  atteint la valeur 0.5, il représente la vitesse globale de l'évolution.

Une deuxième approche est présentée avec un ajustement indirect [102]. Comme les inspections donnent plusieurs observations successives d'une section de route. Le principe de cette méthode comprend deux étapes :

- Les sections de route sont considérées successivement et l'équation 2.8 est ajustée sur les observations faites sur cette section, ce qui permet de déterminer les paramètres de cette équation ;
- Les valeurs prises par chacun de ces paramètres sur l'ensemble des sections sont considérées ; ces valeurs sont ajustées sur une fonction de certaines variables traduisant les caractéristiques des sections et des sollicitations qui s'y appliquent.

Une deuxième méthode avec des lois de survie est proposée. L'évolution de l'indicateur  $k$  est caractérisée par la loi inverse :

$$T = k^{-1}(\tau) \quad (2.10)$$

L'âge,  $T(\tau)$ , auquel l'indicateur franchit un seuil donné,  $\tau$ , est assimilé à une variable aléatoire, pour laquelle on pose a priori une loi de probabilité, paramétrée par certains coefficients, loi dont la fonction de répartition  $F_{T_\tau}$  peut être écrite sous la forme :

$$F_{T_\tau}(t) = \mathbf{P}[T_\tau < t] = 1 - S_{T_\tau}(t) \quad (2.11)$$

À partir du Maximum de Vraisemblance  $L_i$  de la section  $i$ , les paramètres de loi posée a priori sont calculés concernant le franchissement d'un seuil donné  $\tau$ . Le dépassement étant non observé, trois cas d'études sont distingués : censure à gauche, par intervalle et à droite. Le maximum de vraisemblance est donc calculé en fonction du type de la censure. Pour améliorer la modélisation, en écrivant que le logarithme de l'âge de franchissement d'un seuil est la somme d'une combinaison de variables explicatives connues et d'un résidu aléatoire. Les équations suivantes illustrent la démarche lorsque l'on ne considère qu'une seule variable explicative,  $V$ .

$$\log(t) = y = V\beta + \epsilon \quad (2.12)$$

$$L = \Pi_{i \in E_G} F_{\epsilon\tau}(y_{i,o} - V\beta) \Pi_{i \in E_I} (F_{\epsilon\tau}(y_{i,+} - V\beta) - F_{\epsilon\tau}(y_{i,-} - V\beta)) \Pi_{i \in E_d} S_{\epsilon\tau}(y_{i,f} - V\beta) \quad (2.13)$$

Cette procédure s'étend sans problème conceptuel au cas de plusieurs variables explicatives. La méthode dite des « lois de survie » permet d'établir le modèle de comportement d'une famille de sections, sans présupposer de la forme de celui-ci. De plus, elle tire parti de toutes les observations contenues dans la base, qu'elles soient faites avant ou après le début du processus d'évolution. Ce sont ses principaux intérêts. En revanche, dans son application, notamment sur les bases comportant peu de sections ou d'observations, cette méthode rencontre quelques difficultés. Ainsi, la courbe de répartition correspondant à un seuil peut croiser, voire être entièrement « à gauche » de celle correspondant à un seuil moins élevé. Cela se traduit, sur les courbes d'évolution, par des retours en arrière sans signification physique.

La troisième et dernière méthode statistique directe est proposée par [102]. Cette méthode considère la valeur prise par un indicateur d'état à un instant donné est une fonction de l'âge de la section et de la valeur des variables explicatives sur cette section. Lorsque l'équation présélectionnée correspond à une courbe sigmoïde, la loi d'évolution pour le coefficient  $k_j(t)$  s'écrit :

$$k_j(t) \frac{\gamma_{o,j} v_{1j}^{\gamma_{1j}} v_{2j}^{\gamma_{2j}} v_{3j}^{\gamma_{3j}} v_{4j}^{\gamma_{4j}}}{t^{p_j}} \quad (2.14)$$

Où  $V_{1j}$ ,  $V_{2j}$ ,  $V_{3j}$  et  $V_{4j}$  sont les variables anticipées par l'expertise pour expliquer l'évolution de  $I_j$ ,  $\gamma$  sont toutes les compositions de 4 parmi N paramètres et  $p_j$  le paramètre responsable de la forme de la courbe. Un lissage non linéaire par la méthode de moindres carrés est donc proposé.

Dans le contexte de la modélisation de la dégradation de la chaussée, une autre étude est menée par I. Marović et al qui ont développé un réseau neurone artificiel (NNA) pour mieux prédire la détérioration du réseau routier afin de proposer un plan de maintenance adapté [109]. La présente méthode consiste à estimer les paramètres suivants :

- L'épaisseur de la couche d'asphalte,
- module d'élasticité,
- épaisseur/contrainte de la couche granulaire non liée,
- les charges sur la zone de contact/stress.

Les données des 560 combinaisons ont été obtenues à partir du logiciel de conception des chaussées Circlay 6.0 et utilisées à des fins de formation, de test et de validation du modèle ANN. Le modèle proposé montre de très bonnes possibilités de prévision (R2 le plus bas = 0,987, R2 le plus élevé = 0,999) et peut donc être utilisé comme outil d'aide à la décision dans la planification des activités d'entretien et constituer un modèle précieux dans le module de base du concept d'aide à la décision proposé pour la gestion des infrastructures routières urbaines.

Dans le même contexte, Q. Dong et N. Huang ont proposé un modèle de survie avec une fonction de risque Weibull pour évaluer l'influence de différents facteurs sur l'initiation de fissures dans les revêtements d'asphalte refaits [69]. Les données utilisées proviennent de la base de données Long Term Pavement Performance (LTPP). Le moment d'initiation de quatre types de fissures, dont la fissure d'alligator (fatigue), la fissure longitudinale sur le passage des roues, la fissure longitudinale non liée au passage des roues et la fissure transversale, a été évalué. Les facteurs analysés comprennent l'épaisseur du revêtement, l'épaisseur totale du revêtement, l'état de service des revêtements avant traitement, le volume du trafic, l'indice de gel, le mélange [si le revêtement bitumineux récupéré (RAP) est utilisé] et si le fraisage est effectué avant le revêtement. Il a été constaté que le niveau de trafic était un facteur significatif pour les quatre types de fissures. Un niveau élevé de trafic a accéléré le début de la fissuration, tandis qu'un revêtement épais a retardé le début de la fissuration, sauf pour les fissures longitudinales du chemin de roulement, qui sont principalement causées par une mauvaise construction. L'épaisseur totale de la chaussée n'a fait que retarder le début de la fissuration longitudinale du passage de roue. L'incorporation de 30 % dans le revêtement a accéléré l'apparition de fissures de fatigue précoces. Cependant, ce n'était pas une cause de fissuration de fatigue grave. Des conditions de gel-dégel sévères ont accéléré l'apparition de fissures longitudinales et transversales non liées au passage des roues ; le fraisage avant le revêtement a retardé l'apparition de ces deux types de fissures.

Le taux de défaillance de faïençage ou fissure de fatigue est inférieur à celui des trois autres types de fissuration ; cependant, il augmente beaucoup plus vite avec le temps, surtout lorsque l'âge du revêtement est supérieur à 10 ans. Le niveau de trafic quant à lui était un facteur d'importance pour les quatre fissures. Un niveau de trafic élevé accélérerait le déclenchement de la fissuration.

Un revêtement épais a effectivement retardé le début de la fissuration, à l'exception de la fissuration longitudinale non liée au passage des roues, qui est principalement causée par une mauvaise construction des joints. Le constructeur de chaussées épaisses a retardé le début de la fissuration longitudinale de la voie des roues, qui est une fissuration de fatigue précoce ou qui est causée par les masses de gel de la couche de base ou de la sous-couche, et n'avait pas d'nuance de fissuration longitudinale hors voie des roues, de fissuration thermique et de fissuration en alligator. L'incorporation de 30 % de RAP dans le revêtement a accéléré l'apparition de fissures longitudinales sur le chemin de roulement, qui sont un type de fissures de fatigue précoce. Cependant, ce n'est pas un facteur qui a causé la fissuration des alligators, qui indique une rupture par fatigue grave. Ainsi, l'incorporation de 30 % de RAP est acceptable, mais il convient de faire preuve de prudence lors de l'application de mélanges à forte teneur en RAP. L'environnement de gel-dégel sévère n'avait pas à influencer d'amorce de deux types de fissures de fatigue, alors qu'il accélérerait l'apparition de fissures longitudinales et transversales non liées au passage des roues. Des mesures devraient être prises pour prévenir de telles fissures thermiques dans les zones de gel sévère.

Une autre stratégie de modélisation de la dégradation de la chaussée est donnée par F. Wang et al [162]. Elle se base sur un processus de chaîne de Markov pour prédire

l'état des chaussées des réseaux sur plusieurs périodes. Les variables de décision sont normalement markoviennes. Cette étude a pour objectif de trouver la meilleure stratégie de maintenance pour un petit réseau de 10 sections sur un horizon de planification de 5 ans. Un modèle de programmation linéaire est construit pour sélectionner un ensemble la solution optimale. L'analyse de sensibilité à la contrainte budgétaire montre que l'objectif de maximisation de l'efficacité totale de la maintenance est positivement lié à l'augmentation du budget. Tandis que l'objectif de minimisation du coût est fondamentalement insensible à l'augmentation du budget.

Pour conclure, plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de modéliser l'évolution de la dégradation de la chaussée. Nous retrouvons, dans la littérature, des modèles de régression linéaire, non-linéaire ou multilinéaire, des méthodes markoviennes ou des modèles d'analyse des durées de survie. En pratique, les modèles statistiques peuvent rencontrer les difficultés suivantes : complexité de l'évolution réelle des chaussées, rareté de certaines informations portant justement sur les variables explicatives de cette évolution, incertitudes diverses qui affectent les observations de site ou leur localisation, plage de variation restreinte de certaines variables, etc. Néanmoins, ces approches sont à l'heure actuelle les plus pertinentes pour comprendre le comportement des chaussées sous une forme permettant d'aider les gestionnaires à mieux entretenir leurs réseaux routiers.

Dans la prochaine section, nous présentons des stratégies de maintenance de la couche de roulement de la chaussée rencontrées dans la littérature.

### **2.3.4 Stratégies de maintenance proposées pour la chaussée**

La maintenance de la chaussée a pour objectif de conserver la performance fonctionnelle de la route dans le temps. Dans ses travaux, B. Castanier [55] a classifié les actions d'entretien de la chaussée en quatre groupes suivant leur efficacité : ponctuels, légers, semi lourds et lourds. Afin de choisir la meilleure stratégie à adopter pour une chaussée donnée, de nombreuses études ont traité ce sujet. Avant toute intervention concernant l'entretien de la chaussée, une inspection de son état est primordiale. Plusieurs techniques sont présentes dans la littérature.

La détection des fissures, la dégradation de la détérioration du revêtement et des autres dégradations de la chaussée font généralement l'objet d'une inspection manuelle ou dans d'autres cas, réalisée par des inspecteurs tiers. Les méthodes automatisées ont l'avantage de profiter des technologies de pointe, elles sont plus objectives, plus sécuritaires et plus rapides que les méthodes manuelles.

Depuis des années, des stratégies d'inspection se basent sur des techniques de Deep Learning. A titre d'exemple, I. Boukerch et al propose une méthode de détection de la dégradation de la chaussée en se basant sur les enregistrements vidéo acquis par un smartphone en synchronisation avec des informations de navigation embarquées pour avoir les positions des problèmes par interprétation automatique de la vidéo [94]. Cette méthode vise à donner une localisation précise de la dégradation en utilisant le smartphone. Cette approche a prouvé une précision de 70% sur l'échantillon de test. L'emploi d'un smart-

phone, qui est un matériel simple, rend l'inspection plus simple, rapide et moins coûteuse.

Un plan de maintenance est proposé par F. Wang et al [162]. Les auteurs suggèrent un système de management de la chaussée pour aider le fabricant à choisir le meilleur programme d'entretien. Selon eux, l'entretien des chaussées est une routine, préventive ou réactive, avec des activités consistant à combler les fissures, à réparer les nids de poule et à utiliser d'autres techniques applicables, telles que l'induction de joints d'étanchéité ou l'utilisation d'un coulis bitumineux. En regroupant des sections de chaussée similaires, le concept de gestion de section pourrait réduire le nombre de sections dans le réseau routier et réduire par conséquent le nombre total des variables de décision dans le modèle d'optimisation, ce qui rend le problème plus simple et plus facile à traiter. Les sections de route sont supposées avoir des scores de condition qui sont normalement distribués suivant une loi  $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ . Pour estimer l'état d'une route dans le futur et formuler un processus de transition d'état de la route, un modèle de transition d'état additif est proposé avec des taux de détérioration constant.

Une section de route est maintenue à l'année  $j$  en fonction de son score de condition  $e_{ij}$ . Un taux de détérioration constant  $\pi_i$  qui est spécifique à la section  $i$  pourrait être déterminé en utilisant l'historique des données. Si le score d'état est initié à  $S_{i0}$  et le score d'état de la route est augmenté de  $e_{ij}$  à l'année  $j$  pour  $j = 1, 2, \dots$ . Pour estimer le score de la route à un instant  $t$  avec ( $t > j$ ), le score de la route  $S_{it}$  peut être calculé à l'aide de la formule suivante [162] :

$$S_{it} = S_{i0}(1 - \pi_i)^t + \sum_{j=1}^t e_{ij}(1 - \pi_i)^{t-j} \quad (2.15)$$

Ce travail a été basé sur les données TxDOT PMIS. Elle contient le score de la route, le taux de détérioration, le coût de maintenance unitaire, le coût unitaire du M&R pour les utilisateurs, l'efficacité du M&R et la durée de vie effective associée à chacun des cinq traitements M&R peuvent être récupérés ou calculés à partir du système de maintenance de la chaussée (Pavement Management System PMS) des bases de données pour chaque section de gestion des routes du réseau. L'horizon de planification est limité à 5 ans. Ce choix est dû au nombre minimal des actions de maintenance [162]. Le problème est modélisé comme un problème linéaire visant à maximiser l'efficacité totale du réseau de M&R à l'horizon de planification et à minimiser la distribution totale du coût du de  $M\&R$  du réseau sous quelques contraintes. Le modèle est appliqué sur 10 sections de route. Les données d'entrée sont :  $\pi_i, S_{i0}, a_i$  et  $d_i$ . La moyenne de la loi normale est calculée par :  $\mu = S_\alpha + Z_\alpha(\sigma)$ . Pour chercher la solution optimale, on utilise le programme GAMS (General Algebraic Modeling System) qui est un environnement logiciel qui permet d'implémenter des modèles économiques nécessaires à l'analyse, l'évaluation et la formulation de politiques publiques.

On peut également citer les travaux de M. Zouch qui ont présenté l'optimisation de la maintenance de la chaussée en utilisant la base de données Images Qualité du Réseau routier National (IQRN) [178]. Ils s'intéressent aux fissures longitudinales qui sont des fissures qui apparaissent parallèlement à l'axe de roulement. Leur apparition a été modélisée par un processus à deux phases. La première phase est non observable où des

micro-fissures de faiblesse apparaissent sur la couche de base à cause de la dilatation et contraction thermique. Cette phase est modélisée comme un processus de comptage de Poisson. La deuxième phase est observable. On constate la remontée des fissures sur la couche de roulement. Cette phase est quant à elle modélisée par un processus de Gamma, un processus de saut non-décroissant. Le seul paramètre mesurable à étudier est la longueur de la fissure. Le paramètre considéré est le pourcentage de fissures longitudinales (PFL) sur une section de route. Vu que le PFL seul n'est pas suffisant, M. Zouch a donc ajouté un autre paramètre qui est le « taux de croisement » (TDC). Ce dernier étant non-observable, il est donné en fonction des dernières observations de PFL suivant deux approches. La première approche définit le TDC comme la moyenne des deux dernières observations du PFL et une deuxième approche partiellement observable où le TDC est modélisé par une loi de probabilité. Pour optimiser l'entretien de la chaussée (la couche de roulement), on a tendance à friser une couche tout en respectant une hauteur maximale. Un espace d'état ou un espace de hauteur est donc défini pour contrôler la hauteur de la chaussée. Lors d'une inspection, l'état de la chaussée est décrit par le niveau du PFL, TCD, sa hauteur et la dernière action de maintenance effectuée. La maintenance de la chaussée est optimisée par un Pavement Management System (PMS). La matrice de décision obtenue en fonction des paramètres décisionnels détermine l'action de maintenance à choisir parmi : ne rien faire, 3 actions imparfaites et une maintenance parfaite. Pour choisir entre deux actions de maintenance possibles, un paramètre  $e_{ij}$  qui représente la différence entre le gain en risque et la détection est proposé.

Une autre étude menée par N. Tabatabaee et al propose une stratégie de maintenance de la chaussée [149]. Cette étude propose un modèle en deux étapes : la classification des sections de routes et la prédiction de l'état de la chaussée. La classification en sous-espaces permet d'étudier les effets de diverses structures et propriétés du mélange sur le comportement de la chaussée. Elle est faite avec un algorithme d'apprentissage automatique, machine à vecteurs de support (Support Vector Machine). Les résultats de la classification sont ensuite utilisés pour aider à la prédiction de la performance et l'état du réseau routier, avec un modèle de réseau neurones récurrents (Reccurent Natural Network (RNN)). Selon la valeur de l'indicateur de performance de la chaussée, une décision pour maintenir la chaussée est prise. Le modèle proposé par [149] reste un outil d'aide à la gestion du réseau routier.

En conclusion, pour optimiser la gestion de l'entretien des chaussées, il faut prendre en considération des modèles permettant de prédire l'évolution de la dégradation du réseau routier. L'analyse des données de retour d'expérience de la chaussée soumises à des conditions normales d'usage peut aboutir à des modèles exploitables. L'étude d'un modèle statistique permet aussi de comprendre les différentes corrélations entre les facteurs de dégradation.

## 2.4 Algorithmes d'identification de zones stratégiques de maintenance

Les données représentant l'historique de dégradation de l'infrastructure routière (le marquage routier et la chaussée) sont essentiellement issues des inspections périodiques. Dans la plupart des cas, elles présentent des censures (à droite, par intervalle ou à gauche). Dans cette section un formalisme de traitement de données est proposé afin d'identifier les zones stratégiques de maintenance : chaque zone regroupe les sections de route qui ont tendance à se dégrader de la même façon. Ce formalisme se base sur une première étape de classification des sections de route puis une deuxième phase de correction des données censurées.

Dans ses travaux, M. Redondin a proposé une classification des lignes de marquages en fonction de leur modèle de dégradation [133]. Cette approche localise les zones stratégiques de maintenance en se basant sur les inspections passées. Cette méthode est adoptée pour ce manuscrit.

La classification ascendante hiérarchique est définie comme un procédé qui consiste à grouper les observations individuelles en clusters (groupes ou classes) par agrégation successive jusqu'à ce que toutes les observations fassent partie de la même classe [61]. Pour cet algorithme, le calcul de la distance entre les clusters se fait par récurrence à partir de la matrice des distances entre observations.

Cette méthode de classification est itérative et s'appuie sur un principe de base qui est assez simple :

- Etape 1 : Calcul de dissimilarité entre les individus.
- Etape 2 : Les deux individus dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné sont regroupés et de cette manière une classe est créée.
- Etape 3 : la dissimilarité entre cette classe et les autres individus en utilisant le critère d'agrégation est calculée.

Les étapes du processus de regroupement sont donc répétées jusqu'à l'obtention d'une seule classe. Le résultat de cet algorithme est présenté sous forme d'un arbre binaire de classification nommé dendrogramme comme illustré par la figure 2.10. C'est un arbre présente une hiérarchie de partitions. Cet outil visuel qui montre les liaisons entre les classes et la hauteur des branches nous indique leur niveau de proximité. Les clusters ou les classes sont déterminées en tronquant l'arbre à un niveau donné qui dépend soit des contraintes données par l'utilisateur soit par des critères plus objectifs.

Le choix de la mesure de distance entre les individus dépend des données étudiées et des objectifs. La littérature nous donne un large choix de distance [1] :

- Distance euclidienne : le type de distance le plus utilisé. Il s'agit de la distance géométrique dans l'espace géométrique dans un espace multidimensionnel. Dans ce cas

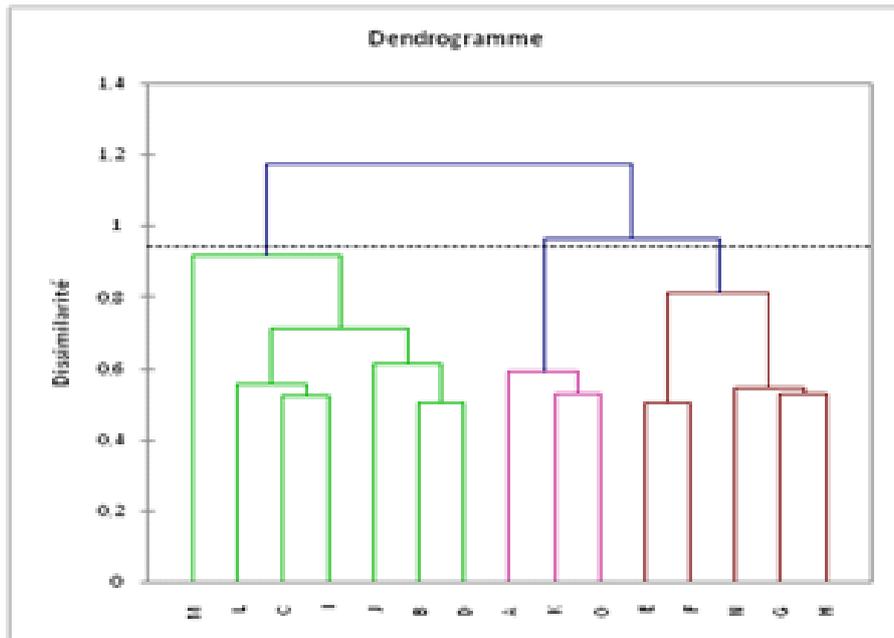


FIGURE 2.10 – Exemple pédagogique de dendrogramme

la distance entre l'individu  $x$  et  $y$  est calculée par :

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2} \quad (2.16)$$

- Distance euclidienne au carré : cette mesure permet de "sur-pondérer" les objet atypiques en élevant la distance euclidienne au carré. Dans ce cas la distance entre un individu  $x$  et un autre  $y$  est calculée par :

$$d(x, y) = \sum_i (x_i - y_i)^2 \quad (2.17)$$

- Distance du City-block : cette distance est simplement la somme des différences entre les dimensions. Dans ce cas la distance entre un individu  $x$  et un autre  $y$  est calculée par :

$$d(x, y) = \sum_i |x_i - y_i| \quad (2.18)$$

- Distance de Ward : cette méthode agrège à chaque itération les classes ou les individus dont l'agrégation fait perdre le moins d'inertie interclasse qui représente l'inertie des centres de gravité des classes et mesure donc leur séparation.

$$d_W(X, Y) = \frac{d(x, y)}{\frac{1}{n_X} + \frac{1}{n_Y}} \quad (2.19)$$

Avec la méthode de Ward, on agrège à chaque itération les classes dont l'agrégation fait perdre le moins d'inertie interclasse il s'agit donc d'une optimisation pas à pas, qui ne dépend pas d'un choix initial arbitraire. Dans ces travaux, la distance de Ward est considérée parce qu'elle permet de minimiser le plus la perte d'inertie interclasse et nous

donne une bonne partition des individus.

La stratégie de classification présentée dans cette section sera appliquée sur les données de l'infrastructure routière (la chaussée et la signalisation horizontale) dans le but d'identifier les zones stratégiques de maintenance. Cette approche aide le gestionnaire de l'infrastructure routière à mieux comprendre son réseau.

## 2.5 Etude de cas : Infrastructure routière

### 2.5.1 Données relatives aux marquages routiers : la Route Nationale 4

La route nationale 4, ou RN 4, est une route nationale française reliant Paris à Strasbourg via Nancy, permettant ainsi d'aller de l'Île-de-France à la frontière franco-allemande [24].



FIGURE 2.11 – Localisation de la RN4 dans le département de la Marne

Actuellement, cette route est co-maintenue par la Direction Interdépartementale des Routes Île-de-France (entre Paris et Courgivaux) et la Direction Interdépartementale des Routes Est (DIR Est). La figure 2.11 illustre la géolocalisation de la RN4 dans le département de la Marne. Elle est d'une longueur de 430 km. Dans ce rapport, l'étude se restreint à la section de route entre Courgivaux et Vaucleurs comme illustrée sur la figure 2.11 qui est d'une longueur d'environ 100 km.

Depuis 2007, ce tronçon de route est supposé être inspecté annuellement en septembre en collaboration avec le CEREMA Est. Chaque mesure est localisée par un Point de Repère (PR) qui est inspecté par un rétro-réfectomètre Ecodyn 1 [10].

### 2.5.2 Données relatives à la chaussée : Long Term Pavement Performance (LTPP)

Le programme de recherche Long Term Pavement Performance (LTPP), est soutenu par le Federal Highway Administration (FHWA), agence du département des Transports des Etats-Unis responsable des autoroutes depuis 1989 . D'après le guide d'utilisation du programme [14], LTPP a été créé pour recueillir des données sur la performance des

chaussées dans le cadre de l'un des principaux domaines de recherche du Programme stratégique de recherche routière (SHRP). Les cinq premières années du programme LTPP ont été réalisées sous le financement et la direction du SHRP. Depuis 1991, la FHWA a continué à gérer et à financer le programme qui est géré par l'équipe chargée du rendement à long terme des chaussées (HRDI-30) au sein de l'Office of Infrastructure Research and Development.

Le programme LTPP est un riche projet de recherche qui comprend deux classes fondamentales d'études et plusieurs études plus restreintes visant à examiner des détails spécifiques liés à la chaussée qui sont critiques et qui décrivent la performance de la chaussée. Les classes d'études fondamentales sont General Pavement Study (GPS) (étude générale des chaussées) et Specific Pavement Studies (SPS) (spécifique des chaussées).

- Etude générale des chaussées (GPS) : ce programme est une série d'études sur les chaussées en service sélectionnées, structurées pour développer une base de données nationale complète sur la performance des chaussées. Ces études sont limitées aux chaussées qui incorporent des matériaux et des conceptions représentant de bonnes pratiques d'ingénierie et qui ont une importance stratégique future. En raison de l'orientation nationale du programme, les études sont limitées aux structures de chaussées couramment utilisées aux Etats-Unis.
- Etude spécifique de chaussées (SPS) : Ce programme est une étude de sections de chaussées spécialement construites, entretenues ou réhabilitées, intégrant un ensemble contrôlé de caractéristiques de conception et de construction expérimentales. Ce programme comprend dix études regroupées dans six catégories (Facteurs structurels de la chaussée, maintenance de la chaussée, réhabilitation de la chaussée, effets de l'environnement, spécifications du mélange d'agrégats d'asphalte et section avec enrobé chaud).

Les deux études GPS et SPS combinées comprennent plus de 2500 sections d'essai situées sur les routes en service dans toute l'Amérique du Nord (USA et Canada). Le programme LTPP surveille et recueille des données sur la performance des chaussées regroupée selon sept modules :

- Inventaire
- Maintenance
- Surveillance (déflexion, détresse et profil)
- Réhabilitation
- Essais de matériaux
- Trafic
- Climat

Le système de gestion de l'information du LTPP Information Management System (IMS) est la base de données centrale où sont stockées toutes les données recueillies dans le cadre du programme LTPP. L'IMS a été créé en 1988. Cette base de données est continuellement enrichie au fur et à mesure que de nouvelles données sont collectées et

traitées. Quatre bureaux régionaux ont été créés dans le cadre du programme afin de coordonner et de communiquer les activités liées à LTPP à travers les Etats-Unis et le Canada.

Depuis 1995, plusieurs études spécifiques de la FHWA ont été réalisées pour évaluer l'impact des différents traitements de maintenance ou de réhabilitation en utilisant la base de données LTPP. Plusieurs études scientifiques ont utilisé des analyses de régression linéaire simple, analyse de survie pour examiner l'amélioration de la performance de la chaussée apportée par les traitements d'entretien... À titre d'illustration, Q. Dong et B. Huang proposent un modèle de survie avec une fonction de risque de Weibull pour évaluer l'influence de différents facteurs (l'épaisseur du revêtement, l'épaisseur totale de la chaussée, l'état de service de la chaussée avant le traitement, le volume de trafic, l'indice de gel, l'exécution ou non d'un fraisage avant le revêtement) sur l'initiation des fissures dans les revêtements bitumineux resurfacés d'asphalte [69]. Cette étude a été appliquée à plusieurs types de fissures (Longitudinales, transversales et par bloque) et il a été démontré que le niveau de trafic était un facteur significatif pour tous les types de fissures. Par contre l'impact de chaque facteur sur l'initialisation de fissure varie selon le type de la fissure. Une autre étude proposée par S. Dong et al vise à extraire des règles d'association multiples pour la fissuration thermique dans les zones de gel saisonnier [70]. Des données pertinentes sur la fissuration thermique comprenant 36 facteurs d'influence potentiels, ont été collectées à partir de 339 échantillons provenant de 46 sections de la base de données LTPP dans 6 états américains et 3 provinces canadiennes. Cette étude a démontré une forte association entre les facteurs d'influence clé et l'indicateur de développement des fissures.

D'autre part, Y. Wang et al ont présenté une analyse des modèles de développement de la fissuration par fatigue montrés dans les sections d'essai des chaussées souples de la base de données LTPP [166]. Dans le but de caractériser ce type de données de fissure, une analyse de survie a été réalisée pour étudier la corrélation entre le temps d'apparition de la fissure de la fatigue et les différents facteurs d'influence. Cette étude a conclu que la définition d'un seuil de défaillance par fatigue est préférable à l'utilisation des zones de fissures pour l'analyse de régression. Les enquêtes de détresse non-continues créent un problème de censure, qui peut être résolu par une analyse de survie.

Dans mes travaux, le pourcentage de fissuration de la chaussée (calculé par la base de données LTPP) est considéré. La fissuration de la chaussée est classée, selon LTPP, en 5 principaux groupes :

- Fissures de fatigue : elles se produisent dans des zones soumises à des charges de circulation répétées (chemins de roues). Elles peuvent être considérées comme une série de fissures interconnectées dans les premiers stades de développement. Elles se développent en morceaux à angles vifs et à plusieurs côtés, généralement de moins de 0.3 m sur le côté le plus long, avec un motif caractéristique de grillage, phénomène de faïençage, dans les stades ultérieurs.
- Fissures par bloc : Un motif de fissures qui divise la chaussée en morceaux approximativement rectangulaires. La taille des blocs rectangulaires varie d'environ

0.1 m<sup>2</sup> à 10 m<sup>2</sup>.

- Fissures dans les bords : elles s'appliquent uniquement aux chaussées dont les accotements ne sont pas pavés. Généralement elles se présentent en forme de croissant ou de fissures assez continues qui coupent le bord de la chaussée et sont situées à moins de 0.6 m du bord de la chaussée, à proximité de l'accotement.
- Fissures longitudinales : Fissures essentiellement parallèles à la ligne médiane de la chaussée. L'emplacement dans la voie de circulation (cheminement des roues par rapport au cheminement des autres roues) est significatif.
- Fissures transversales : elles sont principalement perpendiculaires à la ligne médiane de la chaussée.

Les travaux de maintenance s'intéressent généralement aux fissures longitudinales car elles sont causées par le trafic. Un objectif de la base LTPP est la numérisation des rapports d'inspection réalisés par les agents de maintenance. La mesure de dégradation standard est le pourcentage de fissuration d'une section de route dont le modèle standard est explicité par la figure 2.12. Pour une chaussée de type 2×1 voie de longueur 0.1 mile (160.9m) et de largeur 12 pieds (3.6 m), la surface totale est 6336 pieds<sup>2</sup> (588 m<sup>2</sup>). Sur cet exemple, les fissures de fatigue occupent 200 pieds de longueur sur le chemin de roulement et 125 pieds (38 m<sup>2</sup>) en dehors du chemin de roulement. La largeur du chemin de roulement est estimée à 39 pouces (1 m) pour chaque côté.

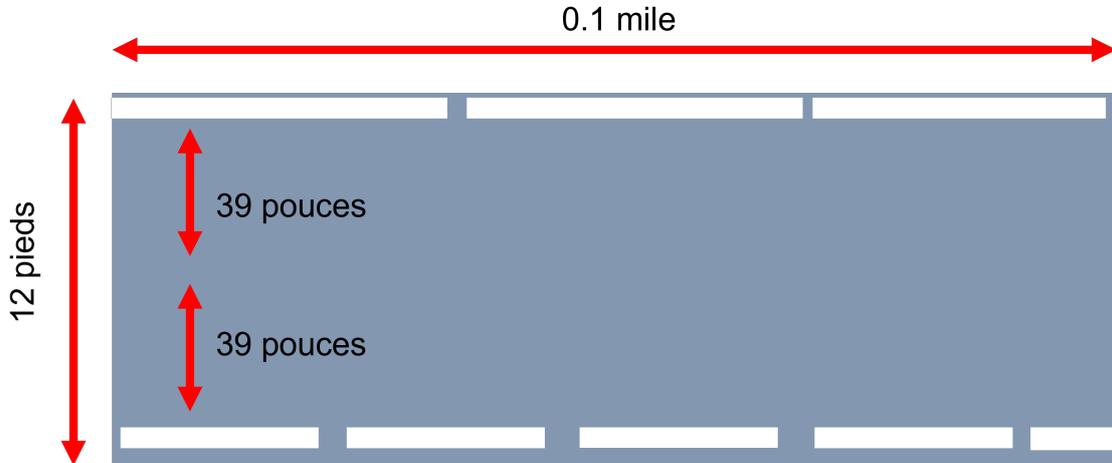


FIGURE 2.12 – Modèle numérisé de calcul de pourcentage de fissuration

La longueur de la fissuration est donc 325 pieds (99 m). Sur le chemin de roulement, la fissuration est d'une longueur de  $325 * \frac{39}{12} = 1056.25$  pieds<sup>2</sup> (98m<sup>2</sup>). Le pourcentage de fissuration présent sur cette section de route est donc (sur le chemin de roulement) est  $\frac{1056.25}{6336} \approx 17\%$ .

Dans mes travaux, l'étude de fissuration de la chaussée est limitée à celles longitudinales et par fatigue. Ce sont les deux types de fissures les plus observées sur les routes

de la base LTPP. Une première analyse de la base de données a montré que l'état du Texas est celui qui comporte le plus de données. Ces sections de route sont inspectées périodiquement tous les 2 ans. La figure 2.13 présente la localisation des sections de test sur la carte du Texas. Les points en vert présentent les sections qui sont actuellement en surveillance. Tandis que les bleus présentent celles qui sont sorties du programme.

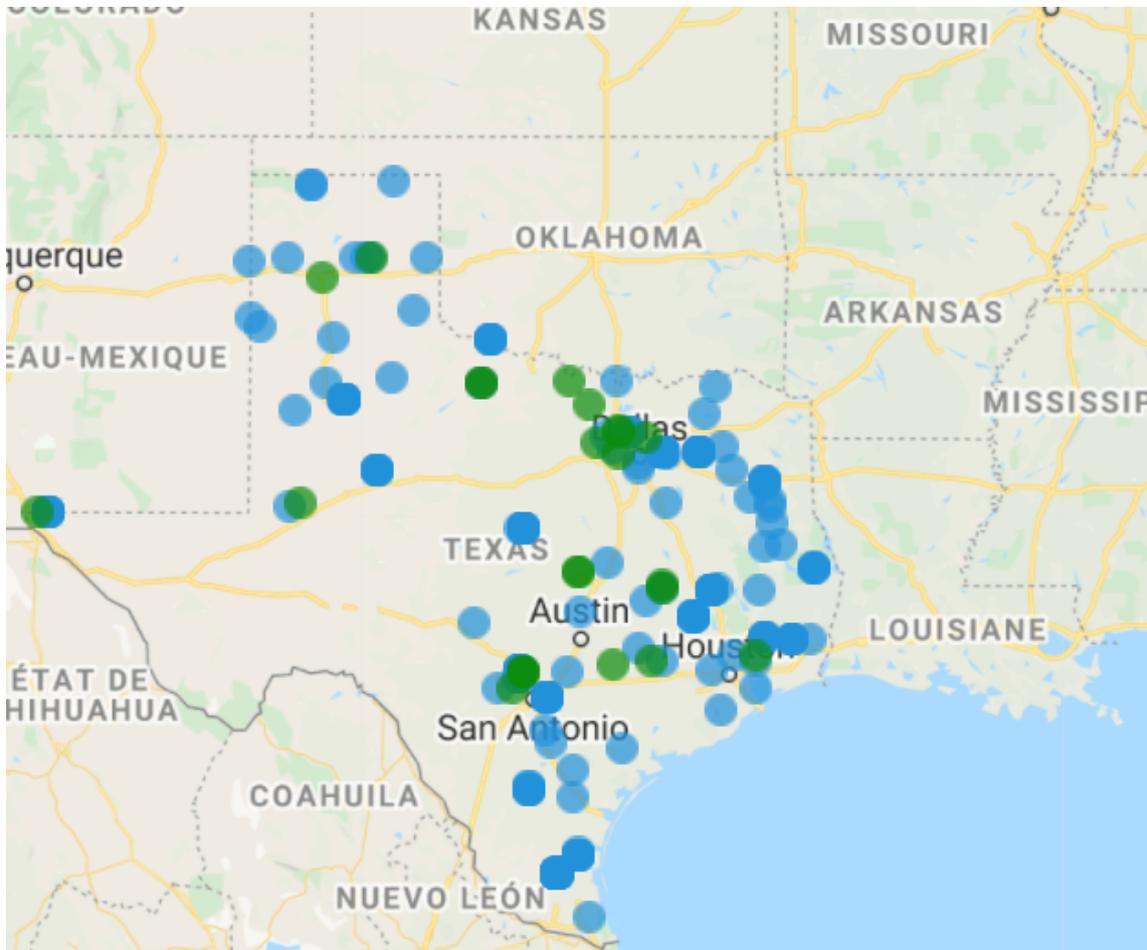


FIGURE 2.13 – Présentation des sections de routes du Texas sur la carte donnée par LTPP [25]

Le réseau routier du Texas se divise en : réseau rural d'artères principales (Rural principal arterial), réseau secondaire français (Rural minor collector), réseau secondaire (Rural major collector), réseau urbain principal et réseau urbain secondaire.

La tableau 2.3 résume les types de routes présentes au Texas ainsi que leurs caractéristiques selon la définition donnée par la base de données LTPP [25]. Sur la base de données utilisée pour ces travaux, 63% des routes appartiennent au milieu rural et 37% au milieu urbain. Les voies des sections de routes du Texas sont de type 2x2 comme pour ceux de la route française RN4 prise en considération pour ces travaux.

Dans la prochaine section, l'application du processus de traitement de l'historique d'inspection du marquage routier et de la chaussée est présentée.

Type de la route	Caractéristiques
Réseau rural d'artères principales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Route à forte densité de trafic inter et intra-états.</li> <li>- Routes qui desservent des zones urbanisées et une grande majorité de petites zones urbaines.</li> <li>- Elle fournit un réseau qui intégré sans raccordements secondaires, sauf lorsque des conditions géographiques ou de circulation inhabituelles l'exigent.</li> </ul>
Réseau secondaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elles servent généralement à des déplacements d'une importance plus grande à l'intérieur d'un comté qu'à l'échelle d'un état.</li> <li>- Elles assurent la desserte de tout siège de comté non situé sur une artère, des grandes villes non directement desservies par les écoles consolidées, points d'expédition, etc.</li> <li>- Relier les lieux mentionnés ci-dessus avec des villes plus importantes situées à proximité, ou avec des itinéraires de classification supérieure.</li> </ul>
Réseau secondaire mineur rurale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Assurer la desserte des autres petites collectivités.</li> <li>- Relier les générateurs de trafic importants au niveau local à leurs zones rurales.</li> <li>- Etre espacée pour collecter le trafic des routes locales et amener toutes les zones développées à une distance raisonnable d'une route collectrice.</li> </ul>
Réseau urbain principal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desservir les principaux centres d'activité d'une zone métropolitaine, les couloirs où le trafic est plus élevé et les corridors les plus fréquentés.</li> <li>- Transporter une forte population sur un kilométrage minimal.</li> <li>- Transporter la majeure partie des déplacements entrant et sortant de la zone urbaine, ainsi que la majorité des déplacements de transit souhaitant contourner la ville centrale.</li> </ul>
Réseau urbain secondaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- S'interconnecter avec le réseau urbain principal.</li> <li>- Desservir les déplacements de longueur modérée avec une mobilité un peu plus faible que le réseau urbain principale.</li> <li>- L'espacement des rues artérielles mineurs ne devrait pas dépasser 1,6 km(1 mile) dans les zones entièrement développées.</li> </ul>

TABLE 2.3 – Types de route du réseau de Texas et leurs caractéristiques [25]

## 2.5.3 Application d'algorithmes de classification sur les données de l'infrastructure

### 2.5.3.1 Identification de zones stratégiques de maintenance pour la Route Nationale 4

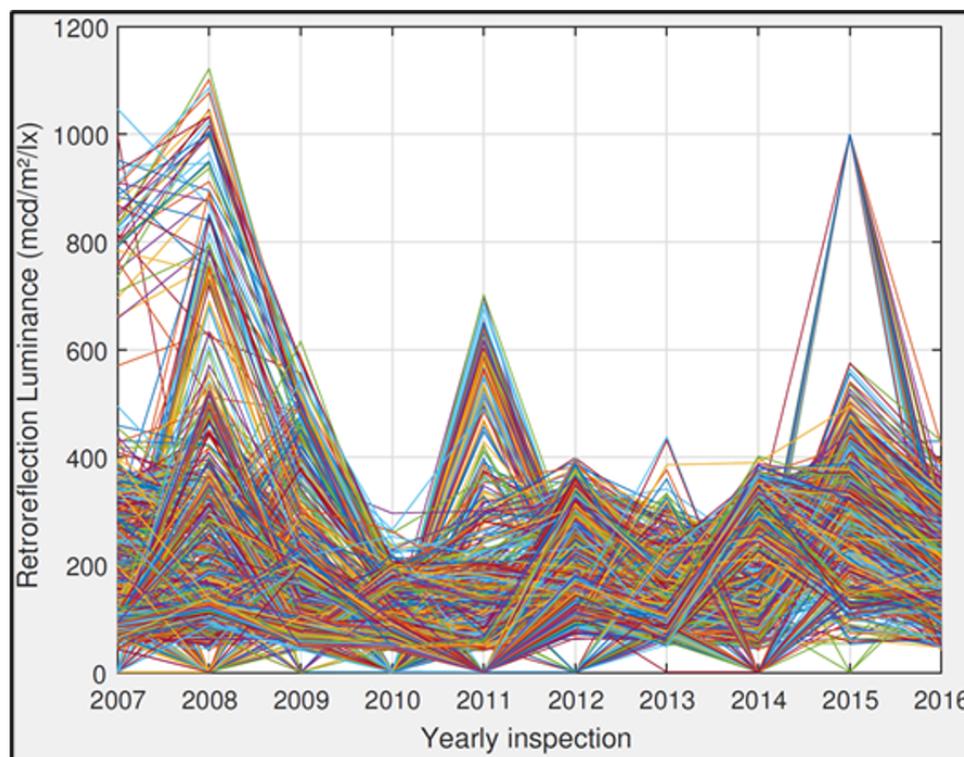


FIGURE 2.14 – Niveau de rétro réflexion observée des marquages de la RN4

Dans cette première sous-section, l'application de l'algorithme *EM*, proposé par M. Redondin, sur les données d'inspections est illustrée. La figure 2.14 présente le niveau de rétro réflexion de la ligne axiale de la route nationale 4. Chaque courbe correspond à un niveau de rétro réflexion moyen sur 100m localisé par un point de repère. A partir ce graphique, des observations sont réalisées : le niveau de rétro réflexion atteint un niveau maximal (entre 800 et 1100  $mcd/m^2/lux$ ) en 2008. Une campagne de maintenance semble donc avoir été réalisée en mars 2008. En 2011 un groupe de marquage est maintenu et leurs niveaux de rétro réflexion varient entre 600 et 700  $md/m^2/lux$ . Enfin, une maintenance est observée aussi en 2015 (le niveau de rétro réflexion atteint 1000  $mcd/m^2/lux$ ). D'autres points de repère admettant un niveau de rétro réflexion très faible ( $< 150 mcd/m^2/lux$ ) sont observés chaque année [131].

La stratégie de classification sur les points de repère de la ligne axiale est appliquée afin d'identifier des zones stratégiques de maintenance. Le résultat de la classification est donné par le dendrogramme présenté par la figure 2.15. Chaque embranchement depuis la base représente un cluster dont la hauteur hiérarchique correspond à la distance de Ward entre les profils moyens de chaque cluster. Le critère d'arrêt pour identifier le nombre de

clusters est la coupe du dendrogramme. Une coupe à 9 clusters est retenue [153].

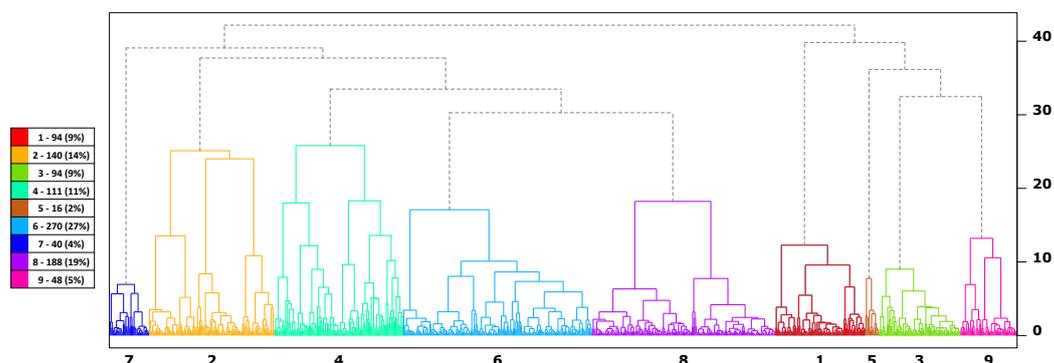


FIGURE 2.15 – Dendrogramme associé à la segmentation en 9 clusters du suivi de la ligne axiale de la RN4

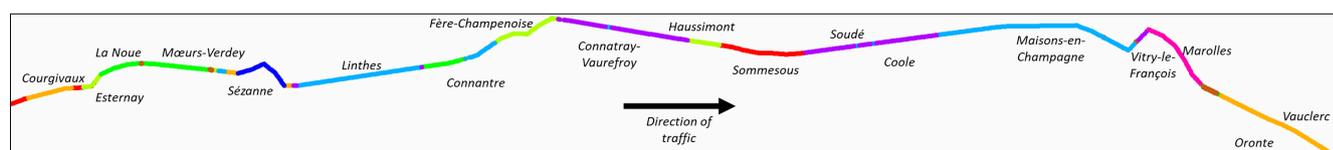


FIGURE 2.16 – Projection de la classification sur la carte de la RN4

La classification présentée pour le marquage routier est associée à la ligne axiale. Pour pouvoir contrôler la classification pour les autres lignes de marquages une Analyse Factorielle des données Mixtes est appliquée [76]. Elle est dédiée à l’analyse des données contenant à la fois les variables qualitatives et celles quantitatives. En pratique, l’AFDM se comporte globalement comme une Analyse de Composantes Principales (ACP), en transformant les données qualitatives en un Tableau Disjonctif Complet (TDC). En effet, un TDC permet de transformer des données qualitatives en un nouveau tableau indiquant si les individus possèdent ou non la propriété de la variable qualitative en question. Le TDC est pondéré par un poids établi par Pagès [76].

Produire un résumé d’informations au sens de l’ACP, c’est établir une similarité entre les individus, chercher des groupes d’individus homogènes, mettre en évidence une typologie d’individus. Quant aux variables, c’est mettre en évidence des bilans de liaisons entre elles, moyennant des variables synthétiques et mettre en évidence une typologie de variables. L’ACP cherche d’une façon générale à établir des liaisons entre ces deux typologies.

Le cercle de corrélation représenté par la figure 2.18 décrit les relations entre toutes les variables descriptives. Il est obtenu à partir d’une analyse en composantes principales (ACP). Le principe général est que chaque axe du cercle dissocie les variables et celles qui sont proches de la frontière du cercle. De cette étude, il ressort que :

FIGURE 2.17 – Cercle de corrélation avec confrontation des deux premières composantes principales

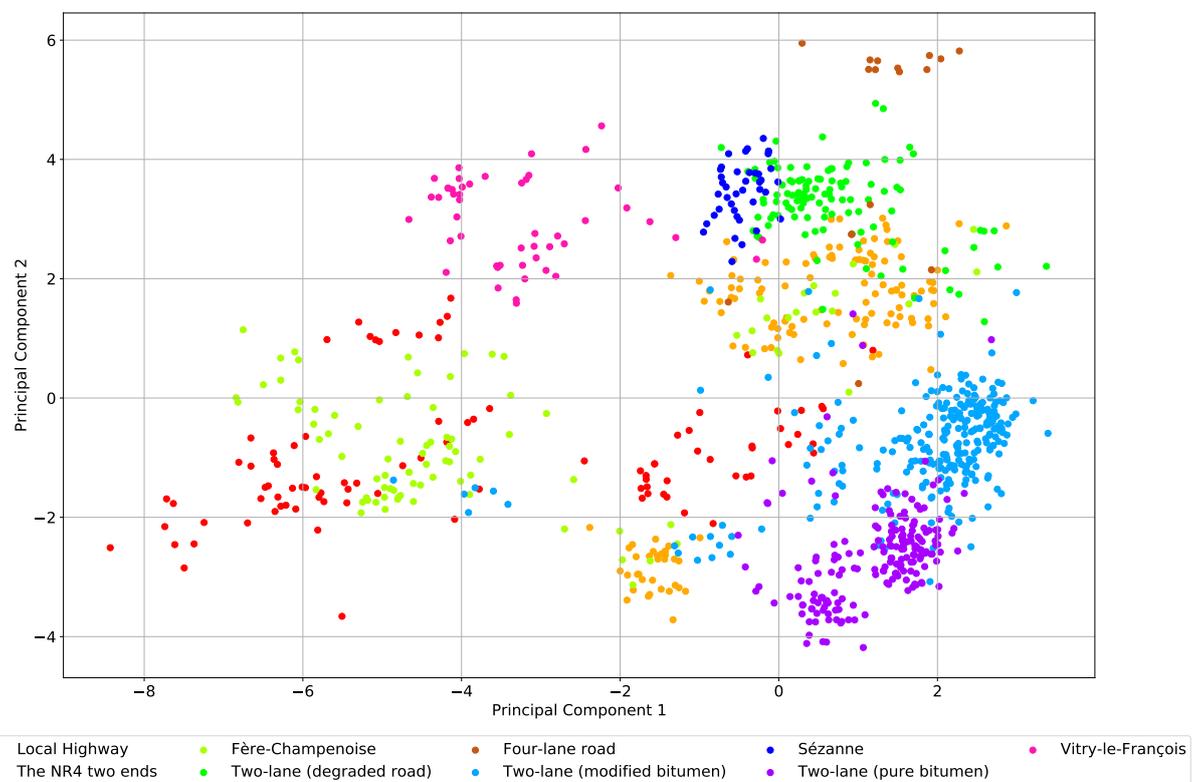


FIGURE 2.18 – Présentation des individus suivant les deux premières composantes principales

- Les variables plus proches du centre, exemple Bau08 (BAU observée en 2008), interchange, ont peu d'impact sur le modèle contrairement à celles plus proches de la frontière exemple VTBM, PTB, Exc, Bau09.
- L'axe vertical du cercle de corrélation représente la première composante principale. Il sépare à droite la ligne axiale, les chaussées séparées, les croisements et la qualité de bitume. D'autre part, sur la gauche de ce cercle on retrouve la BAU, les chaussées uniques, l'absence de croisement et l'âge du bitume.
- L'axe horizontal du cercle de corrélation est la seconde composante principale. Il sépare dans la partie en haut de ce cercle les chaussées avec un absence de croisement, la qualité et l'âge du bitume et d'autre part en bas du cercle, les marquages observant un remplacement, les croisements ou dénivelées et le trafic journalier.

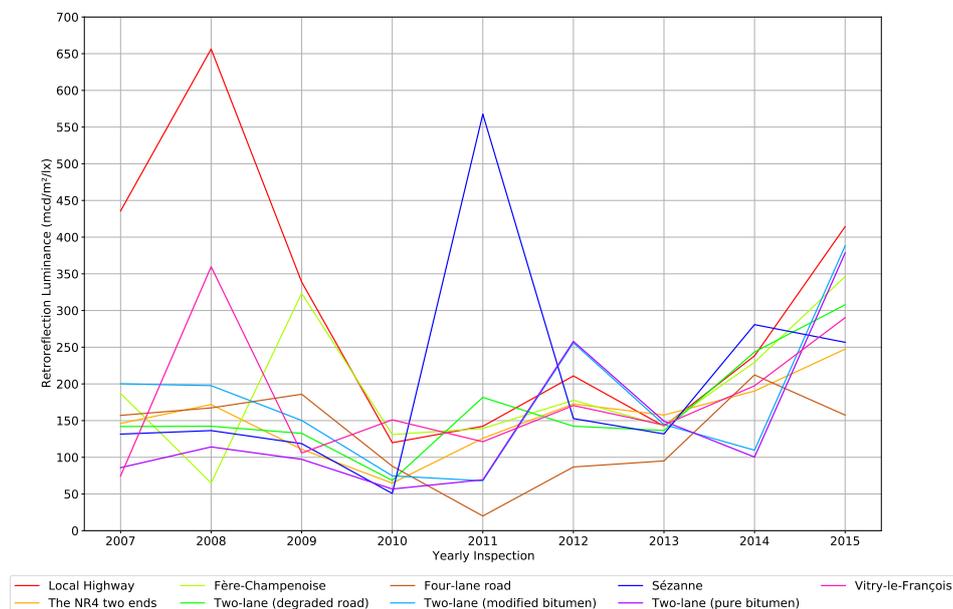


FIGURE 2.19 – Rétroreflexion moyenne des clusters de la ligne axiale

Après une analyse qualitative et quantitative de ces clusters et la projection sur la carte du réseau routier étudié, il ressort les résultats suivants :

- Le cluster 1 est divisé en 2 parties de la RN4 (Courgivaux et Vauclerc). Les marquages sont posés sur des chaussées séparées 2 x 2 voies ou unique 2 voies tous deux en excellent état. Sur ces chaussées, la présence d'un peu de dénivelé, d'échangeur et de plan est notée et plus de la moitié (58%) sont revêtues de bitume mince pur.
- Dans le cluster 2, principalement localisé à la Noue, Moeurs-Verdey et Connantre. 55% des marquages ont un état de chaussée acceptable et 45% sont en excellent état. Les chaussées sont presque totalement (99%) revêtues de bitume très mince modifié et sont des chaussées séparées 2 x 2 voies. Dans ce cluster, il y a la présence

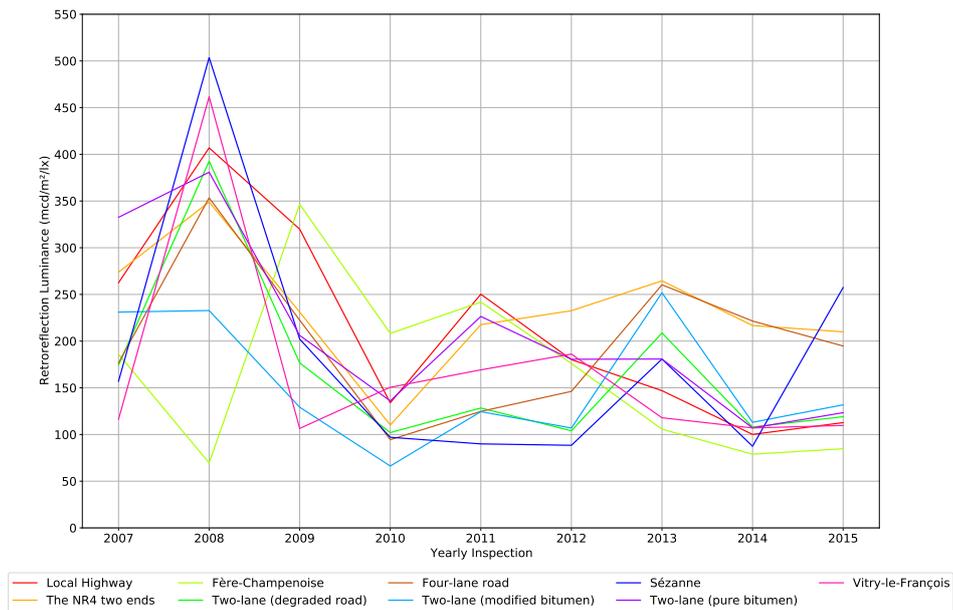


FIGURE 2.20 – Rétroreflexion moyenne des clusters de la bande d'arrêt d'urgence

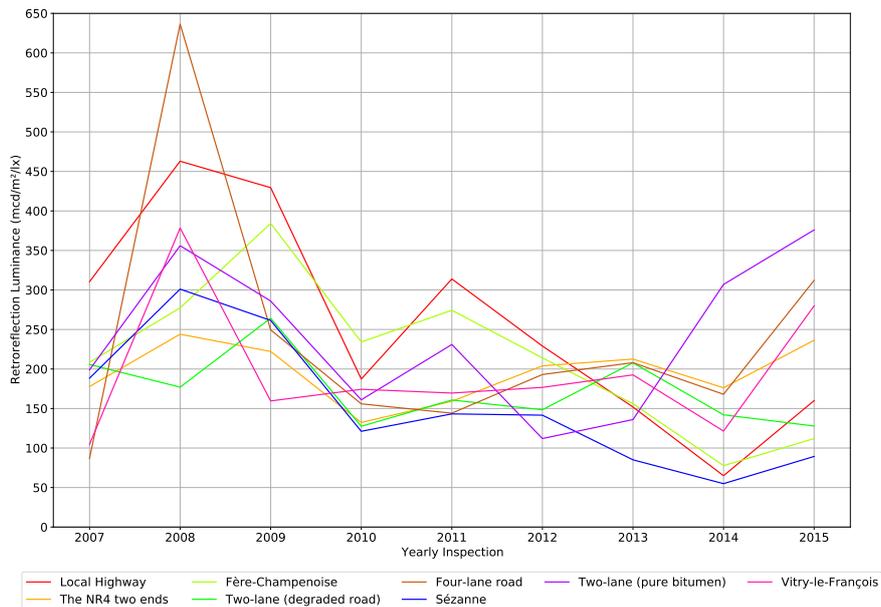


FIGURE 2.21 – Rétroreflexion moyenne des clusters de la ligne TPC

de dénivelé et de plan et les marquages ont connu une évolution plutôt stable au fil du temps.

- Le cluster 3 est localisé à Fère-Champenoise et Haussimont. Il ne regroupe que des marquages dont les chaussées sont en mauvais état et il s'agit essentiellement

de chaussées séparées 2x2 voies sont revêtues de bitume très mince modifié. La présence de dénivelé est assez importante (10%).

- Le cluster 4 est la sortie du contournement de Vitry-le-François à Marolles. Un nombre important de marquages ce cluster ont une chaussée en mauvais état (69%). Il s'agit notamment des marquages posés sur des chaussées uniques à 4 voies revêtues de bitume très mince modifié. Le croisement avec un Plan est assez remarquable (13%). Une évolution assez particulière du niveau de rétro réflexion de la TPC qui, a connu une hausse importante entre 2007 et 2008 puis une baisse considérable avant de se stabiliser, est également remarquable.
- Les marquages du cluster 5 se localisent à Linthes, Connantre, Coole et Maisons-en-Champagne. Ils ont un état de chaussée acceptable et sont essentiellement posés sur des chaussées uniques 2 voies ( $\geq 7m$ ). C'est le seul cluster dans lequel une portion de chaussée unique à 3 voies  $< 10,5$  m.
- Le cluster 6, quant à lui, est le contournement de Sézanne. Il est celui où des chaussées séparées 2x2 voies revêtues de bitume très mince modifié est en état acceptable. Il ressort une présence importante de dénivelé (75%) et d'échangeur (25%). Dans ce cluster, le niveau de rétro réflexion de la ligne axiale présente un pic remarquable en 2011 et pour les bandes d'arrêt d'urgence c'est en 2008 qu'un pic apparaît.
- Le cluster 7 est scindé en deux et se localise dans la région de Connantray-Vaurefroy et Soudé. Il regroupe majoritairement les chaussées uniques 2 voies ( $\geq 7m$ ) revêtues de bitume mince pur et en état acceptable. C'est le seul cluster dans lequel il n'y a aucun croisement particulier. Son bitume est le plus ancien de tous et ayant le plus faible taux de trafic journalier.
- Le groupe dans lequel toutes les portions de routes sont en excellent état est le cluster 8. Les marquages de ce cluster se localise à l'échangeur de Sommesous (complété par une petite zone près de Courginaux). Il contient notamment les chaussées séparées 2x2 voies.
- Le cluster 9 est le contournement de Vitry-le-François. Il affiche un pourcentage important de dénivelé (92%). Des chaussées uniques 2 voies ( $\geq 7m$ ) et des chaussées séparées 2x2 voies revêtues de bitume semi grenu modifié et dans un état acceptable sont rencontrées. Les trois types de marquages de ce cluster présentent une évolution similaire.

Les figures 2.19, 2.20 et 2.21 représentent respectivement le niveau de rétro réflexion moyen pour chaque cluster pour ligne axiale, la bande d'arrêt d'urgence et la ligne TPC. On constate bien la différence de l'évolution de la rétro réflexion moyenne de chaque cluster.

### 2.5.3.2 Identification de zones de maintenance pour les données de la chaussée

Dans cette section, l'application de l'algorithme de classification et la correction de censure avec l'algorithme EM sur les données de la chaussée de la base de données LTPP est présentée. La figure 2.22 représente le niveau de fissuration pour chaque section de route du Texas. Chaque courbe représente la dégradation d'une section de route durant l'horizon d'inspection. Le niveau de fissuration varie, généralement, entre 0% et 20%. Cependant, quelques sections atteignent une fissuration maximale de 35%. Il en résulte aussi qu'une majorité de sections ont subies des fissurations entre les années 1989 et 2002. A partir de 2005 peu nombreuses sont les sections fissurées. Une campagne de maintenance aurait donc été programmée à cette date.

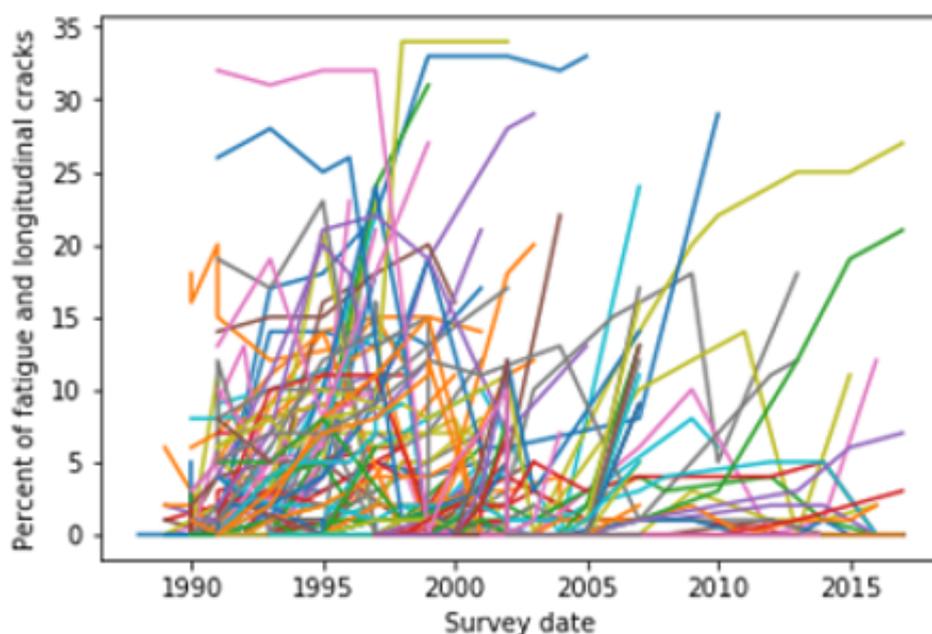


FIGURE 2.22 – Niveau de fissuration de la chaussée des sections du Texas

Dans le but de déterminer les sections de route qui ont un modèle de dégradation similaire, la stratégie de classification présentée précédemment est appliquée sur les sections du Texas en se basant sur l'historique d'inspection de ces sections.

La figure 2.23 représente le dendrogramme associé. Il en résulte que les sections du Texas peuvent être regroupées en 8 clusters suivant leurs dégradations. La figure 2.24 illustre la fissuration moyenne par cluster. On remarque que les courbes de fissuration sont différentes. Chacune possède un modèle de dégradation qui lui est propre.

En analysant les clusters, il résulte que le cluster 1 contient 45 % des sections des Texas dont 73% représentent des routes rurales d'artères principales qui desservent des zones urbanisées, 6% de réseau secondaires rurales et 21% de réseau urbain principal. Pour le cluster 2, il contient 20% des routes du Texas, principalement du réseau secondaire

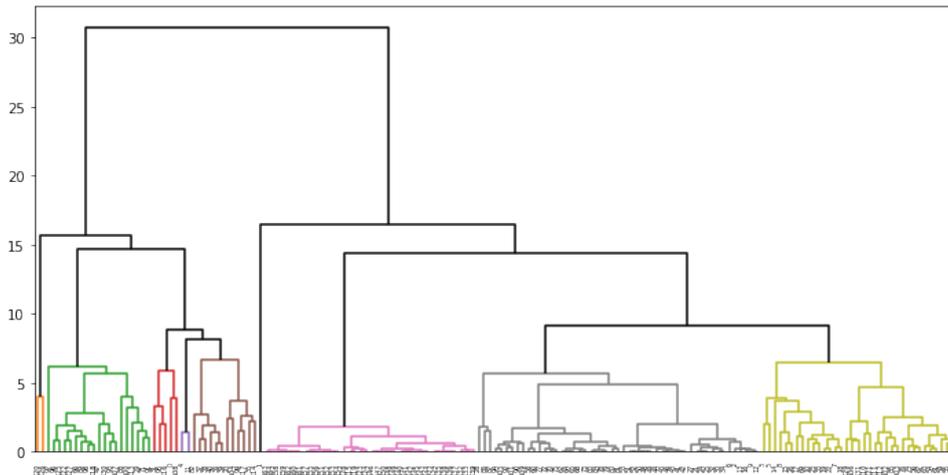


FIGURE 2.23 – Dendrogramme des sections du Texas avec une segmentation en 8 clusters

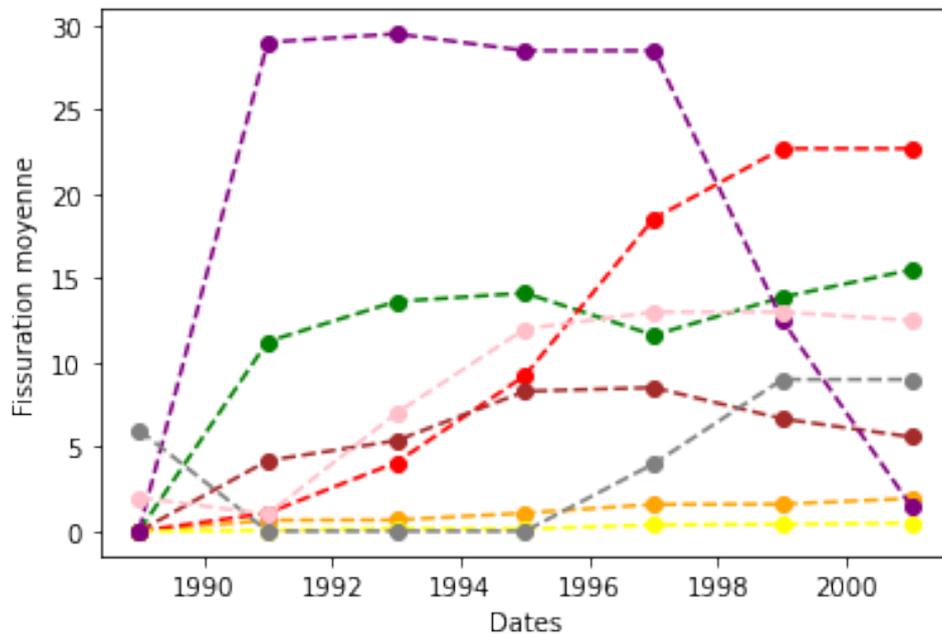


FIGURE 2.24 – Fissuration moyenne par cluster

qui relie des villes à des itinéraires de classification supérieure. Concernant le cluster 3, il groupe les sections de réseau secondaire rural. Le cluster 4 contient 5% des routes collectrices mineurs qui relient les petites collectivités, mais avec un trafic très important. Quant au cluster 5, il contient 7% des sections de routes globales dont 47% de routes urbaines secondaires et 53% de routes collectrices rurales. Le cluster 6 contient 2% des sections du Texas qui appartiennent au milieu rural mineur où la fissuration moyenne atteint un seuil maximal plus élevé comparant aux autres clusters. Le cluster 7 est celui qui regroupe des routes du réseau urbain secondaire où les sections de route ne représentent aucune fissuration durant la période d'observation. Enfin le cluster 8 regroupe 6% de route principalement du réseau urbain principal.

## 2.5.4 Construction d'un exemple test d'infrastructure routière

A l'heure actuelle, on n'a pas pu avoir accès à une base de données qui regroupe l'historique d'inspections des lignes de marquage et de la chaussée d'une même section de route, ce manuscrit se base sur une route dite "simulée". Cette dernière est construite en superposant les clusters de la signalisation horizontale et ceux de la chaussée.

Comme présenté précédemment, les lignes de marquages de la RN4 sont classées en 9 clusters et les sections de chaussée en 8 clusters. Le nombre de clusters n'étant pas le même pour les deux bases de données, la classification est optimisée séparément pour chaque base de données, les routes simulées sont donc construites en fonction de leurs tailles et leurs effectifs.

La figure 2.4 illustre la stratégie de construction des routes simulées. On note  $C_M^i$  le  $i^{\text{ème}}$  cluster des marquages routiers de la RN4 et  $C_c^j$  le  $j^{\text{ème}}$  cluster de la chaussée. Dans ce manuscrit, aucune méthode "exacte" n'est utilisée pour la construction des routes simulées c'est plutôt une méthode manuelle qui est adoptée. Cette approche se base sur le nombre d'éléments de chaque cluster. Par exemple, le cluster  $C_c^1$  est celui qui contient plus de sections de la chaussée, on l'associe donc aux clusters  $C_M^1$ ,  $C_M^2$  et  $C_M^3$ . Même si les clusters  $C_M^6$  et  $C_M^8$  contiennent respectivement 27% et 19% ils ne sont pas associés au cluster  $C_c^1$  vu qu'ils ne contiennent que 2 lignes de marquage.

La figure 2.4 montre les clusters construits. Pour la route simulée est composée de 10 clusters appelés aussi sous-systèmes. Dans la suite de ce manuscrit,  $S$  représente route simulée et  $S_i$  le  $i^{\text{ème}}$  sous-système.

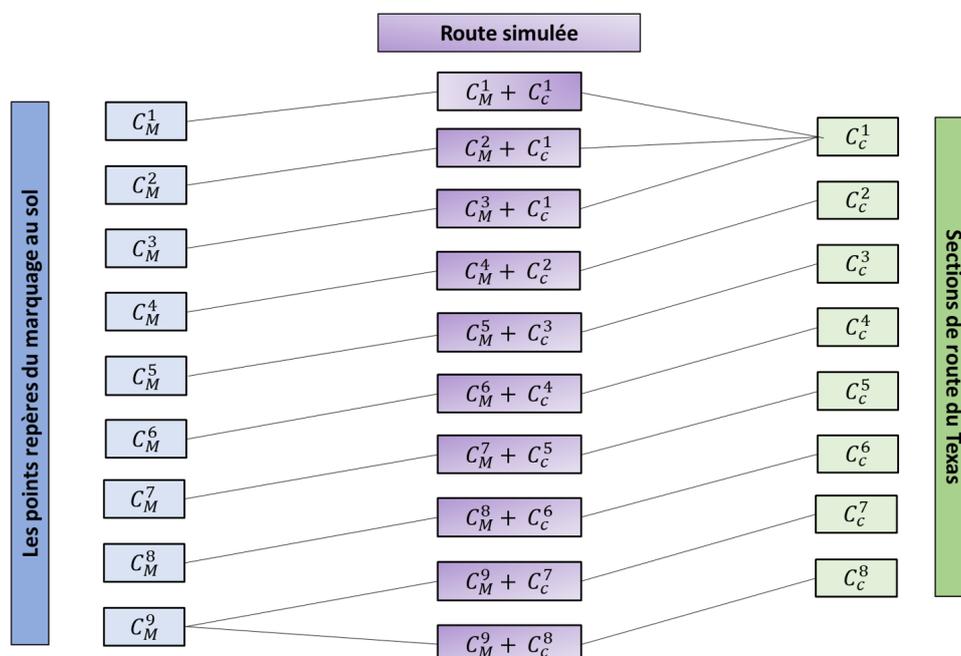


TABLE 2.4 – Stratégie de construction de la route simulée

Dans les prochains chapitres, les sous-systèmes  $S_i$  avec  $i \in \{1, \dots, 10\}$  sont considérés. Pour chacun, on établit un plan de maintenance regroupé qui prendra en considération les interactions entre les composants de chaque section de route. Cette approche est utilisée dans le but de tester nos algorithmes de maintenance sur des données réelles.

## 2.6 Conclusion

Les recherches actuelles dans le domaine de l'automatisation de la conduite s'intensifient dans le but de fournir des solutions de mobilité plus efficaces. Cela est possible à condition de mettre en place les infrastructures nécessaires pour faire fonctionner ces nouveaux écosystèmes de mobilité. Ce chapitre illustre la relation entre le véhicule autonome et les composants de l'infrastructure routière. Les caméras de ce type de véhicule ont la capacité de lire les lignes de marquages pour pouvoir se positionner sur le chemin de roulement. Les différents types de défaillance des composants de l'infrastructure routière sont des phénomènes incompatibles avec le fonctionnement des véhicules autonomes.

Ce chapitre propose une présentation générale des composants de l'infrastructure routière : le marquage routier et la chaussée. La deuxième section est dédiée aux marquages routiers. Elle présente ses techniques de pose et d'inspections, les types de dégradation observés et les stratégies de maintenance présentées dans la littérature. Concernant la section 3 de ce chapitre, elle présente une généralité sur la chaussée. Dans ce manuscrit, la couche de roulement est celle considérée. Les types de dégradation de la chaussée sont présentés (les types de fissures) mais uniquement les fissures longitudinales sont retenues.

Ce chapitre présente ensuite un processus de traitement de l'historique d'inspections de ces composants afin de déterminer des zones stratégiques de maintenance. Les données concernant le marquage routier proviennent de l'historique d'inspection du niveau de rétro-réflexion de la route nationale française 4. D'autre part, les données de la fissuration de la chaussée proviennent de la base de données américaine Long Term Pavement Performance (LTPP) restreinte à l'état du Texas.

Les deux bases de données sont classifiées en se basant sur la dégradation afin d'identifier les sections de routes (pour la chaussée) et les points de repère (pour le marquage routier) qui ont tendance à se dégrader de la même façon. Dans ces travaux de thèse, une classification hiérarchique est adoptée. Comme les données sont construites à la base d'inspections périodiques, elles représentent donc des censures : à droite, par intervalles et à gauche. Afin de corriger les censures, un algorithme EM est utilisé pour estimer les dates de défaillance et établir une loi de Weibull pour chaque cluster.

Les algorithmes de traitement des données des inspections utilisés dans ce manuscrit peuvent être remplacés par d'autres. A titre d'exemple, pour classer les sections de routes en zones stratégiques de maintenance, une classification avec K-means peut être utilisée dans le cas où le gestionnaire d'infrastructure routière connaît à l'avance les types de dégradation de son réseau routier.

En l'absence d'une base de données "complète" construite à partir d'inspections de la chaussée et de lignes de marquage de la même section de route, ces travaux se basent alors sur une route "simulée" en croisant les clusters obtenus préalablement. Chaque section de route contient donc les lignes de marquages et une chaussée. Dans le but d'optimiser sa maintenance, une section de route est considérée comme un système en série avec plusieurs composants. Dans les prochains chapitres, nous proposons une stratégie de regroupement d'actions de maintenance qui prend en compte les interactions entre les composants de la route, le budget alloué à la maintenance et la fiabilité de tout le système.

# Regroupement statique d'actions de maintenance

## 3.1 Histoire et généralité de la maintenance

Avant les années 1900, on ne parle pas encore de la notion de maintenance mais plutôt de réparation et d'entretien. La notion de fiabilité, quant à elle, remonte essentiellement à la révolution industrielle [15]. Durant la période entre 1900 et 1970, on utilise la notion d'entretien, avec le développement des chemins de fer, de l'automobile, de l'aviation et l'armement pendant les deux guerres mondiales. Dans les années 1930, le secteur aéronautique était le premier à utiliser les analyses statistiques dans le contexte de fiabilité. Durant la Seconde Guerre mondiale, d'autres secteurs industriels ont énormément progressés. Cela a conduit à un essor des techniques d'estimation de la fiabilité.

Après la Seconde Guerre mondiale, la reconstruction de l'industrie a commencé. Le marché devient donc de plus en plus compétitif, obligeant les fabricants à augmenter leur niveau de production. La surcharge de travail des machines entraîne une augmentation de temps d'arrêt et une augmentation au niveau des coûts d'entretien et de réparation des machines. Ces changements de volume de production ont exigé de meilleures pratiques de maintenance, qui ont conduit par la suite au développement de la maintenance préventive [19]. Avec la demande croissante pour une production constante et le développement des connaissances sur la prévention des pannes, la découverte de nouvelles techniques et l'amélioration de la gestion de la maintenance ont grandement contribué à la compréhension des machines industrielle et des systèmes de production. Les professionnels commencèrent à porter une attention particulière aux risques potentiels et accumulèrent une panoplie de données diverses. Les industriels pouvaient ainsi mieux comprendre les risques de pannes et les moyens de les prévenir.

Cependant, entre les années 1960 et 1980, la maintenance industrielle est encore considérée comme une activité d'arrière-plan. Son bénéfice est perçu comme relatif et on fait appel à elle uniquement lorsqu'une machine ou un système tombe en panne. Ses fonctions étaient toutefois limitées et restreintes à l'électricité, la mécanique ou encore le graissage. En effet, avant la Seconde Guerre mondiale, les équipements industriels étaient impo-

sants, vieillissants et au roulement assez lent. Ils se contrôlaient à partir d'un système élémentaire et d'instrumentation. Étant donné que la demande de l'époque n'était pas aussi élevée que celle d'aujourd'hui, ce facteur ne posait pas encore de problèmes. Les différents équipements étaient solides et robustes. On retrouvait dans certaines usines des machines qui fonctionnaient aussi bien le premier jour que 20 ans plus tard [16].

Après les années 1970, les développements et l'évolution de l'industrie et d'outils modernes aboutissent à la mise en œuvre de la maintenance. Depuis les années 1980, les installations et les systèmes sont devenues encore plus complexes. Les exigences du marché concurrentiel et l'intolérance des temps d'arrêt ont augmenté, tandis que les coûts de maintenance ont augmenté. Outre les exigences de fiabilité accrue, une nouvelle sensibilisation aux processus de défaillance, l'amélioration des techniques de gestion et les nouvelles technologies ont permis de mieux comprendre la santé des machines et des composants. La compréhension du risque est devenue essentielle. Les questions d'environnement et de sécurité sont primordiales. De nouveaux concepts comme la surveillance des conditions, la fabrication juste à temps, les normes de qualité, les systèmes experts et la maintenance centrée sur la fiabilité ont également fait leur apparition [17].

Une première définition de la maintenance est donnée par l'Association Française de NORmalisation (AFNOR) en 1994 (norme NFX 60-010), à savoir " *l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé*". Dès 2001, une nouvelle définition lui a été attribuée (Nf EN 13306 X 60-319) : "*Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise*» [21]. La maintenance est classée en deux grandes familles en fonction des attentes vis-à-vis de la maintenance à l'instant de l'intervention selon cette norme :

- Maintenance corrective : regroupe l'ensemble des actions de maintenance qui interviennent en réponse, et donc au moment de la panne d'une unité, afin de le remettre en état de marche.
- Maintenance préventive : regroupe l'ensemble des actions de maintenance programmées, pour éviter la panne ou la défaillance, à des intervalles de temps prédéterminés ou selon des critères prescrits. La maintenance préventive peut être elle-même soit systématique, conditionnelle ou prévisionnelle.

Selon la norme NF X 60- 011, une défaillance représente une altération ou cessation d'un bien à accomplir sa fonction requise. Elle peut être due à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation ou à la maintenance [21]. Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle. D'autre part, une défaillance est un événement à distinguer d'une panne qui est un état. Cette dernière est définie, selon la norme NF EN 13306, comme un état d'un bien, inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures [4].

Lors de la planification des stratégies de maintenance préventives, les considérations relatives à l'avantage global pour l'ensemble du système doivent l'emporter sur le plan optimal pour chaque composant séparément. Les plans de maintenance doivent être abordés de manière globale afin d'optimiser le coût de possession du système. Par exemple, il est parfois moins coûteux et plus pratique d'effectuer une maintenance préventive sur un composant d'un système lorsqu'on effectue une réparation sur un autre composant du système plutôt qu'au moment optimal pour effectuer la maintenance préventive de ce composant [96].

Après la révolution industrielle, la structure des systèmes en industrie devient de plus en plus complexe avec le développement technologique et l'économie mondiale [96]. La maintenance des systèmes est donc devenue de plus en plus complexe. La difficulté de la maintenance dans ces cas est due aux différentes interactions entre les composants du même système. Mais d'autre part ces interactions offrent l'opportunité de regrouper la maintenance, ce qui permet de réduire les coûts de la maintenance.

L'objectif de la maintenance préventive groupée et opportuniste est de tirer parti des ressources, des efforts et du temps déjà consacrés à la maintenance d'une autre pièce du système afin de réduire les coûts. Cette méthode est généralement possible et plus avantageuse lorsque ces composants sont situés à proximité les uns des autres dans le système et qu'aucun travail supplémentaire important n'est nécessaire pour effectuer la deuxième activité de maintenance. Elle est également couramment appliquée dans les cas où des frais de déplacement importants sont encourus ou un démontage majeur du système est nécessaire ou, lorsque les pièces ne sont pas trop chères, elles peuvent être mises au rebut avant même qu'il soit nécessaire de les entretenir. Elle peut également être appliquée dans les situations où le fait d'attendre au-delà de l'heure de la maintenance préventive recommandée pour effectuer la maintenance (c'est-à-dire attendre la prochaine occasion) ne présente pas de risques élevés pour le système [96]. Ce concept peut être étendu en effectuant la maintenance préventive chaque fois que le système est en panne, et pas seulement lorsque certaines pièces sont en cours de réparation.

Pour les systèmes multi-composants, lorsqu'il n'existe pas de forte dépendance entre les différents composants, le modèle traditionnel avec un seul composant développé par Barlow et Hunter en 1960 [45] peut être appliqué indépendamment à chaque composant, afin de fournir un calendrier remplacement optimal. Cependant, le cas général des systèmes multi-composants implique de prendre en compte les interactions entre les différents composants. La dépendance économique est courante dans la plupart des systèmes à fonctionnement continu, tels que les raffineries de pétrole, les installations de traitement chimique, les chaînes de fabrication et les générateurs d'électricité (Das et al en 2007 [59]; Vassiliadis et Pistikopoulos en 2001 [158]). Pour ce type de systèmes, le coût de l'arrêt unique est souvent beaucoup plus élevé que le coût des composants à remplacer. Par conséquent, il existe un grand potentiel économique en mettant en œuvre une politique de maintenance prenant en considération les dépendances économiques. Un certain nombre d'études ont présenté les différentes politiques de maintenance pour les systèmes multi-composants (Cho et Parlar en 1991 [58]; Dekker et al en 1997 [169]; Thomas en 1986 [152]; Wang en 2002 [163]). Ces articles montrent que la plupart des auteurs utilisent

des hypothèses simplifiées, ou traitent de systèmes particuliers (une structure spéciale est supposée), afin de formuler le problème de décision avec moins de difficulté mathématique. D'un autre point de vue, la plupart des modèles de décision développés sont basés sur la programmation dynamique ou sur des modèles d'analyse de l'environnement.

Les coûts de maintenance représentent une part importante du coût total d'exploitation de toutes les usines de fabrication ou de production. Selon le secteur d'activité, le coût de la maintenance peut représenter jusqu'à 60 % du coût des biens produits, selon un rapport [22]. Dans le cas d'un système multi-composants, une stratégie de maintenance optimale pour chacun des composants ne garantit pas l'optimalité de la maintenance du système entier. Par conséquent, de nombreux travaux ont traité le sujet pour proposer des stratégies de maintenance optimale des systèmes multi-composants.

En 1991, Cho et Parlar ont proposé une revue d'état de l'art sur les stratégies de maintenance publiées entre 1976 et 1991 [58]. Ces articles ont été classifiés en 5 grandes familles : modèles de réparation et d'interférence avec les machines, modèles opportunistes, modèles d'inventaire/maintenance, modèle de remplacement et modèles basés sur les inspections.

En 1996, Dekker et al ont proposé une autre alternative de classification des modèles [169]. Premièrement, ils sont classés en suivant le type de l'horizon de planification : modèles stationnaire ou statique (à long terme) ou dynamique (à court terme). Deuxièmement, les modèles de regroupement stationnaire sont divisés en catégories : regroupement de la maintenance corrective, regroupement de la maintenance préventive et regroupement opportuniste de la maintenance. La maintenance regroupée opportuniste regroupe à la fois la maintenance préventive et la maintenance corrective. Les modèles de regroupement dynamiques quant à eux sont divisés en deux familles : ceux avec un horizon de planification fini et ceux avec un horizon roulant.

La notion de maintenance opportuniste a débuté durant les années 1960 dans le cadre du projet RAND (Research and Development Project), avec les chercheurs John Joseph McCall, Dale Weldeau Jorgensen et Roy Radner. Ils ont étudié systématiquement la possibilité de combiner une action de maintenance préventive et une autre corrective sur un système de production multi-composants. L'objectif principal de cette étude était de réduire les coûts de mise en œuvre. Le terme "maintenance opportuniste" apparaît pour la première fois vers les années 1962-1963 dans leurs travaux. Le principe de la maintenance opportuniste est de déclencher une action de remplacement pour un composant non surveillé du système, en fonction de l'état d'un ou de plusieurs composants surveillés en continu [128, 95].

La maintenance opportuniste a fait l'objet d'un traitement approfondi dans la littérature. L'optimisation de la maintenance préventive opportuniste pour un système multi-composant avec une configuration en série est considérée par Zhou et al [175]. Dans le même contexte, V. Babishin et S. Taghipour ont proposé une stratégie de maintenance opportuniste pour un système dont les composants sont sujets à des défaillances matérielles et logicielles [41]. Les défaillances des composants du système sont classées en deux

classes. La première regroupe les défaillances dures qui sont immédiatement maintenues et leurs durées de maintenance présentent une opportunité d'inspection (inspection opportuniste). La deuxième classe est celle des défaillances molles qui ne sont maintenues que lors des inspections périodiques. L'objectif de cette stratégie est de trouver une politique de maintenance optimale pour tous les composants et l'inspection périodique optimale.

En 2009, R. Laggoune et al proposent un plan de maintenance basé sur l'optimisation du remplacement opportuniste par multi-groupes pour les systèmes à plusieurs composants [97]. L'optimisation de la maintenance a le potentiel de réduire considérablement les coûts d'exploitation et d'augmenter les bénéfices de l'entreprise en augmentant la disponibilité et la production. Cette approche est basée sur l'analyse des composants pris individuellement, selon un modèle basé sur l'âge. L'algorithme d'optimisation permet de réorganiser les temps de remplacement individuels optimaux de manière à ce que tous les composants deviennent des multiples des plus petits pour permettre les remplacements conjoints. De cette façon, les temps obtenus par l'approche de multi-groupement ne donnent pas de conditions d'optimalité individuelles, mais satisfont le coût concernant l'ensemble du système. L'approche proposée est une procédure numérique, où les cycles de vie sont simulés et la solution optimale est recherchée numériquement. Il résulte de cette étude que la stratégie de maintenance opportuniste est très efficace en matière de réduction des coûts de maintenance. D'autre part, des simulations Monte Carlo ont une grande capacité à résoudre les problèmes complexes et la configuration de regroupement.

La figure 3.1 résume la classification des stratégies du regroupement adoptée dans ce manuscrit. Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur les stratégies de regroupement statiques que nous détaillerons plus dans la troisième section de ce chapitre. Cette classification est un héritage de celle proposé par Dekker en 1996 [169].

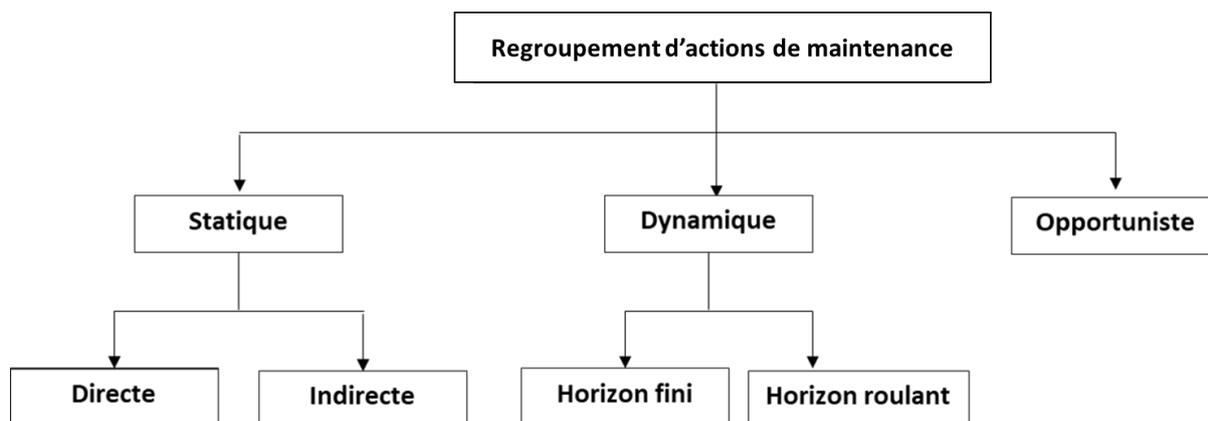


FIGURE 3.1 – Types de stratégies de regroupement d'actions de maintenance

Les stratégies de regroupement des actions de maintenance ont pour objectif de minimiser ou maximiser une fonction objective. Dans le cadre de mes travaux, nous proposons une stratégie de regroupement dans le but de minimiser les coûts de la maintenance t aussi assurer la fiabilité et la disponibilité du système. En effet, elles doivent définir les composants à maintenir simultanément et les dates optimales de maintenance en pre-

nant en considération le risque qu'un composant tombe en panne avant la date de la maintenance et les contraintes de budget [169]. L'objectif de ces travaux, dans le cas de l'infrastructure routière, est d'identifier les composants de la route (les lignes de marquage et la chaussée) à maintenir simultanément. La maintenance regroupée doit à la fois respecter les contraintes de budgets et les seuils optimaux à respecter.

Dans ce chapitre, nous présentons une stratégie de maintenance statique, appelée aussi stationnaire, pour les systèmes à plusieurs composants avec une application sur l'infrastructure routière. Dans la première section de ce chapitre, une modélisation des systèmes à plusieurs composants est proposée. Elle étudie la structure du système, les dépendances économiques et stochastiques entre ses composants. Cette étude est suivie d'une présentation des modèles de regroupement statique des actions de maintenance obtenues dans la littérature. Dans la troisième section de ce chapitre, nous proposons une stratégie de regroupement de maintenance. Une application sur le cas de l'infrastructure routière est proposée dans la section 4.

## 3.2 Modélisation des systèmes à plusieurs composants

Un système est une combinaison (parallèle, série, parallèle-série ou combinaison complexe) structurée de composants ou de sous-systèmes qui interagissent d'une manière organisée afin d'accomplir une fonctionnalité commune. La détermination de la structure du système consiste à déterminer l'état du système conditionnellement à l'état du composant (en état de panne ou en marche) [8]. Selon R. E. Barlow et F. Proschan [46], la modélisation d'un système multi-composants consiste à définir sa structure, les dépendances stochastiques et les interactions existantes entre les composants du système.

### 3.2.1 Modélisation de la structure du système

La configuration d'un système à plusieurs composants est classifiée en deux familles principales :

- Une structure élémentaire (simple) comprenant les structures série, parallèle, série-parallèle, parallèle-série, k-sur-n.
- Une structure complexe composée des structures élémentaires présentées dans la première catégorie.

#### Remarque

- Un système parallèle-série est formé de  $r$  blocs montés en série, et chaque bloc  $i$  constitue un système parallèle de  $i_j$  composants  $j = 1, \dots, r$ .
- Un système série-parallèle est formé de blocs montés en parallèle, et chaque bloc constitue un système série de  $i_j$  composants  $j = 1, \dots, r$ .

Pour estimer l'évolution de l'actionneur et de ses composants à travers le temps, [85] propose d'utiliser le diagramme de fiabilité qui permet de représenter le comportement du système sous une vue fonctionnelle.

### Diagramme de fiabilité

Un diagramme de fiabilité est défini par [2] :

- Une entrée  $E$ , un corps de diagramme et une sortie  $S$ .
- Un flux est passé de  $E$  jusqu'à  $S$  en passant par les différents chemins.
- La défaillance d'une entité arrête le flux au niveau du composant.
- S'il n'existe pas un chemin jusqu'à  $S$ , le système est défaillant, sinon il fonctionne.
- Configuration en série et/ou en parallèle.

Soit  $S$  un système à  $N$  composants. La variable  $e_i$  désigne l'état du composant  $i$  avec :

$$e_i = \begin{cases} 1 & \text{si le composant } i \text{ est en état de marche} \\ 0 & \text{si le composant } i \text{ est en état de panne} \end{cases} \quad (3.1)$$

Le système est décrit par  $e = (e_1, \dots, e_N), \in \{1, 0\}^N$ . Soit  $\phi$  l'application de  $\{1, 0\}^N$  dans  $\{1, 0\}$  avec l'équation 3.2. La variable  $\phi$  est appelée la fonction de structure du système.

$$\phi(e) = \begin{cases} 1 & \text{si le système est en état de marche} \\ 0 & \text{si le système est en état de panne} \end{cases} \quad (3.2)$$

Dans les prochains paragraphes nous présentons une analyse des structures élémentaires en série, parallèle ou k-n.

#### Structure en série :

Un système est en série s'il ne peut être en fonctionnement que quand tous ses composants sont en état de marche [9]. La fonction de structure du système représenté par la figure 3.2 est donnée par l'équation 3.3.

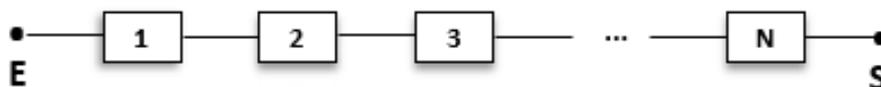


FIGURE 3.2 – Système en série

$$\phi(e) = \prod_{i=1}^N e_i = e_1 \cdot e_2 \cdot e_N = \min(e_1, e_2, \dots, e_N) \quad (3.3)$$

### Structure en parallèle :

Un système est en parallèle s'il fonctionne si au moins un de ses composants est en état de marche [9]. La fonction de structure pour ce type de système est donnée par :

$$\phi(e) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e_i) = 1 - (1 - e_1) \cdot (1 - e_2) \cdot \dots \cdot (1 - e_N) = \max(e_1, e_2, \dots, e_N) \quad (3.4)$$

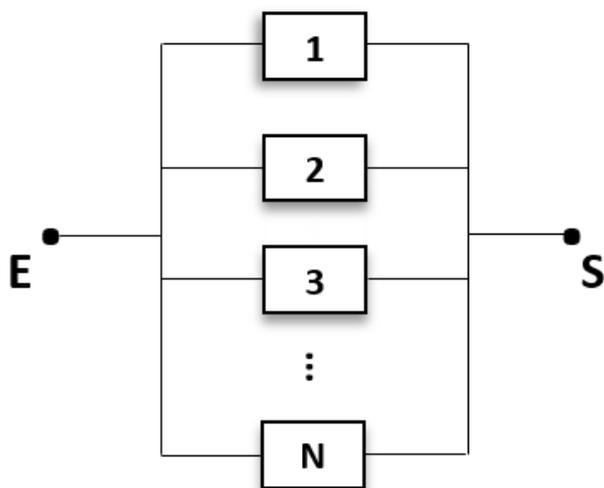


FIGURE 3.3 – Système en parallèle

### Structure K sur N :

Un système  $K$  sur  $N$ , représenté par la figure 3.4, est en bon état si au moins  $k$  ( $1 \leq k \leq N$ ) composants parmi les  $N$  composants sont en état de fonctionnement. La défaillance du système tombe en panne quand  $N - K + 1$  composants ou plus sont en panne [112].

Dans ce cas, la fonction de structure est donnée par 3.5 :

$$\phi(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^N e_i \geq k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

### Système à structure complexe

Dans le cas d'un tel système, la modélisation de la structure du système n'utilise pas un diagramme de fiabilité car il ne contient ni des sous-systèmes séries ni des sous-systèmes parallèles. Pour passer de l'entrée  $E$  à la sortie  $S$ , [138] propose de passer par

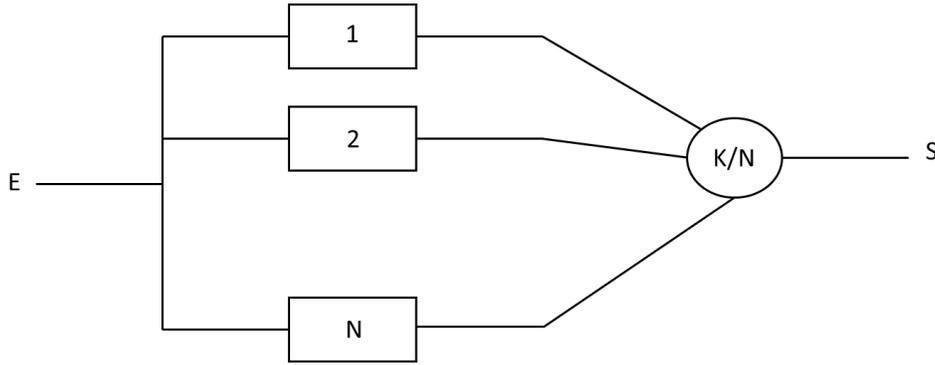


FIGURE 3.4 – Système K sur N

un ensemble de sous-systèmes placés linéairement, chacun est composé d'un ensemble de composants. Chaque composant peut être relié avec un ou plusieurs composants de sous-système antécédent et de sous-système suivant.

Dans le cas de systèmes à plusieurs composants, on détermine un chemin de succès. De cette manière, nous déterminons les composants qui représentent les coupes minimales. D'après les travaux de H.C Vu [160], une coupe définit un ensemble d'éléments dont la panne entraîne l'arrêt du système. Une coupe est dite minimale si elle ne contient aucune autre coupe. Une coupe minimale d'ordre  $k$  est une coupe qui contient  $k$  composants avec  $1 \leq k \leq N$ . Lors de l'analyse de la structure d'un système donné, il est nécessaire de déterminer les composants critiques qui sont ceux qui représentent une coupe minimale d'ordre 1. Le paramètre  $\pi_i$  est un indicateur qui représente :

$$\pi_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ est un composant critique} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$$

Selon la structure du système et le type des composants, l'arrêt ou la panne d'un composant peut conduire à l'arrêt de tout le système. On distingue deux types d'arrêt. L'arrêt planifié est dû à la maintenance préventive. L'arrêt non planifié est dû à la panne d'un ou plusieurs composants. L'arrêt d'un composant critique ou d'un groupe critique entraîne l'arrêt du système. Le nombre d'arrêt du système lorsque les composants sont maintenus conjointement dépend de la nature des composants ou de groupes de composants (critique ou non critique) et le système peut fonctionner si un ou plusieurs composants non-critique fonctionnent.

### 3.2.2 Modélisation économique entre les composants

Il existe deux types de dépendance économique entre les composants d'un système : dépendance positive et dépendance négative. Selon les travaux de L. C. Thomas [152], la dépendance économique positive implique que le coût de maintenance de plusieurs composants est moins élevé que le coût de la maintenance individuelle. La dépendance économique négative se produit quand le coût de la maintenance regroupée est plus élevé

que celui de la maintenance individuelle. Pour cette raison, la somme des coûts de maintenance des composants, séparément, est différente du coût de la maintenance regroupée des composants. Selon H.C Vu [160], cette différence est due soit au :

- coût de mise en œuvre qui est partagé entre le coût de déplacement des équipes de maintenance et le transport.
- coût d'arrêt du système qui prend en compte le coût d'arrêt planifié et non planifié. Il est lié au coût du redémarrage du système, coût de perte de fonctionnalité ou de qualité des composants.

### 3.2.3 Modélisation stochastique entre les composants

La modélisation stochastique d'un composant commence par la définition d'un espace d'états dans lesquels chaque composant est susceptible de se trouver. Il faut préciser comment le composant passe d'un état à un autre, combien de temps il passe dans chaque état et sous quelles conditions, il passe d'un état à un autre. Selon H.C Vu[160], il existe deux grandes familles pour étudier le modèle de défaillance :

- Modèle de durée de vie : dans la littérature, le modèle de durée de vie est étudié dans le cas où l'espace d'état serait réduit à 2 états (état de fonctionnement et état de panne). Ces modèles ont été discutés dans plusieurs articles, à titre d'exemple [80] et [42].
- Modèle de dégradation : on parle de modèle de dégradation, lorsque les composants passent impérativement par des états intermédiaires avant d'arriver à l'état de panne. Donc, dans ce cas, l'espace d'état n'est pas réduit aux états de fonctionnement et de panne [101], [120].

Dans le prochain paragraphe, nous modélisons l'infrastructure routière comme un système à plusieurs composants. Nous présentons la différentes propositions de la configuration de ce système : en série, en parallèle et en semi-parallèle.

### 3.2.4 Modélisation d'un système multi-composant : infrastructure routière

Dans le cas de l'infrastructure routière, une section de route est modélisée comme un système multicomposants. Le nombre de composants dépend de la nature de la route. Dans ces travaux, on considère des routes 2x2 voies. Elles contiennent généralement 3 lignes de marquages. Un marquage routier  $i$  atteint un état limite de service, qui nécessite une maintenance, si son niveau de rétro réflexion est inférieur à  $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lux}$ . Dans ce cas  $e_i = 0$ . D'autre part, une chaussée  $j$  atteint un état limite de service si le pourcentage de fissuration observé est supérieur à 15% ce qui implique que  $e_j = 0$ . L'espace d'état d'un marquage routier et celui d'une chaussée est donc réduit à deux : état de panne et état de marche.

La modélisation de la structure de l'infrastructure routière reste un sujet à débattre. Si on suppose que la défaillance d'un composant de la route n'implique pas la défaillance d'un autre, notre système est donc présenté en parallèle. Dans ce cas aucun composant n'est critique. Il résulte que  $\forall i \in S : \pi_i = 0$  et le système n'est dit en panne que si tous les composants le sont.

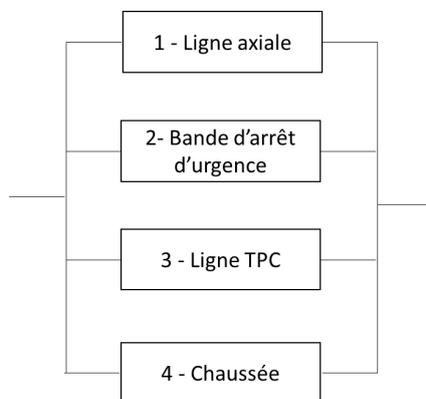


FIGURE 3.5 – Modélisation de l'infrastructure en parallèle

Dans le cas où la défaillance d'un composant entraîne la panne du système, le système est dit en série. Si une ligne de marquage perd en rétro réflexion ou la chaussée représente des fissurations, la section de route est considérée en défaillance et doit être maintenue. Pour ce système,  $\forall i \in S : \pi_i = 1$ .

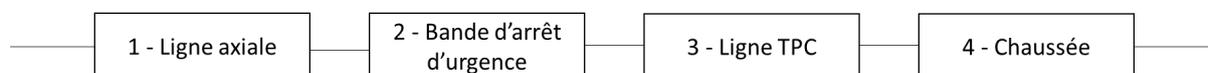


FIGURE 3.6 – Modélisation de l'infrastructure en série

Une autre structure peut être proposée. L'apparition d'une fissure sur la chaussée peut entraîner la défaillance d'une ligne de marquage si cette fissure apparaît sur une des lignes. Dans ce cas, la défaillance de la section de route est conditionnelle par rapport à la position de la fissure. La figure 3.7 présente la structure de l'infrastructure routière sous ces conditions. La chaussée est donc considérée comme un composant critique.

Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir comme paramètre la position de la fissure dans la section de route. Soit  $P_i$  l'indicateur de la position de la fissure par rapport aux lignes de marquage. Il définit par l'équation 3.7. Cette information étant non-disponible, pour le moment, l'infrastructure routière est considérée comme un système en série. Ce choix va simplifier le calcul de la solution optimale de regroupement d'actions de maintenance.

$$P_i = \begin{cases} 1 & \text{si la fissure touche la ligne } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

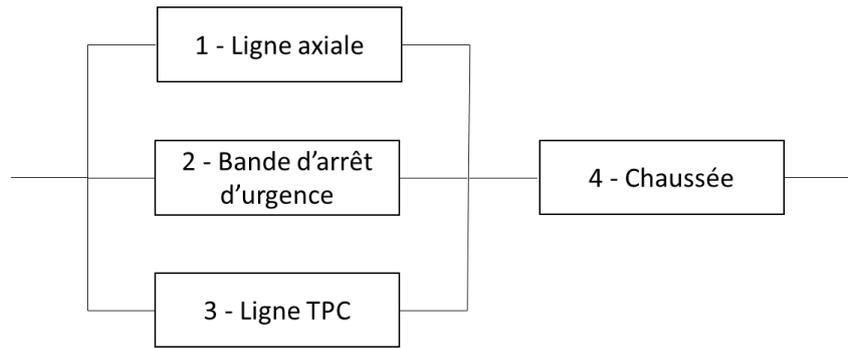


FIGURE 3.7 – Modélisation de l’infrastructure en série parallèle

### 3.3 Stratégie de regroupement d’actions de maintenance statique

#### 3.3.1 Panorama sur les méthodes de regroupement statique d’actions de maintenance

L’optimisation du modèle mathématique, qui détermine la meilleure solution de regroupement parmi toutes les solutions candidates, joue un rôle majeur dans l’optimisation de la maintenance des systèmes à plusieurs composants. Ces modèles ont été largement développés et utilisés dans le but de proposer des politiques de maintenance préventive pour divers systèmes.

Dans le cas des systèmes à plusieurs composants, la dépendance économique, qui peut être positive ou négative, est souvent prise en compte pour l’optimisation de la maintenance. Quand la dépendance économique est positive, les coûts de la maintenance peuvent être minimisés (économisés) lorsque plusieurs composants sont maintenus simultanément. Dans le cas d’une dépendance économique négative, la maintenance des composants, simultanément, est plus coûteuse que la maintenance individuelle des composants. La littérature propose une variété d’études qui proposent des stratégies d’optimisation de la maintenance des systèmes multi-composants par exemple [62, 161, 98, 119]. La plupart de ces stratégies se concentrent principalement sur les structures en séries qui conduisent directement à une dépendance économique positive. En revanche, d’autres auteurs ont étudié la dépendance économique entre composants dans le cas où elle est positive ou négative, voir par exemple [160, 75].

Les stratégies de maintenance statistiques visent à planifier les actions de maintenance sur un horizon à long terme dans le but de minimiser un critère donné, généralement ce dernier est le coût de la maintenance. Ces modèles de regroupement n’utilisent pas d’informations sur la condition du système durant l’horizon de planification pour mettre à jour le plan de regroupement. Les règles de maintenance restent donc stables sur cet horizon. Le regroupement statistique ne se base donc pas sur l’état courant du système mais uniquement sur son état a priori.

Le regroupement d'actions de maintenance d'une manière statique indique que les opérations de maintenance préventives sont combinées sur un horizon de planification prédéfini. Selon K.A Nguyen, le regroupement statique peut être fait directement en regroupant (d'une manière optimale) les actions de maintenance déjà planifiées sur un horizon de planification, ou indirectement où les opérations de maintenance préventives ne sont pas définies à l'avance, mais formées indirectement lorsque la maintenance de différents composants du système coïncident [117]. le regroupement statique d'actions de maintenance peut être également classées en deux groupes : le regroupement direct et indirect.

- Regroupement statique direct : Dans le cas de regroupement direct on détermine la solution candidate (structure groupante)  $SG$  (quelle action de maintenance appartient à quel groupe) ainsi que le cycle de maintenance préventive associé  $t_G$  à chaque groupe de la structure. La recherche de la solution optimale  $SG^*$  est obtenue en minimisant directement la fonction coût de maintenance  $C_{reg}$ . D'après [169], le nombre de solutions possible est égale à  $2^n - 1$ .

$$SG^* = \min_{\{SG \in \mathbf{R}\}} C_{reg}(SG, t_{SG}) \quad (3.8)$$

- Regroupement indirect : Le regroupement indirect d'actions de maintenance est obtenu comme son nom l'indique d'une manière indirecte. [117] a présenté plusieurs approches de ce type de regroupement.
- Première approche : plusieurs articles ont réalisé des regroupements en se basant sur cette approche (par exemple [63, 64, 82, 156]). Pour chaque composant  $i$  du système  $S$  un pas de remplacement optimal  $k_i T$  est déterminé avec  $T$  un intervalle de temps et  $k_i$  un nombre entier supérieur à un. Dans ce cas, pour déterminer le pas optimal de maintenance, il suffit de minimiser le coût de maintenance moyen asymptotique du système donné par l'équation suivante :

$$C^*(k_i, T) = \min_{\{k_i > 0, T > 0\}} C(k_i, T) \text{ avec} \quad (3.9)$$

$$C(k_i, T) = S_p + \sum_{i=1}^n \frac{C_{p(i)} + C_{c(i)}(k_i T)}{k_i T}$$

avec  $S_p$  est le coût de mise en œuvre moyen de maintenance ;  $C_{p(i)}$  est le coût de la maintenance préventive du composant  $i$  ;  $C_{c(i)}$  est le coût de maintenance corrective du composant  $i$  dans un intervalle de temps  $[0, t]$ .

- Deuxième approche : Cette stratégie a été étudiée dans les articles suivants [87, 88, 77]. Le système est renouvelé après une unité de temps  $T$  et la maintenance du composant  $i$  du système est performée à chaque  $T/k_i$  unités de temps avec  $k_i$  est un nombre entier supérieur à un. Les paramètres de décision sont définis en minimisant le coût de maintenance moyen asymptotique :

$$C^*(k_i, T) = \min_{\{k_i > 0, T > 0\}} C(k_i, T) \text{ avec} \quad (3.10)$$

$$C(k_i, T) = S_p + \frac{\sum_{i=1}^n [(k_i - 1)C_{p(i)} + k_i C_{c(i)}(\frac{T}{k_i})]}{T}$$

R. Bris et al ont proposé une stratégie de maintenance pour les systèmes série-parallèle dans le but de minimiser les coûts de la maintenance préventive basée sur le facteur d'importance de Birnbaum dépendant du temps et en utilisant la simulation Monte Carlo et une optimisation avec l'algorithme génétique [52]. Ils supposent que les actions de maintenance préventive de chaque composant améliorent sa fiabilité pour le rendre comme neuf. En fait, la mesure d'importance fournit la probabilité que le système soit dans état dans lequel le fonctionnement du composant  $i$  du système  $S$  est critique. Le système tombe en panne lorsque le  $i^{\text{ème}}$  composant tombe en panne. Le but est donc de déterminer le point de contrôle optimal pour lequel le critère de rapport est minimal.

K. Pipe et B. Culkin ont présenté un plan de maintenance préventive pour les rails [?]. Comme certaines défaillances peuvent avoir un grand impact sur la sécurité des passagers, il est donc important de prévoir la maintenance (remplacement, réparation) tout en respectant un coût fixé. Il est donc nécessaire de développer des outils de recherche opérationnelle qui proposent la maintenance la plus optimale.

J. Long et W.A Jiang proposent une politique de regroupement statique basée sur le concept de la MFOP (Maintenance Free Operating Period) [106]. Ce concept représente une période de fonctionnement pendant laquelle l'équipement doit être en mesure de mener à bien les missions qui lui sont assignées sans action de maintenance et sans que l'opérateur soit restreint en aucune manière en raison de défaillances ou de limitation du système.

Dans notre cas d'étude, un système d'infrastructure routière performant est un élément clé de l'éradication de la pauvreté et de la durabilité économique d'un pays. Le contrôle du coût des travaux d'entretien des routes ainsi que le maintien de l'efficacité du système des infrastructures routières est une question importante. A la fin des années 1990, les gestionnaires des infrastructures routières ont commencé à introduire une méthode efficace qui pourrait être utilisée pour résoudre les défauts et les problèmes associés à la construction des routes [147].

En 1996, J. M Worm et A. van Harten ont proposé un modèle de planification de la maintenance de l'infrastructure routière [170]. Leur approche consiste à réduire la complexité de l'optimisation par une structuration hiérarchique en 4 niveaux. Dans les deux niveaux les plus bas niveaux inférieurs, la maintenance par secteur de voie est considérée, d'abord avec un horizon roulant, puis avec un horizon de planification fini et des fenêtres temporelles pour la maintenance.

Dans ces travaux de thèse, H.C Vu a proposé des stratégies de maintenance pour les systèmes multi-composants [161]. Il a développé des stratégies de regroupement (dynamique et stationnaire) en prenant en compte la structure du système. La stratégie de

regroupement qu'on propose dans ces travaux est développée en se basant sur l'approche introduite dans ses travaux. Dans la prochaine section, nous présentons plus en détail cette stratégie.

### 3.3.2 Identification de l'horizon de planification

Dans cette sous-section, nous présentons la manière dont l'horizon de planification, noté  $HZ$  est calculé. C'est un intervalle de temps  $[T_{début}, T_{fin}]$  qui représente la durée où les actions de maintenance préventive seront effectuées. La première date de maintenance d'un composant  $i$  du système  $S$  est déterminée par :

$$t_{i^1} = (T_i^* - age_i(T_{début})) + T_{début} \quad (3.11)$$

où  $T_i^*$  est le pas de maintenance du composant  $i$  et  $age_i(t)$  est l'âge du composant  $i$  à l'instant  $t$ . Pour assurer que tous les composants seront maintenus durant l'horizon de planification, le  $T_{fin}$  est défini de la manière suivante :

$$T_{fin} = \max_i t_i \quad (3.12)$$

Sur cet horizon de planification, la  $j^{\text{ème}}$  occurrence de maintenance d'un composant  $i$  du système  $S$  est déterminée par :

$$t_{ij} = t_{ij-1} + T_i^*, j > 1, t_{ij} \leq T_{fin} \quad (3.13)$$

Dans certains cas où le pas de remplacement est trop petit, il est plus intéressant de prendre un horizon de planification tel que  $T_{fin}$  sont un multiple du  $\max_i t_i$ . L'horizon de planification est donc :

$$HZ = \left[ T_{début}, a * \max_i t_i \right] \text{ avec } a \geq 2 \quad (3.14)$$

Dans cette thèse,  $T_{début} = 0$ , on suppose que l'horizon de planification débute juste après avoir remplacé tous les composants du système. Il résulte donc que l'équations 3.11 et 3.14 deviennent :

$$t_{i^1} = T_i^* \quad (3.15)$$

$$HZ = \left[ 0, a * \max_i t_i \right] \text{ avec } a \geq 2 \quad (3.16)$$

La figure 3.8 représente un exemple d'identification d'un cycle de planification de regroupement de maintenance pour une infrastructure routière avec 4 composants : ligne axiale (1), bande d'arrêt d'urgence (2), ligne TPC (3) et la chaussée (4). Dans cet exemple, la chaussée est le dernier composant à maintenir pour la première fois. L'horizon de planification est donc  $HZ = [0, t_{4^1}]$ .

Pour élargir l'horizon de planification, on peut choisir un qui représente un multiple de ce dernier. Un exemple est donné par la figure 3.9 avec deux cycle. Dans ce cas,  $HZ = [0, 2 * t_{4^1}]$ .

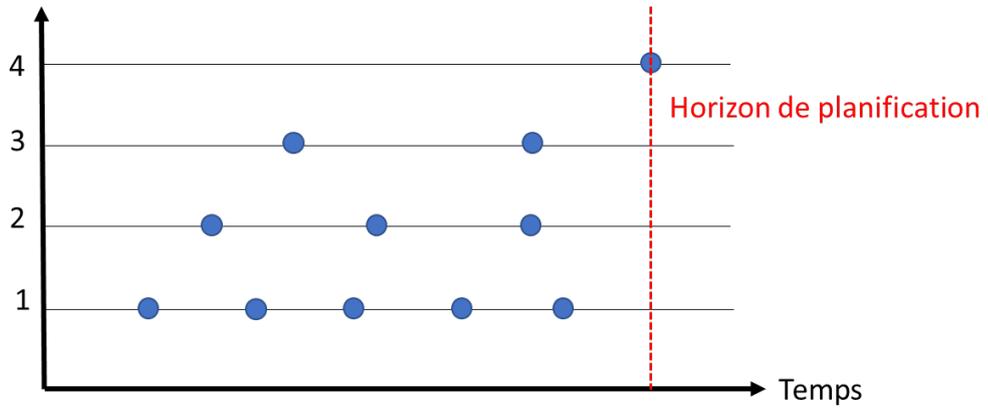


FIGURE 3.8 – Exemple de définition d’horizon de planification pour l’infrastructure routière

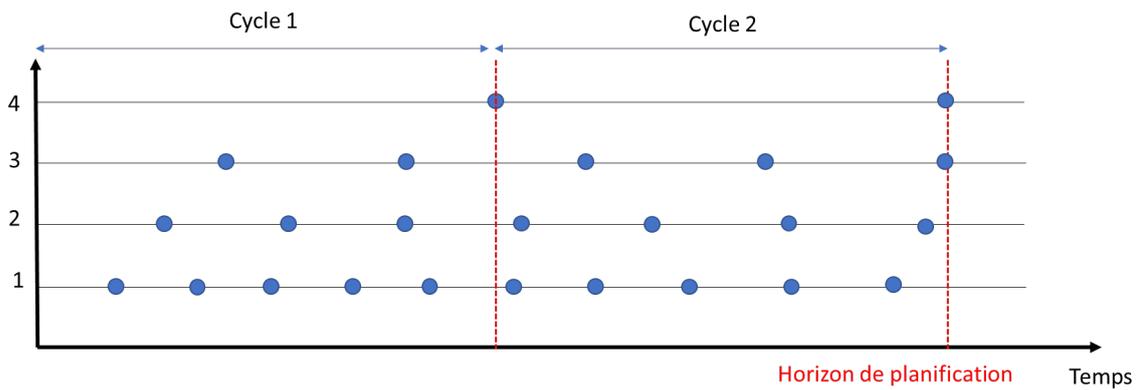


FIGURE 3.9 – Exemple de définition d’horizon de planification pour l’infrastructure routière sur deux cycles

### 3.3.3 Estimation de la solution de regroupement optimale par un algorithme génétique

En ingénierie, différents problèmes nécessitent l'utilisation d'une méthode d'optimisation pour s'approcher ou atteindre la solution optimale. La littérature classe les algorithmes d'optimisation en deux familles : déterministes et métaheuristiques. Certes, les méthodes déterministes répondent à ce besoin, mais les optimums locaux restent un véritable problème. Cependant les méthodes stochastiques dites "métaheuristiques" sont proposées pour éviter ce problème et trouver l'optimum global comme illustré dans [39]. N. Mancor a proposé les techniques les plus utilisées : les algorithmes génétiques (AGs), les algorithmes de colonies de fourmis (ACCO) et l'optimisation d'essaim de particules connu en anglais (Particle Swarm Optimization) (PSO) [108].

L'algorithme PSO est une méthode d'optimisation stochastique développée par Eberhart et Kennedy en 1995 en s'inspirant du comportement social des oiseaux s'assemblant ou le banc de poissons [?]. Selon R. Hassan et al, l'algorithme PSO représente de nombreuses similarités avec les algorithmes génétiques dans le sens où ils sont tous les deux des approches de recherche de la solution optimale basées sur la population et ils dépendent tous les deux du partage d'informations entre les individus de la population de chaque itération pour améliorer leurs processus de recherche en utilisant une combinaison de règles déterministes et probabilistes [?]. Cependant, W. Tfaili a présenté l'algorithme de colonies de fourmis (ACCO) qui est inspiré des déplacements au hasard des fourmis [150]. Quand elles trouvent la nourriture, elles retournent vers leur colonie en marquant le chemin. Quand d'autres fourmis, qui se déplacent aléatoirement, rencontrent ce chemin, il y a de fortes chances qu'elles reprennent ce chemin (tracé) et renforce elle-même ce chemin et les chemins les moins renforcés finissent par disparaître. L'algorithme de colonies de fourmis est basé sur ce principe et a été appliqué au problème du voyageur de commerce par exemple.

Effet, les algorithmes génétiques (AG) sont particulièrement bien adaptés à la résolution de problèmes où l'espace de toutes les solutions potentielles est vraiment énorme et trop vaste pour être exploré de manière exhaustive en un temps raisonnable. Un algorithme génétique est une technique de recherche utilisée en informatique pour trouver des solutions exactes ou approximatives à des problèmes d'optimisation et de recherche. Il est classé dans la catégorie des heuristiques de recherche globale. Il s'agit d'une classe particulière d'algorithmes évolutionnaires qui utilisent des techniques inspirées de biologie évolutive, telles que l'héritage, la mutation, la sélection et le croisement.

Dans la littérature on retrouve plusieurs études d'optimisation qui utilisent cet algorithme. M.S. Samhoury et al ont développé un algorithme génétique comme un outil d'optimisation afin d'identifier les coûts de maintenance pour décider si la maintenance opportuniste est rentable ou non [139]. Ils ont démontré que l'algorithme génétique est très approprié pour le problème de la maintenance opportuniste où les interactions entre les variables compliquent le problème. Le succès de ces algorithmes d'optimisation du coût de la maintenance suggère leur utilisation dans d'autres problèmes d'optimisation dans d'autres domaines industriels, notamment la maintenance et la sécurité.

D'autre part, R. Bris et al ont proposé une approche d'optimisation du coût de la maintenance préventive pour les systèmes série-parallèle en utilisant un algorithme génétique [52]. Tous les calculs sont effectués avec une erreur de 5%, par le niveau de confiance de 90%. Ils ont montré que l'algorithme génétique résout bien leur problème et accélère la recherche de la solution optimale.

Une autre étude menée par G. Morcoux et Z. Lounis a présenté une approche dans le but de déterminer une maintenance optimale pour un réseau d'infrastructure à l'aide d'un algorithme génétique [114]. Les alternatives d'entretien optimales sont les solutions qui minimisent le coût du cycle de vie d'un réseau d'infrastructures tout en répondant aux exigences de fiabilité et de fonctionnalité sur un horizon de planification donné.

En conclusion, l'algorithme génétique reste un des algorithmes les plus adaptés dans le cas de l'optimisation de maintenance. En effet, il possède une grande capacité de recherche robuste qui résout la complexité de calcul des problèmes d'optimisation de grande taille. Pour ces raisons, nous adoptons un algorithme génétique pour chercher la solution de regroupement optimale. Le principe et les étapes de cet algorithme seront présentés en détails dans la section qui suit.

### 3.3.3.1 Algorithme d'optimisation de la solution : Algorithme génétique

L'algorithme d'optimisation utilisé dans ces travaux de recherche est un algorithme génétique. C'est un des algorithmes d'optimisation stochastique et itératif fondé sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Son but est d'optimiser une fonction prédéfinie appelée fonction de "fitness". Ils étaient initialement développés et appliqués par John Holland en 1962 mais c'est au livre de Goldberg [81] qu'ils ont montré leur popularisation plus vulgarisée. La littérature montre que le champ d'application de ces algorithmes est très large. À titre d'exemple, ils sont utilisés en économie [155], en problème d'optimisation sous contraintes [47] et [160] ou en théorie de jeux [164] et [32].

L'algorithme génétique (AG) s'inspire du mécanisme de l'évolution biologique. L'évolution biologique se base principalement sur les étapes suivantes : sélection, croisement et mutation. Pour une population (génération) les génotypes qui s'adaptent au mieux à l'environnement des phénotypes qu'ils génèrent sont sélectionnés. Ils ont plus de facilité pour se reproduire. À l'étape du croisement, seuls les gènes les plus performants se reproduisent. Pour éviter les erreurs de copies de chromosomes, on introduit par ailleurs de nouveaux gènes en provoquant des mutations. Dans la population, la sélection continue des génotypes avec la performance relative la plus élevée conduit à une amélioration de l'adaptation de cette population à son environnement (cela correspond alors à une augmentation de la performance moyenne).

Les AGs cherchent à appliquer le même processus de reproduction. Le lien qui existe entre les génotypes et les phénotypes correspond alors au codage qu'on retient pour l'espace des paramètres du problème qu'on cherche à résoudre. À cette étape, pour chaque individu, représentant une solution, une structure de données est alors associée. Dans

la littérature, il existe plusieurs types de codage principalement classés en deux types : codage binaire qui est une représentation comme son nom l'indique sous forme de chaîne binaire et le codage réel qui est une représentation directe des valeurs réelles de la variable. Dans notre cadre de recherche, nous adoptons un autre codage plus adapté à notre problématique. Une solution candidate est représentée par un tableau  $X$  de taille  $M$ , où  $M$  est le nombre d'actions de maintenance à exécuter pendant l'horizon de planification. Ce codage est proposé par H. Vu [160]. Le tableau  $X$  est donc défini en appliquant la fonction suivante :

$$i^j \in G^k \implies X(i^j) = k; k \in [1, \dots, (M - 1)] \quad (3.17)$$

- $i^j$  représente la  $j^{eme}$  occurrence de maintenance du composant  $i$ .
- $G^k$  le groupe d'actions de maintenance.

À titre d'illustration, supposant avoir un système à 4 composants et 6 actions de maintenance planifiées sur l'horizon de planification. La figure 3.10 illustre deux exemples de codage de solution. La première avec 5 groupes et la deuxième avec 4 groupes.

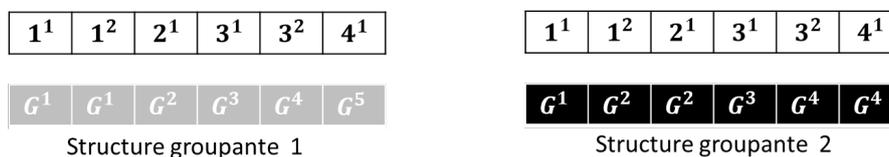


FIGURE 3.10 – Exemple de structure groupante

Un algorithme génétique démarre alors avec une population composée par un tirage aléatoire de  $N_{pop}$  individus suivant le codage prédéfini. Cette étape est suivie par les trois phases indispensables pour cet algorithme : la phase de sélection, la phase de croisement et la phase de mutation. Le principe de chaque phase est détaillé dans les paragraphes qui suivent.

### Phase de sélection

Contrairement à d'autres méthodes d'optimisation, les algorithmes génétiques ne prennent pas en compte la régularité de la fonction objective. La fonction à optimiser peut être ainsi le résultat d'une simulation. La phase de la sélection permet d'identifier les meilleurs individus de chaque population et d'éliminer les mauvais. Elle a pour principe d'attribuer à chaque individu d'une population un score proportionnel à son fitness. En fonction de son score, un individu est sélectionné pour les étapes qui suivent (croisement et mutation). Cette étape peut-être considérée la plus importante, car elle permet aux individus de survivre, de se reproduire ou de mourir.

De nombreuses méthodes de sélection sont présentes dans la littérature. La technique la plus utilisée est "Roulette wheel selection". Le principe de cette méthode est de classer par ordre croissant, en  $s$  groupes, les solutions en fonction de leur fonction objective. Plus un individu est bien adapté, plus la probabilité de sa survie et de son accouplement est plus grande. Cette méthode suppose que la probabilité de sélection un individu est

proportionnelle à l'aptitude de ce dernier [104].

Pour cette méthode, nous effectuons en quelque sorte autant de tirages avec remise qu'il y a d'éléments dans la population. La probabilité  $P_i$  pour que l'individu  $i$  soit sélectionné pour la prochaine itération est défini par l'équation 3.18 où  $F_i$  est la fonction objective associée à l'individu  $i$ .

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{N_{pop}} F_j} \quad (3.18)$$

Elle peut être présentée sous forme d'une roue de loterie biaisée. Cette méthode peut rencontrer des difficultés dans le cas où la dimension de la population est réduite. La "Stochastic remainder without replacement selection" évite ce type de problème et dans certains cas peut donner de meilleurs résultats en fonction du domaine de l'application.

Dans le cas de l'optimisation de la maintenance pour l'infrastructure routière, la fonction objective représente le profit économique, noté PE, que l'on tirera du regroupement des actions de maintenance. Pour chaque individu de la population, le PE est calculé. Les individus sont donc classés en  $s$  groupes. Le premier (groupe 1) contient les solutions avec les profits économiques les plus bas et le dernier groupe (groupe  $s$ ) contient les solutions avec les profits économiques les plus intéressants. Une solution est ensuite choisie en fonction de sa probabilité de sélection  $p_j$  avec  $p_1 < p_2 < \dots < p_s$ ,  $\sum_{j=1}^s p_j = 1$ . La probabilité qu'un individu soit sélectionné est donc proportionnelle à sa performance.

### Phase de croisement

L'étape de croisement consiste à reproduire de nouveaux individus à partir des individus choisis à l'étape de la sélection, appelés parents. Les nouveaux individus, ou les enfants, sont formés en croisant les deux parents. On choisit une position aléatoire  $k$  entre  $[1, M - 1]$  où  $M$  est la longueur du gène. Le croisement se fait donc à la position  $k$  en échangeant les deux bits de la position  $k + 1$  à  $l$ . La figure 3.11 illustre cette méthode. La méthode de croisement permet donc de nouveaux individus en conservant quelques caractéristiques des parents.

### Phase de mutation

L'opérateur de mutation a pour but d'éviter les sélections locales optimales. À cette étape, on modifie aléatoirement un gène, avec une probabilité souvent fixée entre 0.2% et 2%. Dans notre cas d'étude et suivant le codage de la solution (ou le codage du gène), une action de maintenance est déplacée d'un groupe à un autre. De ce fait, une nouvelle solution est donc générée. La figure 3.12 illustre cette étape.

### Phase de réparation

Dans le cadre de regroupement d'action de maintenance, certaines solutions ne sont pas acceptables et représentent quelques défauts. L'étape de réparation a donc pour but

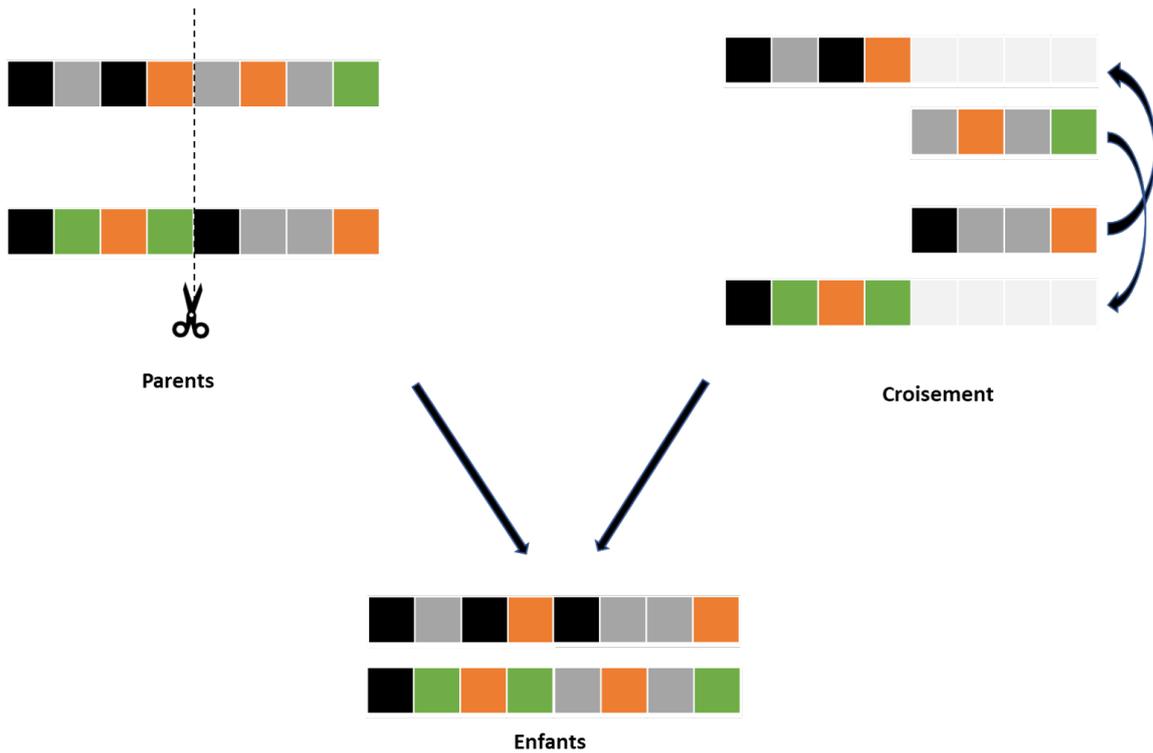


FIGURE 3.11 – Phase de croisement

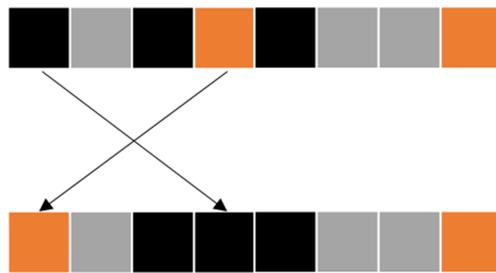


FIGURE 3.12 – Phase de mutation

de corriger les anomalies présentes.

- Si deux actions de maintenance  $i^l$  et  $i^k$  appartiennent au même groupe  $u$  avec  $l < k$ ,  $i^k$  est déplacée aléatoirement vers un autre groupe  $v$  avec  $u \neq v$ .
- Si  $X(i^j) = v$  et  $X(i^l) = u$  avec  $j < l$  et  $t_{G^v} > t_{G^u}$  alors les deux actions de maintenance sont permutées ( $X(i^j) = u$  et  $X(i^l) = v$ ).

La réparation de la solution groupante reste propre pour chaque problématique et doit être adaptée aux contraintes de regroupement relatives à chaque système multi-composants.

### 3.3.4 Optimisation des fonctions de coût de maintenance

#### 3.3.4.1 Regroupement des actions de maintenance : problématique

Dans cette partie, la durée de maintenance préventive ou corrective est supposée négligeable devant la durée de vie des composants du système. La date du début et de la fin de maintenance est la même et le temps d'arrêt du système est toujours négligeable. Selon les travaux de H. Vu [160], même si le temps d'arrêt du système est négligé, l'arrêt du système peut entraîner des coûts d'arrêts qui peuvent être dûs à :

- Perte de fonctionnalité du système.
- Coût de redémarrage du système.
- Perte de qualité des produits du système.

Quel que soit le motif d'arrêt du système, deux types de coût d'arrêt sont à prévoir :

- La maintenance préventive du système conduit à un arrêt planifié du système ce qui engendre un coût d'arrêt planifié noté  $C_p^{sys}$ .
- Un coût d'arrêt non-planifié  $C_u^{sys}$  est engendré lorsque le système est en arrêt à cause d'une panne (maintenance corrective).

#### Remarque :

Le coût d'arrêt non planifié est toujours plus cher qu'un coût d'arrêt planifié [160].

#### Coût de maintenance préventive :

Lors d'une action de maintenance préventive, les coûts suivants doivent être payés.

- Coût de mise en oeuvre de l'action de maintenance noté  $S_p$ . Il est indépendant du composant à maintenir.
- Coût spécifique de maintenance préventive  $CS_{p(i)}$  du composant  $i$ .
- Coût d'arrêt planifié  $C_{sp}$  lorsque le composant à entretenir est critique. Ce coût dépend de la position du composant dans le système.

Le coût de maintenance d'un composant  $i$  du système  $S$  est donné par :

$$C_{p(i)} = S_p + \pi_i \cdot CS_{p(i)} + C_{sp(i)} \quad (3.19)$$

où  $\pi_i$  est définie par :

$$\pi_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ est un composant critique} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.20)$$

### Coût de maintenance corrective :

Si une action de maintenance corrective doit être appliquée sur un composant  $i$ , le coût à payer est donné par :

$$C_{c(i)} = S_c + CS_{c(i)} + \pi_i \cdot C_{snp(i)} \quad (3.21)$$

- $S_c$  coût de mise en oeuvre à payer pour une maintenance corrective.
- $CS_{c(i)}$  coût de maintenance correctif du composant  $i$ .
- $C_{snp(i)}$  coût d'arrêt non planifié.

#### 3.3.4.2 Stratégie de regroupement des actions de maintenance :

La stratégie de regroupement de maintenance proposée dans ce manuscrit est pilotée par les travaux de H.C VU [160]. Le regroupement des actions de maintenance peut économiser le coût de mise en oeuvre. En effectuant  $k$  actions de maintenance préventives simultanément, un seul coût de mise en oeuvre  $S^p$  est à prévoir. D'autres coûts sont à payer lors du regroupement des opérations de maintenance.

Soit  $G^k$  un groupe de composants dont les opérations de maintenance préventives sont effectuées à l'instant  $t_{G^k}$ . Le profit économique pour ce groupe est partagé en 3 parties :

- La réduction du coût de mise oeuvre : en regroupant les actions de maintenance, un seul coût de mise en oeuvre est nécessaire. Pour un groupe  $G^k$  il est donné par :

$$U_{G^k} = [\text{card}(G^k) - 1] \cdot S^p \quad (3.22)$$

avec  $\text{card}(G^k)$  le nombre d'actions de maintenance à effectuer dans le groupe  $G^k$ .

- Coût de pénalité dû à la réduction de la durée de vie d'un composant si la date de l'exécution de la maintenance regroupée est avant la date de maintenance optimale du composant, ou à l'augmentation de la probabilité de tomber en panne si la date de la maintenance regroupée est retardée par rapport à la date de maintenance optimale du composant.
- Coût d'arrêt planifié qui change en fonction des composants à maintenir conjointement. La maintenance d'un composant d'un système en série aboutie à un arrêt du système. Cet arrêt peut être une opportunité pour entretenir d'autres composants. La maintenance regroupée économise le coût de mise en oeuvre, mais aussi le coût lié à l'arrêt du système.

### Coût de pénalité

Il est dû aux changements des dates d'exécution des maintenances. Soit  $G^k$  un groupe d'opérations de maintenance à effectuer à l'instant  $t_{G^k}$ . Une action  $i^j \in G^k$  a subi une modification concernant la date optimale de maintenance. Le coût de pénalité est noté  $\Delta H_{G^k}^1$  et est calculé de la manière suivante.

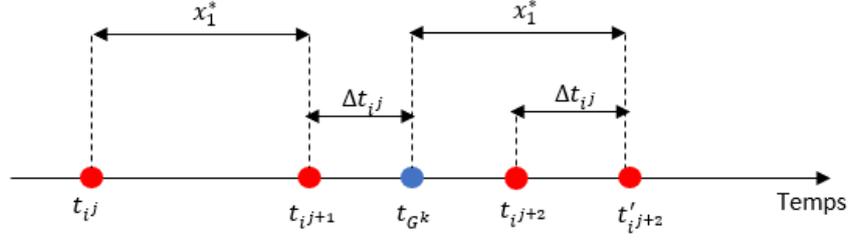


FIGURE 3.13 – Changement de date d'exécution de maintenance

Lorsqu'une opération  $i^{j+1}$  est effectuée à l'instant  $t_{G^k} = t_{ij+1} + \Delta t_{ij+1}$  au lieu de  $t_{ij+1}$ , un coût  $h_i(\Delta t_{ij})$  est à prévoir. Ce changement de date de maintenance peut influencer sur :

- Le coût espéré total de détérioration  $E[MC_i(T_i^* + \Delta t_{ij})] - E[MC_i(T_i^*)]$ , en supposant que la durée de maintenance est négligeable, le changement de temps de fonctionnement d'un composant  $i$  est égal à  $\Delta t_{ij}$ .
- Le coût  $(\Delta t_{ij} \cdot C_i^*)$  car toutes les prochaines dates de maintenance sont décalées de  $\Delta t_{ij}$ .

La formulation mathématique de  $h_i(\Delta t_{ij})$  est donnée par [160] :

$$\begin{aligned} h_i(\Delta t_{ij}) &= E[MC_i(T_i^* + \Delta t_{ij})] - E[MC_i(T_i^*)] - \Delta t_{ij} \cdot C_i^* \\ &= C_{c(i)} \cdot \left( \frac{T_i^* + \Delta t_{ij}}{\alpha_i} \right)^{\beta_i} - C_i^c \cdot \left( \frac{T_i^*}{\alpha_i} \right)^{\beta_i} - \Delta t_{ij} \cdot \frac{C_{p(i)} \beta_i}{T_i^* (\beta_i - 1)} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Pour un groupe d'action de maintenance  $G^k$ , la date d'exécution de la maintenance regroupée  $t_{G^k}$  est trouvée lorsque  $\Delta H_{G^k}^{1*}$  atteint son minimum.

$$\Delta H_{G^k}^{1*} = \min_{t_{G^k}} \Delta H_{G^k}^1(t_{G^k}) = \min_{t_{G^k}} \sum_{i^k \in G^k} h_i(t_{G^k} - t_{ij}) \quad (3.24)$$

- Le coût d'arrêt planifié  $\Delta H_{G^k}^2$  car ce coût dépend du regroupement des actions de maintenance. Il est donné par [160] comme suit :

$$\Delta H_{G^k}^2 = CT_p(G^k) - CT_s \bar{G}^k \quad (3.25)$$

- $CT_p(G^k)$  le coût total d'arrêt planifié lorsque toutes les actions de maintenance sont effectuées à l'instant  $t_{G^k}$ . Il est défini par

$$CT_p(G^k) = C_{P(sys)} \cdot \pi_{G^k} \quad (3.26)$$

- $CT_s \bar{G}^k$  le coût d'arrêt planifié lorsque les actions de maintenance sont effectuées séparément. Il est défini par

$$CT_s \bar{G}^k = C_{P(sys)} \cdot \sum_{ij \in G^k} \pi_i \quad (3.27)$$

Le profit économique  $PE$  d'un groupe d'action de maintenance est donné par :

$$PE(G^k) = U_{G^k} - \Delta H_{G^k}^{1*} - \Delta H_{G^k}^2 \quad (3.28)$$

Si  $PE(G^k) < 0$ , le groupe  $G^k$  représente une dépendance économique négative. Dans ce cas, effectuer les actions de maintenance séparément est plus rentable. Dans le cas où  $PE(G^k) > 0$ , le coût de maintenance peut être économiser en effectuant la maintenance simultanément.

### Profit économique total du regroupement :

À partir du profit économique de chaque groupe, le profit économique total  $PET$  est donné comme la somme des profits économiques sur l'horizon de planification. Soit une structure groupante  $SG$  définie comme une collection de  $m$  groupes mutuellement exclusif tel que : avec  $\{A, \dots, M\}$  est la partition de l'ensemble des actions de maintenance sur l'horizon de planification  $HZ$ .

avec  $\{A, \dots, M\}$  est la partition de l'ensemble des actions de maintenance sur l'horizon de planification  $HZ$ .

$$PET(SG) = \sum_{G^k \in SG} PE(G^k) \quad (3.29)$$

## 3.4 Stratégie de regroupement d'actions de maintenance statique d'une infrastructure routière

La stratégie de regroupement d'actions de maintenance tout au long de ces travaux est illustrée à travers un cas d'étude en utilisant la route simulée préalablement présentée dans le chapitre 2 : les lignes de marquage (ligne axiale, bande d'arrêt d'urgence et la ligne centrale de la Route Nationale 4 (RN4) et du suivi des fissures des autoroutes du Texas.

Nous rappelons que la stratégie de regroupement proposée dans ce manuscrit est un processus en 4 étapes :

**Étape 1** : Analyse des données de retours d'expérience des composants de la route

**Étape 2** : Classification des sections de route suivant leur modèle de dégradation

**Étape 3** : Identification de pas optimal de remplacement pour chaque composant du système

**Étape 4** : Regroupement des actions de maintenance

La stratégie de regroupement de maintenance proposée dans ce chapitre se base sur un historique de suivi du système. À partir de l'analyse des données d'inspections des

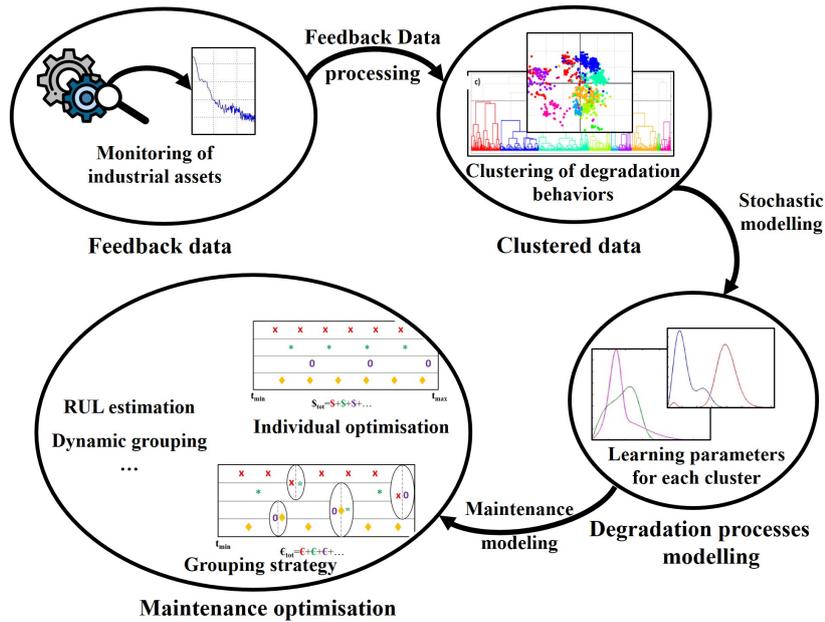


FIGURE 3.14 – Stratégie de regroupement

différents composants du système, des zones stratégiques de maintenance sont déterminées à l'aide d'une classification (chaque cluster regroupe les composants qui se dégradent de la même façon.) Ensuite, une politique de maintenance préventive optimale est attribuée pour chaque cluster (chaque zone). La dernière phase de ce processus est de définir le regroupement optimal des actions de maintenance en considérant les dépendances entre les composants.

### 3.4.1 Modèle de durée de vie et remplacement systématique par rapport à l'âge

#### 3.4.1.1 Modèle de durée de vie pour les données censurées

Les composants de l'infrastructure, que cela soit le marquage routier ou la chaussée (couche de roulement) sont considérés en état limite de service selon des critères prédéfinis. Un marquage rétro réfléchissant est, dans ces travaux, dit en état limite de service si son niveau de rétro réflexion est inférieur à un seuil minimal précédemment défini. D'autre part, la chaussée est dite en état limite de service si son niveau de fissuration dépasse un seuil maximal préalablement fixé.

Comme illustré précédemment, les composants de l'infrastructure routière sont périodiquement inspectés. Dans ce cas, la date exacte où un composant passe de l'état de marche à l'état de service limite n'est pas toujours observée. Une analyse de durée de vie est donc proposée pour estimer cette date.

## Durées de vie censurées et algorithme EM

Le travail présenté par M. Redondin [134] s'est appuyé sur ceux de S. Sathyanarayanan et al [142] qui ont étudié la dégradation du marquage au routier avec une approche fiabiliste. Ils ont proposé une méthode se basant sur le Maximum de Vraisemblance (MV) à partir des durées de vie. Cette méthode permet aussi d'estimer les paramètres d'un modèle de régression, sous l'hypothèse que la "vraie" loi de distribution est connue. Le MV est une méthode générale d'estimation proposée par Fisher en 1922. Elle possède des propriétés statistiques très intéressantes comme la convergence et la normalité asymptotique.

La méthode de MV est donc une approche pour estimer les paramètres  $\theta$  d'une loi  $X$  donnée en se basant sur un échantillon de données indépendantes complètes  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ . La vraisemblance quantifie la probabilité dont les observations proviennent effectivement d'un échantillon théorique de la loi  $X$ .

### Définition :

Soit  $X$  une loi de probabilité continue sur  $\mathbf{R}$  et  $n$  un entier. Notons  $f_\theta$  la densité de probabilité de la loi  $X$ . On appelle vraisemblance associée à  $X$ , la fonction qui à un  $n$ -uplet  $(x_1, \dots, x_n)$  d'éléments de  $C$  et à une valeur  $\theta$  du paramètre associe la quantité :

$$L(x_1, \dots, x_n, \theta) = \prod_{i=1}^n f_\theta(x_i) \quad (3.30)$$

Estimer un paramètre par la méthode du maximum de vraisemblance consiste à proposer comme valeur de ce paramètre celle qui rend maximale la vraisemblance, à savoir la probabilité d'observer les données comme réalisation d'un échantillon de la loi  $f_\theta$ . La fonction  $L$  étant elle-même une densité de probabilité, l'estimation du paramètre  $\theta$  garantit que les événements  $x_1, \dots, x_n$  sont les plus probables.

Comme indiqué précédemment, l'estimation par la méthode du Maximum de Vraisemblance nécessite un échantillon "complet". Dans le cas d'inspections périodiques, les données sont dites "censurées". Trois cas de censure sont observés :

- Censure à gauche si la défaillance se produit avant la première inspection ou que le  $T_o$ , la date de début d'observation, est inconnue.
- Censure par intervalle si la défaillance a eu lieu entre deux inspections.
- Censure à droite si la défaillance n'a jamais été observée durant la période d'observation ou avant que ce dernier ne soit maintenu.

Dans ce cas, une modification de la méthode du MV doit être utilisée pour prendre en compte les données censurées. Les travaux de M. Redondin [134] et Pradi et al [127], ont proposé un algorithme "Expectation Maximization (EM)" pour corriger les censures présentes dans les données. La méthode proposée dans les travaux de M. Redondin est celle qui sera adoptée pour mes travaux. Dans les prochains paragraphes, cette approche sera détaillée.

L'algorithme EM a été proposé par Dempster, Laird et Rubin ([67]) en 1977. C'est une approche itérative pour estimer le maximum de vraisemblance lorsque celui-ci n'admet

pas d'expression explicite et dans le cas de données incomplètes (données manquantes, censurées ou tronquées). L'idée principale de cet algorithme est de "transformer" les durées de vie incomplètes en durées de vie complètes. D'après l'article de F. Santos l'algorithme EM tire son nom de ses deux étapes principales qui sont opérées à chaque itération [141] :

- L'étape E (Expectation) procède, comme son nom l'indique, à estimer les données inconnues, sachant les données observées et les paramètres déterminés à l'itération précédente ;
- l'étape M (Maximisation), procède à la maximisation de la vraisemblance, rendue désormais possible en utilisant l'estimation des données inconnues effectuée à l'étape précédente, et met à jour la valeur du ou des paramètres pour la prochaine itération.

En résumé, cet algorithme fonctionne suivant un mécanisme naturel : dans le cas de présence d'un obstacle pour pouvoir appliquer la méthode MV, on fait sauter cet obstacle et on applique ensuite cette méthode.

Dans ce manuscrit, les travaux de correction de censure se basent sur l'algorithme présenté dans les travaux de thèse de M. Redondin [134]. La méthode utilisée est détaillée le long de cette section. Soit  $W$  une durée de vie qui suit la loi de Weibull de paramètre  $\alpha$  et  $\beta$  dont la fonction de densité est donnée par l'équation 3.31.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} & \text{si } t > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.31)$$

Le paramètre d'échelle  $\alpha > 0$  s'exprime dans la même unité que la durée de vie  $W$  (heures, jours, années ...) et  $\beta > 0$ , le paramètre de forme, est sans dimension et indique une survie totale du lot entre 0 et  $\beta$  ainsi qu'une densité de probabilité nulle durant cette période.

- Si  $\beta < 1$ , alors le niveau du fonctionnement du système s'améliore.
- Si  $\beta = 1$ , alors le système ne subit ni usure et ni fatigue.
- Si  $\beta > 1$ , alors le système subit une fatigue ou/et de l'usure. Dans ce cas, trois situations existent :
  - Si  $\beta \in ]1, 3]$  alors le système subit une fatigue.
  - Si  $\beta \in ]3, 4]$  alors le système subit une usure.
  - Si  $\beta > 4$  alors la loi de Weibull est dite à valeurs extrêmes.

Afin de simplifier le formalisme de l'algorithme EM, [134] et [127] proposent de faire un changement de variable. Dans ce cas  $\alpha \leftarrow 1/\alpha^\beta$ . Cette modification rend la fonction de densité de la loi de Weibull  $W(\alpha, \beta)$  comme indiqué par l'équation 3.32.

$$f(t) = \begin{cases} \alpha \beta t^{\beta-1} e^{-\alpha t^\beta} & \text{si } t > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.32)$$

La fonction de répartition est donnée par  $F(t) = 1 - R(t)$  avec  $R(t) = e^{-\alpha t^\beta}$ . Soit

$C_i$  un composant du système avec  $W_i = (t_1, \dots, t_n)$  durées de vie indépendamment et identiquement distribuées (i.i.d). Le vecteur  $W_i$  représente les instants de la défaillance du composant  $C_i$ . Comme les inspections sont considérées périodiques, les instants exacts sont censurés suivant les 3 types de censures présentés précédemment. Dans ce cas un indicateur de types de censures associé à  $W$  est introduit :

$$\forall i = 1, \dots, n, \delta_i = \begin{cases} 0 & \text{si } t_i \text{ est exacte} \\ 1 & \text{si } t_i \text{ est censuré à gauche} \\ 2 & \text{si } t_i \text{ est censuré par intervalle} \\ 3 & \text{si } t_i \text{ est censuré à droite} \end{cases} \quad (3.33)$$

Dans le cas, le vecteur  $W$  est divisé en fonction de l'indicateur de censure :

$$W_e = \{t \in ((t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)) / \delta_i = 0\} \quad (3.34)$$

$$W_g = \{t \in ((t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)) / \delta_i = 1\} \quad (3.35)$$

$$W_I = \{t \in ((t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)) / \delta_i = 2\} \quad (3.36)$$

$$W_d = \{t \in ((t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)) / \delta_i = 3\} \quad (3.37)$$

Quand les données présentent des censures, l'estimation des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  de la loi de Weibull ne se résume pas à l'application de la méthode de MV. Afin de prendre en considération tous les types de censures, la fonction de vraisemblance associée à une loi de Weibull devient :

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{t \in W_e} f_E(t) \prod_{t \in W_g} F_L(t) \prod_{t \in W_I} R_I(r) - R_I(l) \prod_{t \in W_d} R_R(t) \quad (3.38)$$

Dans le cas du marquage routier, [131] et [142] proposent d'utiliser la méthode Newton-Raphson sans préciser la raison de ce choix. Mais cette approche diverge selon Pradhan et al qui ont proposé une alternative qui se base sur l'algorithme EM [127].

L'algorithme EM interprète les données censurées comme des données manquantes à estimer et est itératif sur deux phases :

- L'étape  $E$  estime les données censurées en fonction d'une loi de Weibull donnée  $W(\alpha, \beta)$ .
- La phase  $M$  paramètre une loi de  $W(\alpha, \beta)$  par la méthode de MV en fonction des défaillances exactes et estimées.

### Etape d'Espérance

L'objectif de l'étape  $E$  est de construire la fonction de vraisemblance complétée 3.38 définie comme l'espérance de la vraisemblance conditionnée par les défaillances exactes.

$$L_c(\alpha_k, \beta_k) = \mathbf{E}[L(\alpha_k, \beta_k) | \tau] \quad (3.39)$$

Cette espérance conditionnelle produit trois estimateurs  $\hat{x}_k$ ,  $\hat{y}_k$  et  $\hat{z}_k$  qui s'adaptent respectivement à la censure gauche, par intervalle et à droite. Les estimateurs sont ensuite injectés dans la fonction de vraisemblance.

### Etape de Maximisation

L'étape  $M$  correspond à la méthode  $MV$  d'une loi de Weibull muti-censurée. A chaque itération  $k$ , les paramètres  $(\alpha_k, \beta_k)$  de la loi de Weibull sont estimés par les zéros des dérivées partielles de la fonction de log-vraisemblance complétée.

$$\begin{aligned} \ln L(\alpha_k, \beta_k) = & n(\ln \alpha_k + \ln \beta_k) \\ & + (\beta_k - 1) \left[ \sum_{t \in W_e} \ln \hat{t} + \sum_{x_k \in W_g} \ln \hat{x}_k + \sum_{y_k \in W_I} \ln \hat{y}_k + \sum_{z_k \in W_d} \ln \hat{z}_k \right] \\ & - \alpha_k \left[ \sum_{t \in W_e} t^{\beta_k} + \sum_{x_k \in W_g} x_k^{\beta_k} + \sum_{y_k \in W_I} y_k^{\beta_k} + \sum_{z_k \in W_d} z_k^{\beta_k} \right] \end{aligned} \quad (3.40)$$

Pour trouver les valeurs de  $\alpha_k$  et  $\beta_k$ , il faut résoudre le système d'équations  $\left\{ \frac{\partial \ln L}{\partial \alpha_k} = 0, \frac{\partial \ln L}{\partial \beta_k} = 0 \right\}$ . L'estimateur du paramètre  $\alpha$  à chaque itération  $k$  est donné par 3.41 :

$$\hat{\alpha}_k = \frac{n}{\sum_{t \in \delta_e} t^{\beta_k} + \sum_{x_k \in \delta_g} x_k^{\beta_k} + \sum_{y_k \in \delta_I} y_k^{\beta_k} + \sum_{z_k \in \delta_d} z_k^{\beta_k}} \quad (3.41)$$

Comme indiqué par l'équation 3.41, la valeur de  $\alpha_k$  dépend de la valeur  $\beta_k$ . Dans ce cas, un estimateur optimal de  $\beta_k$  est suffisant. Quand la valeur  $\alpha_k$  est remplacée par la valeur de son estimateur donnée dans l'équation 3.41, une fonction  $g(\beta_k)$  telle que  $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_k} = g(\beta_k) - \beta_k$  est déterminé par l'équation  $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_k} = 0$ .

Un point fixe de  $g$  est une valeur de  $\beta_k$  vérifiant  $g(\beta_k) = \beta_k$  estimée par le point de convergence de la suite 3.42 initiée par la précédente estimation  $\beta_{k-1}$ . Le point  $\beta_k$  estimé,  $\alpha_k$  est directement déduit par la résolution de l'équation  $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_k}$ .

$$(b_n)_{n>0} = \begin{cases} b_0 = \beta_{k-1} & \text{si } n = 0 \\ b_n = g(b_{n-1}) & n > 0 \end{cases} \quad (3.42)$$

### Arrêt de l'algorithme

Comme indiqué précédemment, l'algorithme EM est itératif. Chaque itération  $k$  a pour but d'estimer  $\beta_k$  et par la suite de déduire la valeur de  $\alpha_k$ . La suite itérative  $(\beta_k)_{k \geq 0}$  définie par l'équation 3.43 correspond à la convergence du paramètre  $\beta$ . Le critère d'arrêt à une itération  $k$  est donné par  $|b_n - b_{n-1}| < 10^{-4}$  comme proposé par M. Redondin [131].

$$(\beta_k)_{k \geq 0} = \begin{cases} \beta_0 > 0 \\ \beta_k = \lim_{n \rightarrow +\infty} \begin{cases} b_0 = \beta_{k-1} \\ b_n = g(b_{n-1}) \end{cases} \end{cases} \quad (3.43)$$

Par conséquent, le critère d'arrêt de l'algorithme  $WEM$  est donné par 3.44. L'arrêt est donc réalisé si  $|\beta_k - \beta_{k-1}| < 10^{-4}$ . Pour revenir à la définition standard d'une loi de Weibull donnée par 3.31, il suffit d'appliquer le changement  $\alpha \leftarrow 1/\sqrt[\beta]{\alpha}$ .

$$\begin{cases} \beta = \lim_{k \rightarrow +\infty} (\beta_k)_{k \geq 0} \\ \alpha = \frac{n}{\sum_{t \in \delta_e} t^\beta + \sum_{x_k \in \delta_g} x_k^\beta + \sum_{y_k \in \delta_I} y_k^\beta + \sum_{z_k \in \delta_d} z_k^\beta} \end{cases} \quad (3.44)$$

### 3.4.1.2 Modèle de durée de vie pour l'infrastructure routière

Maintenant, que les clusters sont définis, l'analyse de durée de vie de chacun est donc appliquée. L'algorithme *EM* présenté préalablement dans ce chapitre est utilisé pour chaque cluster et chaque ligne de marquage. Le tableau 3.1 résume l'analyse de durée de vie de chaque cluster. La première colonne indique le numéro du cluster, le nombre de points de repère qu'il contient et la fréquence qu'il représente. Les trois dernières colonnes contiennent les lois de Weibull associées.

Typographie	Ligne axiale	Bande d'arrêt d'urgence	Ligne TPC
Cluster – Nombre de PR (Fréquence)	Paramètre de la loi de Weibull	Paramètre de la loi de Weibull	Paramètre de la loi de Weibull
1 - 94 (9%)	$\mathcal{W}(21.84; 2.01)$	$\mathcal{W}(23.8; 2.02)$	$\mathcal{W}(30.34; 6.64)$
2 - 140 (12%)	$\mathcal{W}(14.89; 1.14)$	$\mathcal{W}(29.12; 1.95)$	$\mathcal{W}(32.81; 1.74)$
3 - 111 (11%)	$\mathcal{W}(19.54; 1.5)$	$\mathcal{W}(24.19; 1.26)$	$\mathcal{W}(26.6; 7.38)$
4 - 111 (1%)	$\mathcal{W}(19.46; 1.48)$	$\mathcal{W}(15.93; 1.8)$	$\mathcal{W}(24.79; 1.55)$
5 - 16 (2%)	$\mathcal{W}(11.13; 1.43)$	$\mathcal{W}(25.34; 1.97)$	$\mathcal{W}(32.23; 0.64)$
6 - 270 (27%)	$\mathcal{W}(19.72; 1.56)$	$\mathcal{W}(18.19; 2.01)$	<i>Pas de ligne TPC</i>
7 - 40 (4%)	$\mathcal{W}(18.42; 1.43)$	$\mathcal{W}(18.16; 1.98)$	$\mathcal{W}(20.24; 4.27)$
8 - 188 (19%)	$\mathcal{W}(10.85; 1.19)$	$\mathcal{W}(25.29; 3.24)$	<i>Pas de ligne TPC</i>
9 - 48 (5%)	$\mathcal{W}(14.45; 1.14)$	$\mathcal{W}(13.75; 1.15)$	$\mathcal{W}(20.94; 0.93)$
<b>Global - 1001 (100%)</b>	$\mathcal{W}(17.33; 1.37)$	$\mathcal{W}(22.04; 1.81)$	$\mathcal{W}(29.13; 1.9)$

TABLE 3.1 – Analyse de durée de vie pour les clusters et pour chaque ligne de marquages

Le tableau 3.2 donne les paramètres de la loi de Weibull pour les sections de route du Texas. Pour chacun des clusters, l'algorithme EM est appliqué. Les paramètres  $\alpha$  associés aux sections de route du Texas sont supérieurs à 4. Ce qui laisse penser à chercher une autre loi de probabilité plus adaptée. Cependant, le but de ces travaux de thèse est de proposer une stratégie de regroupement des opérations de maintenance pour l'infrastructure routière. Trouver une autre loi de probabilité reste une perspective pour améliorer ces travaux.

### 3.4.1.3 Remplacement systématique par rapport à l'âge

Dans la littérature, une synthèse des stratégies de maintenance préventive est donnée par [66] et [129], la maintenance préventive est classée en 3 grandes familles.

Cluster	Alpha	Beta	Poucentage
1	128.7	7.25	45
2	135.3	6.32	20
3	120.1	6.8	12
4	146.4	5.02	5
5	137.9	6.43	7
6	143.27	6.03	2
7	103.5	5.77	3
8	110.69	4.27	6

TABLE 3.2 – Paramètres de la loi de Weibull associés à chaque cluster

- Maintenance systématique : la maintenance est réalisée à des intervalles de temps prédéterminés. L'action de maintenance est effectuée à un calendrier déterminé. Aucune opération de maintenance n'a lieu avant la date fixée.
- Maintenance conditionnelle : l'action de maintenance dépend de l'analyse de l'évolution d'un ou plusieurs paramètres significatifs de la dégradation et la perte de la performance d'un composant.
- Maintenance prévisionnelle : la maintenance est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté.

Dans ces travaux de thèse, une maintenance systématique par rapport à l'âge est considérée pour les composants d'un système. La stratégie adoptée dans ce manuscrit est celle proposé par [131]. La figure 3.15 illustre le principe de cette stratégie. Si une panne apparaît entre deux dates de remplacement, il est remplacé. L'échéancier est remis à 0. L'intervalle de remplacement  $T^*$  ne doit pas être trop faible pour éviter la sur-maintenance ni trop élevé pour ne avoir un temps d'indisponibilité élevé. Pour déterminer l'intervalle  $T_i^*$  pour le composant  $i$ , la loi du durée de vie est utilisée.

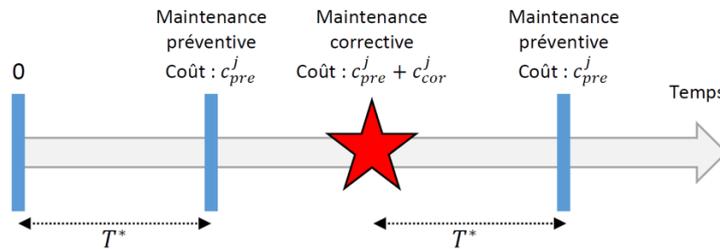


FIGURE 3.15 – Stratégie de remplacement par rapport à l'âge

Selon A. Gharbi et al, cette stratégie consiste à faire un remplacement préventif du composant seulement quand il atteint un âge critique  $T^*$  [79]. La durée de la période  $T^*$  est déterminée de façon à effectuer un remplacement du composant un peu avant le moment où on estime qu'il risque de tomber en panne.

Soit  $i$  un composant du système  $S$  avec une loi de durée de vie donnée par  $\mathbf{W}(\alpha_i, \beta_i)$ . Un coût de maintenance préventive est fixé à  $C_{p(i)}$  et un coût correctif de  $C_{c(i)}$ . Le remplacement du composant  $i$  doit garantir son retour à l'état "aussi bon que neuf". Le théorème de renouvellement identifie la fonction 3.45 comme le coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon de temps infini [129], avec  $F_i$  et  $R_i$  les fonctions de répartition et de fiabilité associés à  $W(\alpha_i, \beta_i)$ .

$$C_i(t) = \frac{C_{p(i)} + C_{c(i)}F_i(t)}{\int_0^t R_i(x)dx} = \frac{C_{p(i)} + C_{c(i)}(1 - e^{-(1/\alpha_i)^{\beta_i}})}{\int_0^t \exp^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} dx} \quad (3.45)$$

Le pas de remplacement optimal est donné en minimisant l'équation 3.45. Il est donc défini par 3.46 :

$$T_i^* = \left\{ T_i / C_i(T) = \min_{t>0} C_i(t) \right\} \quad (3.46)$$

### 3.4.2 Analyse du système :

#### 3.4.2.1 Analyse structurelle du système :

Nous considérons une section de route comme présentée par la figure 3.16. Sur cet exemple, de nombreuses défaillances sont présentes au niveau de la chaussée (fissures longitudinales transversales et nids de poule) et du marquage routier. À titre d'illustration, l'effacement du marquage au niveau de la ligne axiale rend celle-ci non-visible et donc non-lisible par les caméras du véhicule autonome ou automatisé.

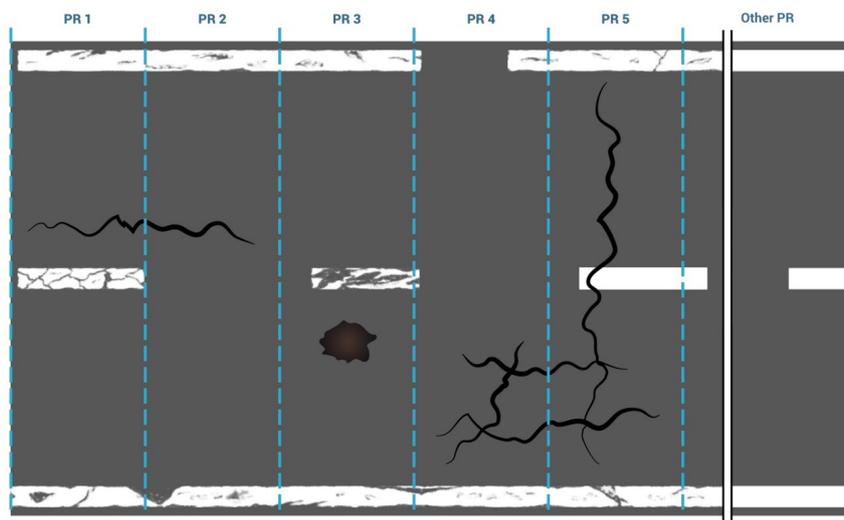


FIGURE 3.16 – Exemple d'infrastructure multi défaillante

Dans ce cas, la section de route est considérée en état de défaillance. Conséquemment, l'infrastructure routière est considérée comme un système en série avec 3 ou 4 composants

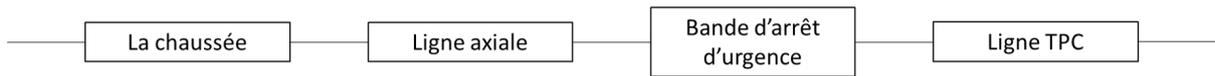


FIGURE 3.17 – Représentation structurelle de l'infrastructure routière

selon le type de route considérée (C.f la figure 3.17).

Comme l'infrastructure routière est considérée comme un système multi-composants en série, la défaillance ou la panne d'un composant entraîne l'arrêt du système. En conséquence, chaque composant représente une coupe minimale, donc il est critique.

#### 3.4.2.2 Analyse stochastique du système :

Comme indiqué dans le chapitre 2 (analyse de données), la visibilité de nuit des marquages routiers se dégrade avec le temps. Le marquage est perçu gris quand il perd de la peinture et devient donc difficile à percevoir. Le marquage routier atteint un seuil critique qui nécessite un remplacement en passant par plusieurs états intermédiaires. Dans ce cas, on parle de modèle de dégradation. Concernant la chaussée, elle est considérée en état neuf quand elle ne représente aucun défaut, au niveau de la forme (ornièrre, affaissement, décalage de joint...) ou niveau de fissuration (longitudinale, transversale...). Dans le cas de mes travaux, une défaillance de la chaussée est présentée par l'apparition de fissures longitudinales. Le niveau de fissuration (ou le pourcentage de fissuration) augmente avec le temps. Quand la chaussée atteint un seuil critique de fissuration, elle nécessite donc une intervention de réparation.

#### 3.4.2.3 Analyse économique du système :

L'infrastructure routière est considérée comme un système en série. La défaillance d'un composant entraîne donc l'arrêt (la défaillance) de tout le système. En conséquence, la dépendance économique entre les composants est positive. Le temps d'arrêt et la durée de maintenance d'un composant en défaillance peuvent être utilisés pour entretenir un ou plusieurs autres composants.

### 3.4.3 Regroupement statique des actions de maintenance :

Comme illustré dans la section 1, le processus de regroupement des actions de maintenance débute par établir un plan de maintenance optimal et individuel pour chaque composant du système. La sous-section qui suit présente la stratégie de maintenance adoptée dans ce cas d'étude.

#### 3.4.3.1 Plan individuel de maintenance :

Le plan individuel appelé aussi le plan provisoire de maintenance est la stratégie de maintenance adaptée pour chaque composant du système lorsque toutes les actions de

Cluster	Paramètres de la loi de Weibull	Pas de remplacement optimal
1	$W(128.7; 7.25)$	132
2	$W(135.3; 6.32)$	140
3	$W(120.1; 6.8)$	128
4	$W(146.4; 5.02)$	142
5	$W(137.9; 6.43)$	123
6	$W(143.27; 6.03)$	125
7	$W(125.7; 7.5)$	103
8	$W(120.3; 5.2)$	142

TABLE 3.3 – Plan de maintenance individuel pour les sections de la chaussée

maintenances sont effectuées d'une manière séparée. Il est établi grâce à la politique de remplacement par rapport à l'âge présentée précédemment. Le pas de remplacement pour chaque cluster est calculé par les équations 3.45 et 3.46. Les résultats obtenus pour le marquage routier sont présentés sur le tableau représenté par la figure 3.18 et ceux de la chaussée par le tableau 3.3.

Typographie	Ligne axiale		Bande d'arrêt d'urgence		Ligne TPC	
	Cluster – Nombre de PR (Fréquence)	Paramètre de la loi de Weibull	Pas de remplacement	Paramètre de la loi de Weibull	Pas de remplacement	Paramètre de la loi de Weibull
1 - 94 (9%)	$W(21.84; 2.01)$	11	$W(23.8; 2.02)$	12	$W(30.34; 6.64)$	19
2 - 140 (12%)	$W(14.89; 1.14)$	14	$W(29.12; 1.95)$	15	$W(32.81; 1.74)$	18
3 - 111 (11%)	$W(19.54; 1.5)$	13	$W(24.19; 1.26)$	28	$W(26.6; 7.38)$	17
4 - 111 (1%)	$W(19.46; 1.48)$	14	$W(15.93; 1.8)$	9	$W(24.79; 1.55)$	16
5 - 16 (2%)	$W(11.13; 1.43)$	8	$W(25.34; 1.97)$	13	$W(32.23; 0.64)$	45
6 - 270 (27%)	$W(19.72; 1.56)$	12	$W(18.19; 2.01)$	9	Pas de ligne TPC	
7 - 40 (4%)	$W(18.42; 1.43)$	14	$W(18.16; 1.98)$	9	$W(20.24; 4.27)$	11
8 - 188 (19%)	$W(10.85; 1.19)$	18	$W(25.29; 3.24)$	13	Pas de ligne TPC	
9 - 48 (5%)	$W(14.45; 1.14)$	14	$W(13.75; 1.15)$	13	$W(20.94; 0.93)$	22
Global - 1001 (100%)	$W(17.33; 1.37)$	14	$W(22.04; 1.81)$	12	$W(29.13; 1.9)$	15

FIGURE 3.18 – Plan de maintenance individuel pour les lignes de marquage

Le tableau 3.18 est composé de 3 parties principales, chacune est allouée pour une ligne de marquage. Pour chaque cluster et pour chaque ligne de marquage, la colonne "Paramètres de la loi de Weibull" présente les paramètres de la loi de Weibull associée. Ces paramètres sont définis en appliquant l'algorithme EM. La deuxième colonne "Pas de remplacement" liste le pas optimal de remplacement des lignes de marquage. Pour les clusters 6 et 8, il n'existe que deux lignes (ligne axiale et la bande d'arrêt d'urgence).

Le tableau 3.3 représente lui même les paramètres de la loi Weibull attribuée pour chaque cluster et aussi les pas de remplacement optimal individuel pour chaque cluster.

La phase qui suit le plan de maintenance individuel du processus de regroupement

présenté dans ce manuscrit est le regroupement des actions de maintenance. Cette étape est illustrée dans la section suivante.

#### **3.4.3.1.1 Regroupement optimal des actions de maintenance**

Quand on passe à la dernière étape du processus de regroupement d'actions de maintenance, on cherche à trouver la meilleure solution qui optimise la fonction objective. Dans notre cas, le regroupement des opérations de maintenance a pour but de minimiser le coût de la maintenance ce qui implique donc de maximiser le profit économique  $PET$  donné par la fonction 3.29.

À cette étape, on fait appel à l'algorithme génétique. Cette phase commence par générer une population initiale. Elle comporte de 100 individus. Chacun est présenté comme un vecteur dont la longueur est égale au nombre des actions de maintenance programmées durant l'horizon de planification préalablement défini. Un individu est construit en suivant le codage présenté précédemment et est donné par l'équation 3.17.

En se basant sur cette population initiale, on calcule le profit économique de chaque solution. Les équations prises en compte à cette étape sont 3.24, 3.25 et 3.29. Le calcul du profit économique total associé à une solution groupante est expliqué par l'algorithme 1.

À la fin de cette étape, les individus sont classés suivant le profit économique à tirer de la stratégie de regroupement. C'est l'étape de la sélection de l'algorithme génétique. Cette dernière vise à identifier les solutions qui ont plus de chance de produire des individus avec profit économique plus optimal. Les autres étapes de l'algorithme génétique s'enchaînent jusqu'à atteindre le nombre d'itérations fixé suivant l'algorithme 2.

Le processus de regroupement d'actions de maintenance a donc besoin des paramètres de la loi de Weibull, les coûts de maintenance préventive et corrective et les indicateurs associés à chaque composant  $i$  du système.

#### **3.4.3.2 Regroupement statique des actions de maintenance de la signalisation horizontale**

Une première application de la stratégie de regroupement statique d'actions de maintenance, est faite uniquement sur le marquage routier. Ce choix est motivé par le regroupement des composants de la même nature. Nous reprenons les données du tableau 3.18 et nous regroupons les actions de maintenance de chaque cluster. La table 3.4 illustre le résultat d'application de la stratégie de regroupement sur les clusters de marquages routiers. La deuxième colonne de cette table représente l'horizon de planification, la colonne qui suit est celle qui donne le regroupement optimal durant l'horizon de planification, la colonne "dates de maintenance" représente la date de maintenance pour chaque groupe suivant la stratégie de regroupement. Les deux dernières colonnes illustrent respectivement le profit économique de chaque sous-système en unité de paiement et en pourcentage de profit.

---

**Algorithm 1:** Calcul du profit économique

---

**Étape 1 :** Générer une population initiale composée de  $N_{pop}$  individus suivant le codage prédéfini. Chaque individu représente une structure groupante  $SG$  avec  $M$  le nombre de groupe.

$$i^j \in G^k \implies X(i^j) = k; k \in [1, \dots, (M - 1)]$$

**Étape 2 :** Déterminer les instants de maintenance de chaque groupe et pour chaque structure groupante

$$t_{G^k}^* = \min_{G^k} \Delta H_{G^k}^1, k = 1, \dots, M$$

**Étape 3 :** Déterminer l'ordre de maintenance (OM)  $OM = (G^1, G^2, \dots, G^m)$  des groupes de SG avec  $t_{G^1}^*, t_{G^2}^*, \dots, t_{G^m}^*$

**Étape 4 :** Initialisation  $k = 1, PET = 0$

**Étape 5 :** Déterminer  $t_{G^k}^*$ , mise à jour du plan provisoire de maintenance et calcul du profit économique total  $PET = PET + PE(G^k)$ .

**Étape 6 :** Mise à jour du plan de regroupement et de l'ordre de maintenance (OM) :

- Mise à jour des dates de maintenance  $t'_{ij} = t_{ij} + \Delta t_{ij}$  avec  $t_{ij} < T_{fin}$
- Mise à jour des ordres (OM)

**Étape 7 :**  $k = k+1$  et retourner à l'étape 5 jusqu'à ce que  $k = M$ .

**Étape 8 :** Répéter les étapes de 2 à 7 pour chaque individu de la population.

---

---

**Algorithm 2:** Algorithme génétique

---

**Initialisation :**

- Nombre d'itération maximal  $N_{iter}$
- $iter = 0$

**Étape 1** La sélection : Une solution groupante  $SG$  est choisie au hasard parmi ces groupes selon les probabilités de sélection. Les solutions sont classées en fonction de leur profit économique total  $PET$  et celles ayant les meilleurs  $PET$  sont sélectionnées pour l'étape suivante.

**Étape 2** Le croisement : Combiner les solutions précédentes choisies pour générer de nouvelles solutions. Ce croisement conserve certaines caractéristiques des parents.

**Étape 3** La mutation : Pour chaque solution choisie, une opération de maintenance d'un groupe est sélectionnée et ensuite déplacée aléatoirement vers un autre groupe afin de générer une nouvelle solution.

**Étape 4** La réparation : Les deux phases de croisement et de mutation peuvent, parfois, représenter quelques défauts. À cette étape, ces derniers sont corrigés.

- Si les opérations de maintenance  $i^j$  et  $i^l$  d'un composant  $i$  sont regroupées dans un même groupe  $u$ ,  $X(i^j) = X(i^l) = u$ , l'opération  $i^l$  sera déplacée aléatoirement vers un autre groupe  $v$  avec  $v \neq u$ .
- Pour les opérations  $X(i^j) = k$ ,  $X(i^l) = u$ , si  $j < l$  et  $t_{G^k} > t_{G^u}$ , la réparation va échanger les deux opérations de deux groupes :  $X(i^j) = u$  et  $X(i^l) = k$ .

**Étape 5** :  $iter = iter + 1$  et répéter les étapes de l'algorithme génétique jusqu'à  $N_{iter}$ .

---

Nous remarquons que le profit économique est toujours positif dans notre cas. Le regroupement d'actions de maintenance est plus intéressant d'un point de vue économique. Le regroupement optimal d'actions de maintenance n'est pas simplement un regroupement naïf où les dates de maintenance ne représentent pas la moyenne des pas de remplacement. Les groupes de maintenance sont formés d'une manière propre à chaque sous-système. En comparant les deux stratégies de maintenance (le regroupement statique et le regroupement naïf), on remarque qu'elles sont équivalentes dans le cas où il n'y a pas un grand écart les pas de remplacement des lignes de marques. Pour les clusters 1, 2, 6,7, 8 et 9 les deux stratégies de regroupement proposent de remplacer les lignes de marquage simultanément. Cela est justifié par un horizon de planification où les lignes de marquage ne sont remplacées qu'une seule fois. Pour le cluster 1 par exemple, le regroupement naïf propose de remplacer les lignes de marquage après 14 mois de leur pose tandis que le regroupement statique suggère une maintenance simultanée après 13 mois. Par contre, pour les clusters 3, 4 et 5, le regroupement naïf ne prend pas en considération les occurrences de maintenance de certaines lignes durant l'horizon de planification. Il résulte donc que la stratégie de regroupement statique est plus intéressante dans le cas où les pas de remplacement des composants ne seraient pas proches.

Clusters (Sous-système)	Horizon de planification (mois)	Regroupement optimal	Dates de maintenance (mois)	PET	PET (%)	Regroupement naif (mois)
1	19	$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	13	291.58	10	14
2	18	$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	16	482.44	17	15
3	28	$\{1^1\}$ $\{1^2\}$ $\{2^1, 3^1\}$	13 26 19	216.36	12	19
4	16	$\{1^1, 3^1\}$ $\{2^1\}$	11 9	113.89	9	13
5	45	$\{1^1, 2^1\}$ $\{1^2, 2^2\}$ $\{1^3, 2^3\}$ $\{1^4\}$ $\{1^5, 3^1\}$	9 18 27 36 45	542.1	16	22
6	14	$\{1^1, 2^1\}$	9	52.47	7	10
7	18	$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	10	215.48	10	11
8	22	$\{1^1, 2^1\}$	14	47.1	7	15
9	15	$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	12	239.13	10	16

TABLE 3.4 – Regroupement optimal des lignes de marques par cluster

Pour étudier l'efficacité de la stratégie de regroupement d'un pont de vu fiabilité, une étude de la fiabilité de chaque sous-système est étudiée sur un horizon de planification de 5 ans (60 mois) suivant 3 stratégies de maintenance : sans maintenance, maintenance individuelle et maintenance regroupée.

À titre d'exemple, la figure 3.19 représente l'étude de fiabilité du sous-système 1. La courbe en bleu décrit la fiabilité de ce sous-système si aucune action de maintenance n'est effectuée durant l'horizon de planification. Dans ce cas, le système perd 50% de sa fiabilité après presque 13 mois et passe à 20% au bout de 20 mois et tombe complètement en panne après 30 mois.

La courbe en jaune est celle de la fiabilité du système dans le cas de la maintenance individuelle. La fiabilité du système varie entre 0.62 et 1 avec une fiabilité moyenne de 0.83. On remarque aussi qu'après une action de maintenance la fiabilité du système ne revient pas à 1.

La courbe verte représente la fiabilité du système quand la stratégie de maintenance regroupée est prise en compte. La fiabilité du système varie entre 1 et 0.5 avec une fiabilité moyenne de 0.83. La fiabilité du système a une tendance périodique vu que les lignes de marquage routier sont maintenues en même temps et la fiabilité du système remonte à 1 après chaque action de maintenance.

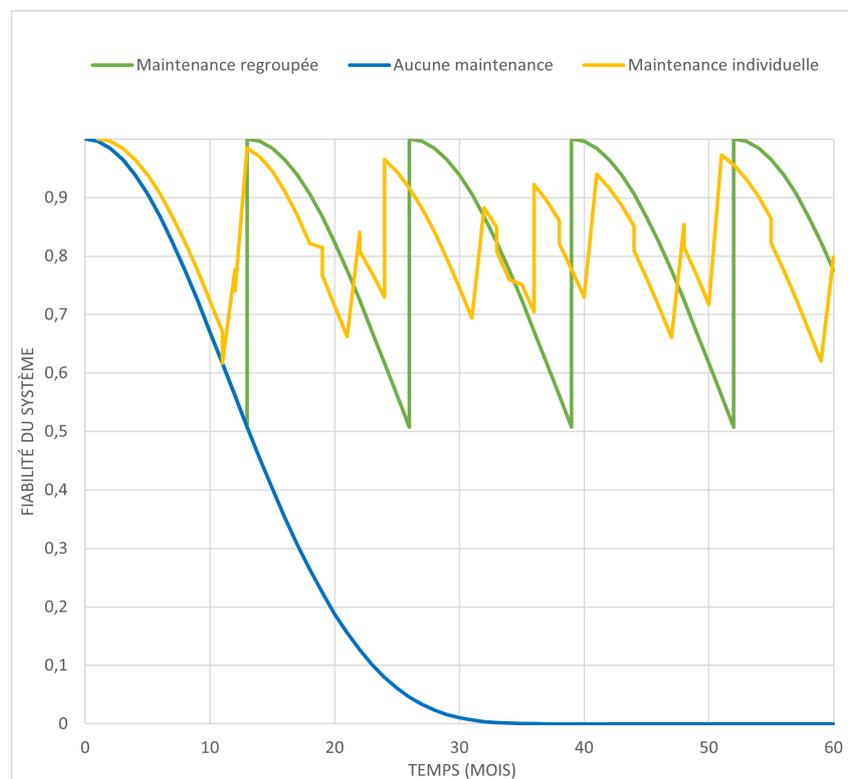


FIGURE 3.19 – Fiabilité du sous-système 1 suivant 3 stratégies de maintenance

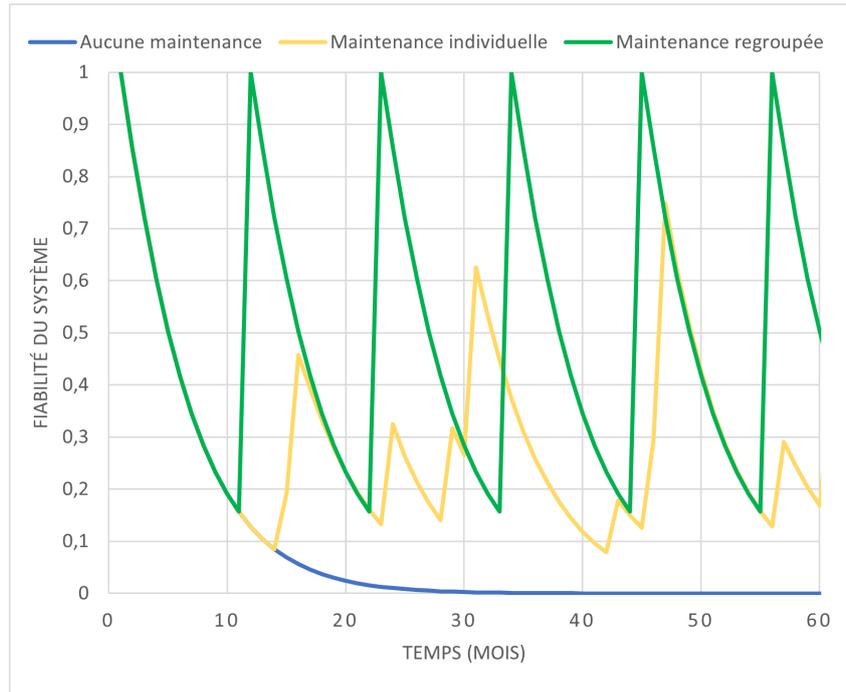


FIGURE 3.20 – Fiabilité du sous-système 9 suivant 3 stratégies de maintenance

Le tableau 3.5 illustre la fiabilité moyenne de chaque sous-système suivant les trois stratégies de maintenance. Si aucune action de maintenance n'est effectuée durant l'horizon de planification, la fiabilité moyenne des sous-systèmes varie entre 0.1 et 0.24, un niveau de fiabilité qui est très faible. Dans le cas d'une maintenance individuelle, la fiabilité moyenne varie entre 0.31 et 0.83 et entre 0.83 et 0.42 quand une maintenance regroupée est adoptée. On remarque alors que les intervalles auxquels la fiabilité moyenne des systèmes pour les deux dernières stratégies de maintenance appartient sont proches. Au niveau fiabilité, nous pouvons dire que ces deux stratégies de maintenance sont généralement équivalentes sauf pour le dernier sous-système. La figure 3.20 représente la fiabilité du sous-système 9. Il est clair que dans ce cas, la stratégie de maintenance regroupée est plus intéressante et la fiabilité moyenne est périodique. Le sous-système 5 est celui qui contient le plus de groupe durant son horizon de planification. D'après la courbe 3.21, la fiabilité du système 5 avec la stratégie de maintenance regroupée est toujours supérieure à celle de la maintenance individuelle sauf pendant la période entre 45 et 55 mois.

En conclusion, la stratégie de maintenance regroupée aide le gestionnaire de l'infrastructure routière à réaliser des profits d'un point de vue économique mais aussi assure que le réseau routier reste en bon état. Sur les trois exemples étudiés, la courbe de la fiabilité des systèmes quand une maintenance regroupée est adoptée englobe toujours celle de la fiabilité individuelle. La stratégie de regroupement proposée a montré donc son efficacité tant sur le niveau économique que niveau de fiabilité.

Cluster Sous-système	Aucune maintenance	Maintenance individuelle	Maintenance regroupée
1	0.24	0.83	0.83
2	0.17	0.56	0.59
3	0.2	0.54	0.66
4	0.16	0.6	0.6
5	0.11	0.39	0.42
6	0.2	0.77	0.84
7	0.17	0.71	0.79
8	0.16	0.52	0.58
9	0.1	0.31	0.51

TABLE 3.5 – Fiabilité moyenne des systèmes suivant les 3 stratégies de maintenance

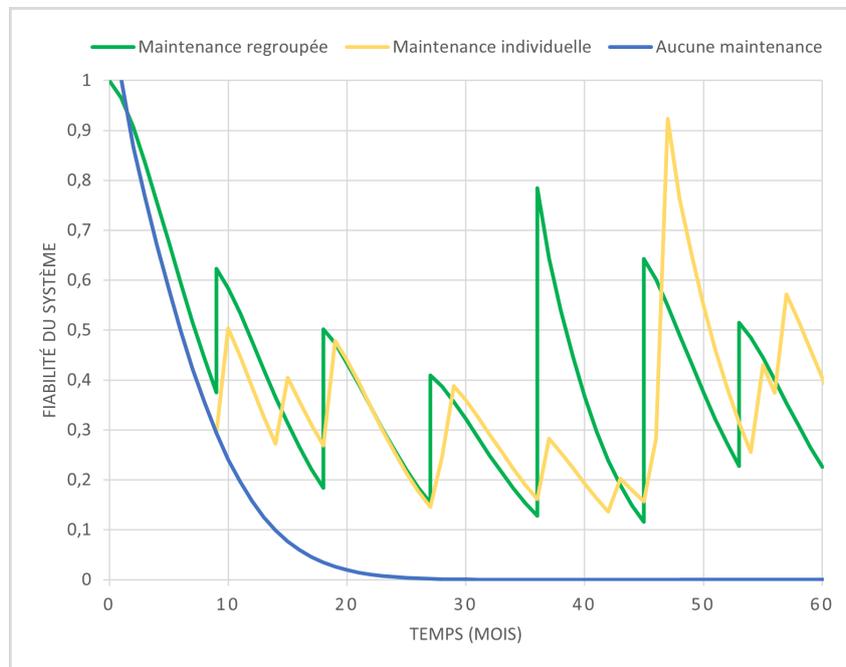


FIGURE 3.21 – Fiabilité du sous-système 5 suivant 3 stratégies de maintenance

### 3.4.3.3 Regroupement statique des actions de maintenance de l'infrastructure routière

Dans cette section, l'application de la stratégie de regroupement de maintenance est étudiée en prenant en considération tous les composants de l'infrastructure routière, les marquages routiers et la chaussée. Comme indiqué précédemment, l'infrastructure routière est considérée comme un système  $S$  composé de plusieurs sous-systèmes  $S'_i$  avec  $i \in \{1, \dots, 9\}$ .

### 3.4.3.3.1 Horizon de planification :

Dans cette sous-section, un horizon de planification est défini en suivant la méthode présentée précédemment. Le but est donc de chercher l'instant optimal pour maintenir les composants de l'infrastructure routière de chaque sous-système  $S_i$ .

Le plan de maintenance individuel du cluster 1, sur un horizon de planification représentant un seul cycle, est donné par la figure 3.22. Chaque point représente une date de maintenance de chaque composant du système suivant la stratégie de maintenance individuelle. Durant cet horizon de planification, la ligne axiale est remplacée 12 fois, la bande d'arrêt d'urgence est maintenue 11 fois et la ligne TPC 6 fois.

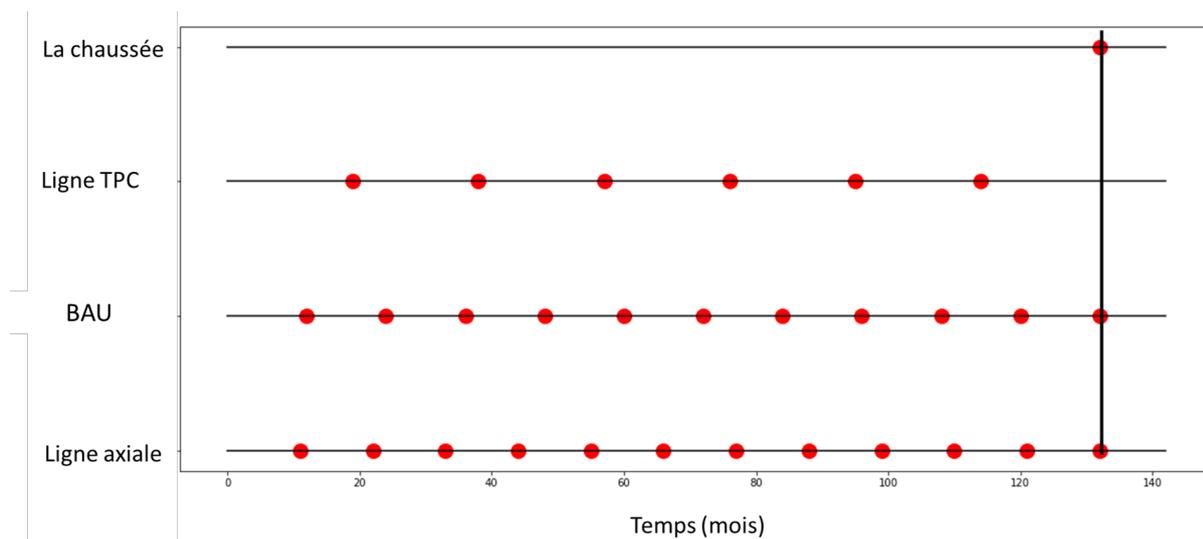


FIGURE 3.22 – Plan de maintenance individuel pour le sous-système  $S_1$

En appliquant la stratégie de regroupement statique, la solution optimale proposée par cet algorithme est donnée dans la figure 3.23. Chaque point de ce graphique indique la date optimale de maintenance pour chaque groupe. Il en résulte que durant cet horizon de planification, 11 compagnes de maintenance sont prises en compte. Le tableau 3.6 indique la date de maintenance de chaque groupe. A titre d'illustration, le premier groupe contient les trois premières actions de maintenance des trois lignes de marquage, leur date de maintenance est fixée après 17 mois. Avec cette politique de regroupement, le coût de la maintenance préventive est de 10.9 %.

Comme les actions de maintenance sont effectuées simultanément, au lieu de payer le coût de la mise en œuvre plusieurs fois, il est donc réduit surtout dans le cas du premier cluster où il y a seulement un mois d'écart entre les dates de remplacement de la ligne axiale et la bande d'arrêt d'urgence.

Pour mettre plus en avant l'importance de l'horizon de planification, l'exemple suivant regroupe les actions de maintenance sur un horizon de planification qui correspond à deux cycles. Dans ce cas, le regroupement optimal est donné par la figure 3.24. Dans ce

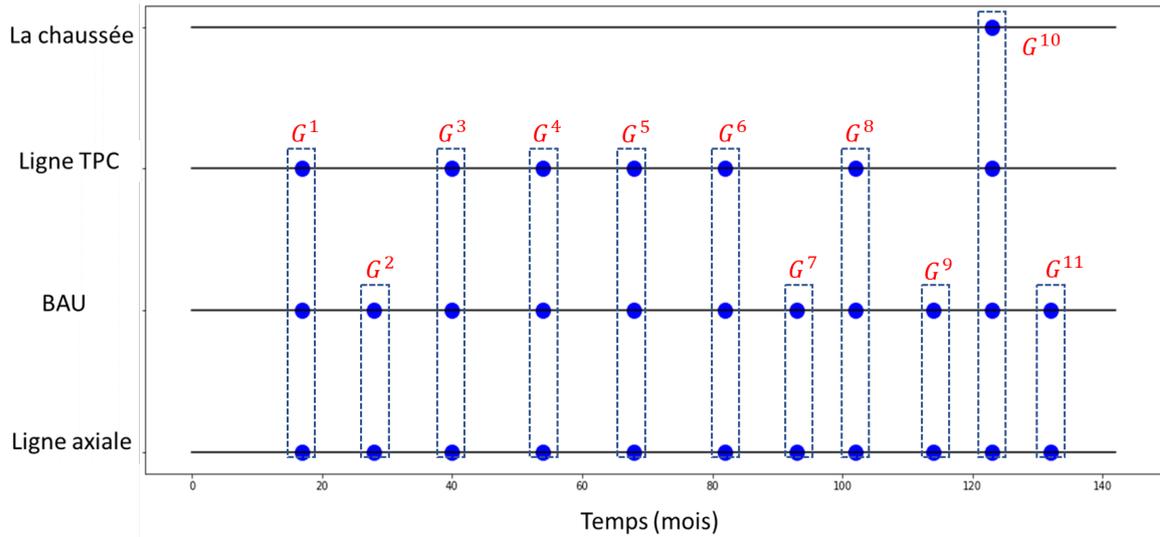


FIGURE 3.23 – Plan de regroupement statique pour le sous-système  $S_1$

cas, l'horizon de planification est défini comme suit  $HZ = [0, 264]$ . On suppose toujours que les composants du système viennent d'être remplacés au début de cet horizon. Cette solution a donné un profit économique de 17.86%. Le tableau 3.7 donne les instants de maintenance associés à chaque groupe et la figure 3.25 illustre le changement de regroupement à la fin du premier cycle.

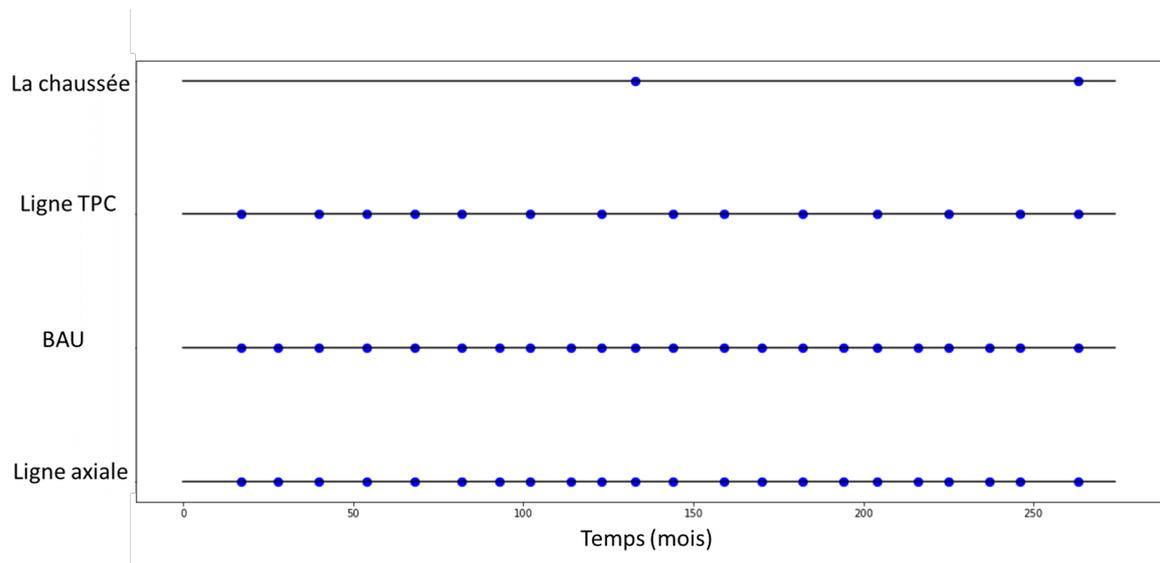


FIGURE 3.24 – Plan de regroupement des actions de maintenance du sous-système 1 sur deux cycles

En comparant les deux solutions, celle basée sur un horizon de planification restreint à un seul cycle et celle basé sur deux cycles, le regroupement des actions de maintenance ayant lieu à la fin du premier cycle sont différents. À titre d'illustration, la première action de maintenance de la chaussée est retardée de 10 mois par rapport à la première stratégie

TABLE 3.6 – Instants de maintenance simultanée pour chaque groupe pour un regroupement sur 1 cycle

Groupes	Dates de maintenance
$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	17
$\{1^2, 2^2\}$	28
$\{1^3, 2^3, 3^2\}$	40
$\{1^4, 2^4, 3^3\}$	54
$\{1^5, 2^5, 3^4\}$	68
$\{1^6, 2^6, 3^5\}$	82
$\{1^7, 2^7, 3^6\}$	93
$\{1^8, 2^8, 3^7\}$	102
$\{1^9, 2^9\}$	114
$\{1^{10}, 2^{10}, 3^{10}, 4^1\}$	123
$\{1^{11}, 2^{11}\}$	132

TABLE 3.7 – Instants de maintenance simultanée pour chaque groupe pour un regroupement sur 2 cycles

Groupes	Dates de maintenance
$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	17
$\{1^2, 2^2\}$	28
$\{1^3, 2^3, 3^2\}$	40
$\{1^4, 2^4, 3^3\}$	54
$\{1^5, 2^5, 3^4\}$	68
$\{1^6, 2^6, 3^5\}$	82
$\{1^7, 2^7, 3^6\}$	93
$\{1^8, 2^8, 3^7\}$	102
$\{1^9, 2^9\}$	114
$\{1^{10}, 2^{10}, 3^{10}\}$	123
$\{1^{11}, 2^{11}, 4^1\}$	133
$\{1^{12}, 2^{12}, 3^{11}\}$	144
$\{1^{13}, 2^{13}, 3^{12}\}$	159
$\{1^{14}, 2^{14}\}$	170
$\{1^{15}, 2^{15}, 3^{13}\}$	182
$\{1^{16}, 2^{16}\}$	194
$\{1^{17}, 2^{17}, 3^{14}\}$	204
$\{1^{18}, 2^{18}\}$	216
$\{1^{19}, 2^{19}, 3^{15}\}$	225
$\{1^{20}, 2^{20}\}$	237
$\{1^{21}, 2^{21}, 3^{16}\}$	246
$\{1^{22}, 2^{22}, 3^{17}, 4^2\}$	263

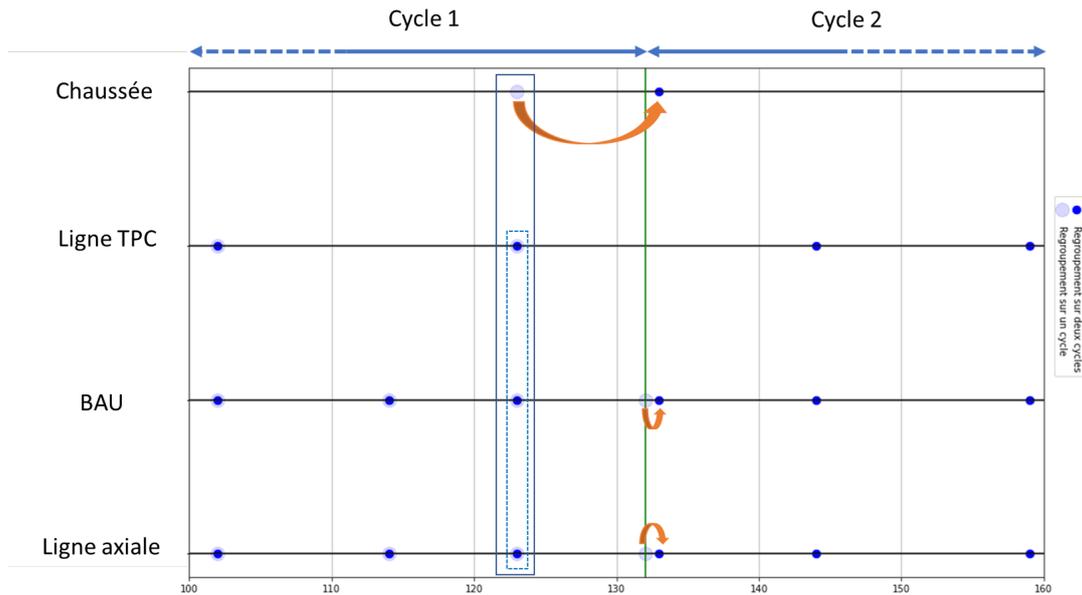


FIGURE 3.25 – Regroupement d’action de maintenance à la fin du premier cycle

(la première a proposé de maintenir la chaussée après 123 mois tandis que la deuxième a proposé de la retarder jusqu’à l’instant 133 mois). Cela explique l’importance de l’horizon de planification dans le calcul du profit économique (Voir la figure 3.26).

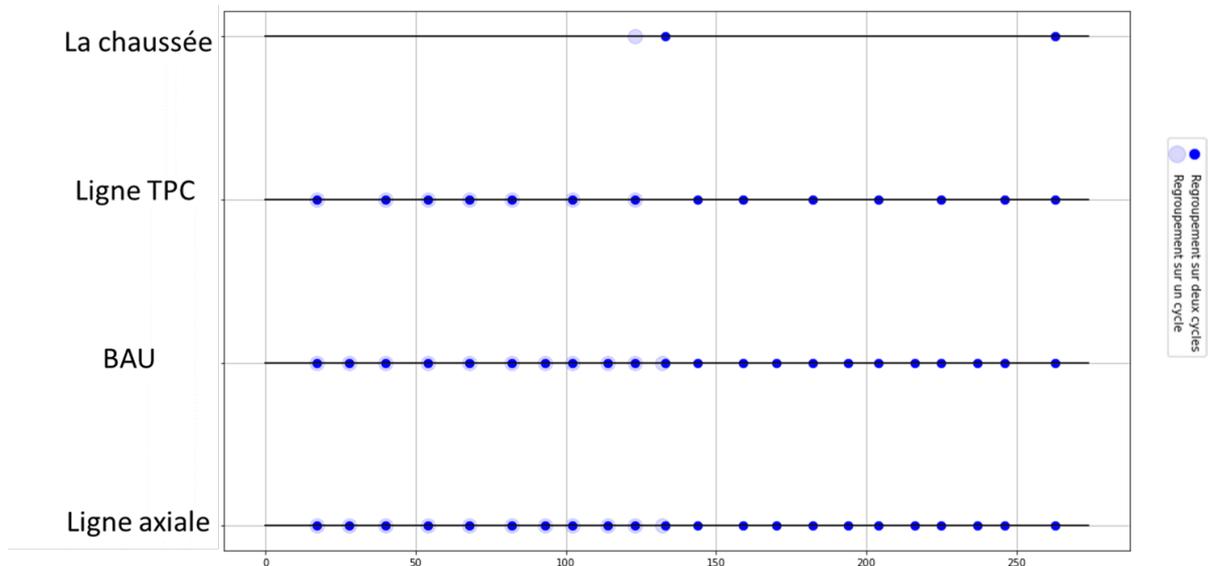


FIGURE 3.26 – Comparaison entre le regroupement des actions de maintenance sur un cycle et sur deux cycles

Prenons l’exemple du sous-système  $S_2'$  composé du cluster 2 du marquage routier et le cluster 2 de la chaussée. Le plan de maintenance individuel est illustré par la figure 3.27. Dans ce cas, l’horizon de planification sur un seul cycle, en supposant que tous les composants du système sont neufs, est défini comme suite  $HZ = [0, 140]$ . Le groupe-

TABLE 3.8 – Instants de maintenance simultanée pour chaque groupe du sous-système 2

Groupes	Dates de maintenance
$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	17
$\{1^2, 2^2, 3^2\}$	33
$\{1^3, 2^3, 3^3\}$	49
$\{1^4, 2^4, 3^4\}$	65
$\{1^5, 2^5, 3^5\}$	81
$\{1^6, 2^6, 3^6\}$	97
$\{1^7, 2^7, 3^7\}$	113
$\{1^8, 2^8, 3^8, 4^1\}$	129

ment optimal est donné dans le tableau 3.8. Comme il n’y a que 4 mois d’écart entre les dates de remplacement des lignes de marquage de ce sous-système, l’algorithme de regroupement a proposé de les remplacer simultanément sur tout l’horizon de planification.

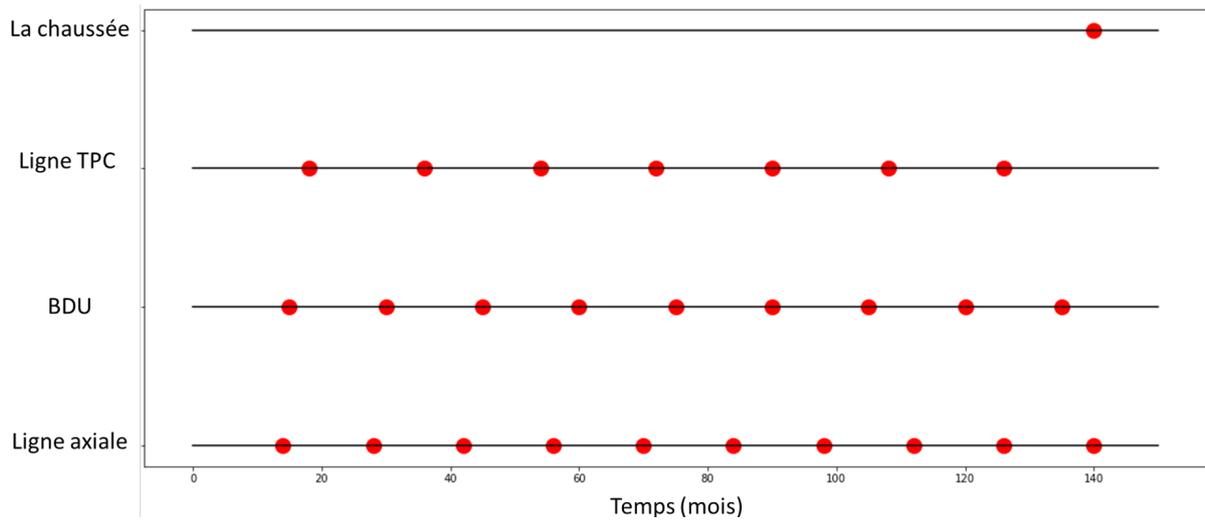


FIGURE 3.27 – Plan de maintenance individuel du sous-système 2

En conclusion, la stratégie de regroupement d’actions de maintenance a montré son efficacité dans le cas de l’infrastructure routière. Cette stratégie a pour but de former des groupes de maintenance afin de minimiser les coûts de la maintenance préventive. D’un point de vue fiabilité, la maintenance simultanée a assuré une fiabilité moyenne généralement supérieure à celle de la maintenance individuelle.

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une stratégie de regroupement statique d’actions de maintenance pour les systèmes à plusieurs composants est proposée. Le processus de regroupement est

appliqué sur les données d'inspections de la chaussée et du marquage routier. En l'absence d'une base de données "complète" qui combine l'historique d'inspection de la chaussée et du marquage routier pour une même section de route, une route est donc simulée en combinant deux bases de données (les données du marquage routier de la route nationale 4 et celles de la chaussée présentée par la base LTPP). L'infrastructure est cependant considérée comme un système à plusieurs composants.

Les inspections des composants de la route sont périodiques. Le marquage routier est inspecté une fois par an par contre la couche de roulement de la chaussée est inspectée une fois tous les 2 ans. Ce type d'inspection engendre donc des données censurées avec 3 types de censures : à gauche, par intervalle et à droite. Dans ce cas, la date exacte où un composant d'un système passe d'un état de marche à un état de défaillance reste inconnue. L'algorithme EM est ainsi appliqué dans le but d'estimer la date de la défaillance et aussi associer une loi de dégradation (loi de Weibull).

Le processus de regroupement conseillé dans ces travaux de thèse commence par établir une stratégie de maintenance individuelle pour chaque composant du système. Dans ce manuscrit, la politique de maintenance choisie est systématique par rapport à l'âge. Un composant est cependant remplacé périodiquement en déterminant un pas de remplacement optimal. En se basant sur les pas de remplacement optimaux des composants du système, la stratégie de regroupement d'action est donc fondée.

Une solution candidate est représentée sous forme d'un tableau dont la taille est équivalente au nombre d'actions de maintenance programmées sur l'horizon de planification. Une structure groupante doit impérativement respecter des contraintes. Pour obtenir la solution optimale (le regroupement optimal) un algorithme génétique est utilisé.

La stratégie de maintenance présentée est appliquée dans le cas de l'infrastructure routière sur deux horizons de planification. Le premier ne prend en compte que les opérations de maintenance planifiées sur un seul cycle et un deuxième horizon qui considère deux cycles. L'avantage de prendre plusieurs cycles réside dans le fait que des actions de maintenance sont déplacées de la fin d'un horizon au début d'un autre. Les deux applications ont donné un profit économique intéressant. Cependant, le point faible de cette stratégie est qu'elle ne considère plus les changements qu'un système peut subir sur l'horizon de planification que ça soit au niveau des coûts de maintenance ou même l'état des composants du système.

La stratégie de regroupement de maintenance statique présentée dans ce chapitre ne prend pas en considération les changements dynamiques qu'un système peut subir durant l'horizon de planification. Dans le cas de l'infrastructure, un de ses composants peut se dégrader d'une manière différente de ce qui a été estimée. La vitesse de dégradation peut dépendre des événements climatiques ou du volume du trafic. La stratégie de regroupement statique planifie les actions de maintenance sur un horizon de planification assez long. Il ne prend pas en considération les changements dynamiques qu'un composant peut subir. Dans le prochain chapitre, nous présentons un plan de regroupement dynamique qui s'adapte à l'état actuel des composants de l'infrastructure routière. Cette approche

est proposée pour affiner le plan de regroupement statique.

## Regroupement dynamique des actions de maintenance

Dans le but de réduire le coût de la maintenance préventive, les stratégies de regroupement des actions de maintenance profitent des dépendances économiques entre les composants du système. Cependant, pour les systèmes en série, l'arrêt d'un composant implique automatiquement l'arrêt de tout le système. Dans le cas où les systèmes fonctionneraient sous des conditions stables, les stratégies de regroupement statiques peuvent être appliquées afin d'obtenir un plan de maintenance à long-terme. Par contre, si les systèmes changent de fonctionnalités durant l'horizon de planification, les stratégies de regroupement dynamiques sont a priori choisies pour tenir en compte les changements dynamiques. Ces stratégies de maintenance dynamiques permettent donc de tenir compte du contexte dynamique dans ses décisions de maintenance afin de réduire les coûts de maintenance et de satisfaire les exigences instantanées des clients. Le choix entre les stratégies de maintenance stationnaires ou les stratégies de maintenance dynamiques dépend donc de la fréquence d'apparition du contexte dynamique. L'objectif de ce chapitre est de développer une stratégie de regroupement dynamique pour les composants du système.

Généralement, dans la pratique, les horizons de planification sont limités, car les informations ne sont disponibles qu'à court terme, et même une petite modification du système peut changer complètement le problème. Ainsi, dans les modèles dynamiques, les informations à court terme telles que la détérioration variable des composants ou les opportunités inattendues peuvent être prises en compte. Ces modèles génèrent des décisions dynamiques qui peuvent changer au cours de l'horizon de planification. Dans la pratique, nous constatons souvent que la durée de vie de certains composants du système est plus longue que la longueur de l'horizon. Ainsi, les décisions prises dans l'horizon fini sont mises en œuvre, et un nouvel horizon commence ensuite. Dans le cas du regroupement dynamique d'actions de maintenance, on combine les activités de maintenance planifiées avec celles non planifiées. Les contextes dynamiques sont des informations concernant les changements de données et de paramètres du système à court terme tels que les changements de la planification de production, les changements de la structure du système, l'apparition d'opportunités pour faire la maintenance, etc [160]. Le temps de non fonctionnement de certains composants peuvent être considérées comme une opportunité

intéressante pour effectuer des opérations de maintenance corrective, car les coûts de la maintenance peuvent être réduits [68].

D'après les travaux de A. Bortoli [60], la question de l'entretien de l'infrastructure routière n'est pas statique. De manière très simplifiée, l'état d'une route va dépendre du trafic réel qu'elle supporte et des contraintes environnementales, qui provoquent des dégradations structurelles et/ou surfaciques, mais aussi des opérations de maintenance qu'elle subit et qui traitent totalement ou partiellement ces dégradations, ou qui préviennent l'apparition de dommages. La maintenance de l'infrastructure routière consistant en une opération sur un système complexe, son évaluation est de ce fait délicate à effectuer, et nécessite donc une étude préalable fine de ses dimensions techniques, économiques, sociales, écologiques et politiques par approche systémique. Ces travaux soulignent que les conditions des infrastructures et des véhicules sont interdépendantes, mais qu'elles sont également conditionnées par d'autres éléments tels que l'utilisateur ou l'environnement de l'infrastructure. La dégradation d'un réseau donné est donc liée aux masses et au nombre des véhicules en circulation sur ce réseau.

Dans ce chapitre, nous présentons un plan de regroupement dynamique pour l'infrastructure routière. Cette approche est une manière pour affiner le plan de regroupement statique présenté dans le chapitre précédent. Ce chapitre est divisé en 5 sections principales. Dans la première section, une étude bibliographique des différentes stratégies de maintenance présentes dans la littérature. La deuxième partie présente les différents types des contextes dynamiques et les procédures de mise à jour du plan de regroupement. Dans la troisième section, nous présentons la stratégie de regroupement dynamique proposée. Son application à l'infrastructure routière est présentée dans la dernière section.

## 4.1 Panorama sur les méthodes de regroupement dynamique d'actions de maintenance

Les stratégies de regroupement dynamique des actions de maintenance incorporent des informations obtenues durant l'horizon de planification et les changements subis par le système en question. Ils fournissent donc des dates de maintenance dynamiques qui changent au cours de l'horizon. Selon [51], ces stratégies sont classées en 2 grandes familles :

- Regroupement dynamique avec horizon fini où le système est considéré que sur cet horizon, et suppose donc implicitement qu'il n'est plus utilisé par la suite.
- Regroupement dynamique avec horizon infini qui utilise également un horizon fini, mais le fait d'une manière répétée.

D'après les travaux de L. Heping [103], les méthodes de regroupement dynamique sur un horizon fini s'appliquent aux systèmes qui ne sont utilisés que pendant une période donnée. L'optimisation de la maintenance est effectuée dans ce temps de mission fini. Les méthodes à horizon infini, dit aussi horizon roulant, optimisent le coût de maintenance

avec des paramètres à long terme optimaux provisoires au moment de la décision. Ces paramètres peuvent être mis à jour lorsque des informations à court terme sont disponibles. Les modèles à horizon glissant sont proposés pour tirer parti des modèles à horizon infini afin d'obtenir des solutions plus stables par rapport aux modèles à horizon fini et intégrer également les informations à court terme.

#### 4.1.1 Stratégies de regroupement dynamiques sur un horizon fini

Les politiques de maintenance sous un horizon fini sont généralement considérées dans le cas où les cycles de vie de la plupart des systèmes seraient finis [?]. Le modèle de maintenance est optimisé sur cet horizon, car le système n'est plus opérationnel à la fin de l'horizon. Le calcul du coût de maintenance doit surmonter cette restriction en intégrant la durée de vie restante des composants afin d'estimer la durée de vie restante du système à la fin de l'horizon fini. Les modèles à horizon fini sont moins étudiés dans la littérature, car la politique optimale est souvent complexe et dépendante du temps. Ces modèles sont souvent appliqués dans le cas où la durée de fonctionnement des systèmes serait terminée.

Ces stratégies ont été souvent proposées pour les systèmes en série [53, 122]. Le regroupement d'action de maintenance a donc optimisé un horizon en supposant que les composants du système ne sont plus opérationnels à la fin de cet horizon. D'après [160], la politique de maintenance sur un horizon fini est peu utilisée à cause de la complexité de l'optimisation de ces modèles (durée de maintenance est prise en considération ou en changement de coût de maintenance).

J. M. Worm et A. Van Harten proposent un modèle d'aide à la décision, basé sur des méthodes de recherche opérationnelle, pour la planification multi-périodes de l'entretien des chaussées bitumineuses [170]. Le modèle proposé est un outil pour le gestionnaire des routes qui aide à générer un plan de maintenance optimal pour une route en minimisant les coûts de maintenance et en respectant les normes de qualité de la route. Il considère la route comme un système de plusieurs composants en parallèle. L'état de la route à un instant  $t$  est donné par : texture, uniformité et solidité. La dégradation de la chaussée peut être établie par une inspection et des mesures effectuées annuellement. L'optimisation de la maintenance est résolue en quatre étapes :

- pour chaque section de route un plan de maintenance est établi sur un horizon de planification fini ;
- un secteur avec un horizon de planification fini et un ensemble de périodes durant lesquelles l'entretien de la chaussée est autorisé sont déterminées. Pour chaque route, les combinaisons appropriées de maintenance sont générées.
- la troisième étape consiste à chercher la meilleure combinaison d'actions de maintenance d'un point de vue économique sur l'horizon de planification donné ;

- une sélection est ensuite effectuée parmi les alternatives générées, de telle sorte que les exigences de gestion globale en matière de qualité et de budget sont satisfaites.

Dans certains cas où la solution proposée ne satisfait pas le gestionnaire de l'infrastructure, une nouvelle itération est nécessaire. L'utilisateur a la possibilité de changer la structure du système en divisant la route ou des tronçons de route en plus petites sections, envisager de nouvelles combinaisons de maintenance ou autoriser une "violation" des normes de sécurité.

Un autre modèle est proposé par B. Liu et al [105]. Cette étude propose une politique de maintenance basée sur les conditions de ce système dans un horizon de planification fini. Le système étudié est constitué de deux composants hétérogènes dont le processus de dégradation suit un processus gamma bivarié. Ces composants sont inspectés périodiquement et sont remplacés préventivement si leurs niveaux de dégradation dépassent les seuils critiques. La stratégie de maintenance optimale est obtenue en minimisant le coût total actualisé attendu sur l'horizon. Pour un horizon de planification relativement long mais toujours fini, une politique hybride qui combine les politiques stationnaire et dynamique est suggérée. Les ingénieurs peuvent suivre la politique stationnaire au début et passer à la politique dynamique lorsqu'ils approchent de la fin de l'horizon.

Un autre exemple de regroupement dynamique d'actions de maintenance avec un horizon de planification fini est donné par P. Do Van et al [68]. Les auteurs proposent un plan de regroupement dans la présence d'opportunités de surveillance à durée limitées dans lesquelles certaines activités pourraient être exécutées avec des coûts de maintenance réduits. Il présente également un algorithme qui met à jour de manière optimale le plan de regroupement. Si au moment  $t$  une action de maintenance est en cours, la nouvelle planification de la maintenance du groupe sera appliquée après cette opération de maintenance. Cet algorithme a été appliqué sur un exemple de 5 composants en série et a montré une réduction au niveau des coûts de maintenance égale à 1,59%.

P. Wewein et al proposent une stratégie de regroupement de maintenance pour les systèmes à structure complexe [125]. Une analyse bayésienne de la dégradation des systèmes avec de multiples indicateurs de dégradation sous des conditions dynamiques est étudiée. Cette étude est basée deux hypothèses générales utilisées pour la modélisation de la dégradation des systèmes complexes, à savoir "indicateur unique de dégradation" et les "facteurs externes" sont éliminés par l'introduction d'un modèle de dégradation hybride multivarié généralisé. Avec ce modèle, l'effet des facteurs externes tels que les conditions environnementales variables et profils d'exploitation dynamiques, qui sont généralement omis par les modèles traditionnels, mais impératifs pour les systèmes complexes, peuvent être incorporés et analysés de manière cohérente. La méthode d'estimation des paramètres peut surmonter la difficulté de calcul introduite par de multiples modèles de dégradation. Elle peut également être utilisée pour effectuer une analyse de dégradation basée sur une simulation incluant l'évaluation de la durée de vie utile spécifiée par l'unité et la prédiction de la dégradation liée aux facteurs.

Un modèle à horizon fini est proposé par T. Cheng et MD Pandey pour évaluer le

coût attendu associé à une politique de maintenance [?]. Cette méthode est basée sur les conditions sur l'état. Une équation de renouvellement généralisée est formulée pour le coût attendu dans un horizon fini. Il est démontré que la courbe de coût à horizon fini est moins lisse que la courbe de coût à long terme. Puisque les équations analytiques du coût attendu à un horizon fini pour les systèmes à plusieurs composants sont plus complexes que les systèmes à une seule unité.

Y. Wang et al ont proposé une stratégie de regroupement sur un horizon fini pour un système  $k$  sur  $n$  avec des composants dépendants soumis à des inspections périodiques [167]. Cette étude examine une politique de maintenance basée sur l'état pour les systèmes multi-composants en incorporant les dépendances stochastiques et économiques. Pour adapter le plan de regroupement en fonction de l'état des composants, ces derniers sont soumis à des inspections périodiques. La dégradation de chaque composant du système est modélisée par un processus de Wiener. La dépendance stochastique est caractérisée par des interactions taux de dégradation, et la dépendance économique est modélisée par le regroupement de maintenance. Le processus de décision de maintenance se compose de deux niveaux. Au niveau du système, le seuil de fiabilité prédictif du système est fixé pour déclencher les interventions de maintenance des composants. Au niveau des composants, un indicateur d'efficacité de la maintenance est proposé pour sélectionner le groupe optimal de composants à remplacer de manière corrective et préventive. Un modèle de taux de coût de maintenance moyen à long terme est développé pour évaluer la performance de la politique CBM. La meilleure stratégie qui minimise le coût de maintenance moyen à long terme est obtenue en utilisant une simulation de Monte Carlo et un algorithme heuristique basé sur le PSO.

#### 4.1.2 Stratégies de regroupement dynamiques sur un horizon roulant

La stratégie de maintenance avec un horizon infini est appliquée comme une approximation d'une situation stable à long terme. Cela permet de déterminer les fréquences de maintenance à long terme pour les groupes d'activités connexes. L'approche de regroupement sur un horizon roulant (infini) a été proposée pour la première fois dans les travaux de R. Dekker et J. Losekoot en 1991 [65]. Les travaux présentés ont été limités à un nombre maximum d'action de maintenance (10 actions de maintenance). D'après les travaux de R. Dekker [169], comme les composants du système ont généralement une espérance de vie supérieure à l'horizon de planification, un horizon fini est souvent appliqué selon une approche à horizon roulant, où les premières actions de maintenance de l'horizon fini sont mis en œuvre, puis un nouvel horizon commence, et ainsi de suite. Dans ce papier, une approche avec un horizon infini en cinq phases est présentée. Il considère un caractère plus stable, car les plans de maintenance à court terme sont établis sur la base d'un plan provisoire à long terme. Cette approche présente plusieurs avantages : elle peut être appliquée dans le cas de maintenance minimal, remplacement par blocs ou remplacement par rapport à l'âge ainsi que la maintenance corrective.

K. Bouvard et al ont proposé une méthode d'optimisation de la planification de la maintenance d'un véhicule commercial lourd sur un horizon roulant en utilisant les in-

formations de surveillance en ligne de décision de regroupement de maintenance [51]. Le système étudié (véhicule lourd) est donc considéré comme un système à plusieurs composants. L'optimisation de la maintenance regroupée est résolue en utilisant les caractéristiques de fiabilité à priori des composants. Le plan de regroupement est mis à jour en fonction de la dégradation des composants au cours de l'horizon de planification en utilisant un processus gamma permettant d'estimer la dégradation. La stratégie proposée a démontré une réduction des coûts de la maintenance, ce qui justifie la décision d'investir dans des dispositifs et dans des systèmes de maintenance conditionnelle. Cet article a démontré sur des exemples numériques la pertinence d'investir dans des dispositifs et dans des systèmes de maintenance conditionnelle.

Comme illustré dans les travaux de H.C. Vu et al [161], le regroupement des actions de maintenance ne doit pas prendre en compte que les aspects positifs du regroupement, principalement la réduction des coûts de maintenance, mais doit considérer aussi les impacts négatifs du regroupement (l'augmentation de la probabilité de tomber en panne ou en la réduction de durée de vie), qui dépendent de la structure du système. Il a proposé un plan de maintenance dynamique sur un horizon roulant en tenant compte de la structure du système. Cette approche est appliquée sur un exemple numérique de 10 composants avec une structure complexe, et a mené vers une réduction significative des coûts de maintenance lorsque les coûts peuvent ne peuvent être négligés. Le coût moyen de maintenance du système passe de 9.27, lorsque tous les composants sont entretenus individuellement, à 7,41 lorsque la maintenance regroupée est mise en place.

L'application de la décomposition et d'un regroupement dynamique ultérieur nous permet d'utiliser plusieurs modèles pour les composants individuels, tels que la réparation minimale et le remplacement par bloc. En outre, l'approche proposée par [169] donne lieu à une politique dynamique qui ne peut pas seulement être appliquée à court terme, mais aussi à long terme. L'approche proposée par [169] est validée numériquement et étendue aux politiques de remplacement par rapport à l'âge en se basant sur une chaîne de Markov à temps discret, à la fois pour un horizon infini et un horizon fini. Cette approche a été évaluée comme une bonne solution : la déviation par rapport aux coûts optimaux est inférieure à 1%, à condition que certains effets d'harmonisation soient pris en compte. Il s'agit donc d'un résultat important vu que les modèles de décision de Markov actuels ne prennent en compte que quelques composants alors que cette approche traite des systèmes avec de nombreux composants.

### **4.1.3 Regroupement dynamique d'actions de maintenance en tenant compte de la structure du système**

L'optimisation de la maintenance des systèmes à plusieurs composants nécessite tout d'abord de "comprendre" la structure du système afin d'identifier les dépendances entre ses composants. Un cas particulier des systèmes série-parallèle est étudié dans la littérature.

M. Marseguerra et al [110] considèrent les systèmes série-parallèle dans leur étude.

Ils optimisent simultanément le profit économique et la disponibilité en utilisant un algorithme génétique. Pour une meilleure adéquation avec la réalité, le modèle prédictif décrivant l'évolution du système est basé sur une simulation Monte Carlo. Ce modèle offre un schéma permettant de modéliser la dynamique d'un processus de dégradation dépendant des contraintes pour les composants et pour tenir en compte la limitation du nombre de techniciens disponibles pour la maintenance. Cette approche est appliquée sur un exemple numérique où l'espace d'état a été parcouru de manière grossière et les configurations optimales sont trouvées "à la main". Les résultats ainsi obtenus ont été comparés à ceux donnés par l'approche se basant sur un algorithme génétique et ont confirmé la bonne performance de la méthodologie mise en œuvre.

Dans le cadre des systèmes série-parallèle, Y. Zhou et al [177] proposent une méthode d'optimisation de la maintenance en tenant compte de la dépendance économique et des intervalles d'inspection dépendant de l'état du système. La stratégie est basée sur les hypothèses suivantes : les composants d'un sous-système sont identiques, les durées d'inspections et de maintenance sont négligeables par rapport au temps de séjour des composants à chaque état, après une maintenance un composant est en état "as-good-as-new", les dépendances économiques entre les sous-systèmes ne sont pas considérés et la défaillance d'un composant n'est détectée qu'au moment de l'inspection. Dans cette étude [177], on considère que les composants du système se détériorent suivant une chaîne de Markov à temps discret. La stratégie de maintenance préventive considère un seuil de maintenance opportuniste pour chaque composant. La détérioration des composants n'est observable qu'au moment de l'inspection, et la date de l'inspection est déterminée en fonction de la détérioration actuelle. Une méthode d'optimisation basée sur la théorie de l'ordre stochastique est développée.

Pour améliorer le modèle précédent, Y. Zhou et al [176] considèrent le même type de système, mais ils supposent que les composants se détériorent selon un modèle de chaîne de Markov en temps continu et sont surveillés d'une manière continue. Cette stratégie utilise un seuil de maintenance et de multiples seuils de maintenance opportunistes pour chaque composant.

Cette structure particulière (série-parallèle) repose sur deux types de dépendances. Le premier type est la dépendance entre les composants, qui comprend la dépendance économique, la dépendance stochastique et la dépendance structurelle. Le deuxième type de dépendance est la dépendance de performance entre les différents sous-systèmes. Dans ce cas, les sous-systèmes sont connectés en série. Par conséquent, le taux de production du système dépend de tous les sous-systèmes du système. Un sous-système en mauvais état de marche peut faire baisser le taux de production de l'ensemble du système. En raison de la dépendance entre les sous-systèmes et les composants, les stratégies d'optimisation pour les systèmes série-parallèle sont plus complexes que celles des systèmes simples.

Comme la dégradation ou la défaillance est cachée, que les inspections de maintenance nécessitent des ressources différentes, il est nécessaire de décider dynamiquement les composants à maintenir en fonction des informations collectées. Selon les travaux de T. Wu et al [171], des hypothèses sont décrites :

- Deux types de missions sont considérées : les inspections et les remplacements. L'inspection (remplacement) nécessite, bien évidemment, un coût de mise en place, par exemple la logistique du personnel ou des pièces de rechange. Ce coût peut être partagé si plusieurs inspections (remplacements) sont effectuées simultanément. On suppose aussi que le remplacement est plus complexe et coûteux qu'une inspection. La durée des inspections/remplacements est considérée comme négligeable.
- Au cours de l'inspection, aucune intervention de maintenance n'est effectuée. Chaque composant  $i$  du système est périodiquement inspecté avec un coût  $C_{ins(i)}$ . Lorsqu'une inspection révèle une défaillance, une campagne de maintenance est lancée immédiatement pour remplacer le composant en question. Dans ce cas, le coût de remplacement est nécessaire pour une autre demande logistique. En outre, un coût de pénalité dû au retard logistique et aux demandes d'urgence est pris en compte.
- Au cours d'une action de maintenance, les composants désignés sont remplacés et les inspections sont également effectuées de manière opportuniste sans nouvelle charge.
- Pendant la période d'échec caché avant détection, un coût de pénalité par unité de temps est encouru en raison de la perte de performance du système.

Pour éviter les coûts supplémentaires dus aux missions de remplacement non-programmées (remplacement correctif) et partager les coûts de mise en place, l'objectif est de déterminer dynamiquement le programme de maintenance, y compris le type de mission, le temps de remplacement et les composants à maintenir en se basant sur les informations de dégradation collectées en temps réel.

En conclusion, les stratégies de regroupement dynamique avec un horizon fini ou roulant tiennent en considérations les informations données à court terme. Elles consistent à inspecter le système complètement ou partiellement. Les changements dynamiques se diffèrent d'un système à un autre. Dans la prochaine section, nous présentons les différentes stratégies de mise à jour du plan de regroupement suivant le contexte dynamique présent.

## 4.2 Procédures de mise à jour du plan de regroupement

Comme illustré dans la section précédente, le contexte dynamique inclut tous les changements dans la planification de la production, les changements au niveau de la structure du système capable d'influencer le coût de la maintenance ou les dépendances entre les composants. Dans cette section, différents types de contextes dynamiques sont présentés.

### 4.2.1 Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type structure

Au cours du temps, la structure du système peut changer. Ces changements peuvent engendrer des modifications au niveau des dépendances entre les composants. Dans ses travaux, H.C. VU [160] a illustré comme exemple de changement de structure, le changement de la demande de production. Si la demande de produits augmente, des composants sont ajoutés à la structure de base pour augmenter la capacité à la production. Dans le cas contraire, quand la production diminue, certains composants sont retirés de la structure. Dans la littérature, W. Wang et Y. Koren ont appelé ce phénomène, l'extensibilité des systèmes reconfigurables [165].

Dans ce cas, l'ajout d'un composant à la structure de base est motivé par l'augmentation de la fiabilité du système. Un exemple de cette modification structurelle est donné par M.A. Khalil et al [173]. La méthodologie de changement est appliquée sur le régulateur de tension d'un circuit électronique avec une alimentation régulée. L'effet de trois modifications différentes de la conception sur la fiabilité globale du système est étudié : la redondance en série, la redondance en parallèle et la redondance parallèle-série. Un troisième cas possible est celui présenté par K.E. Carter et al [115]. Les auteurs ont lié au changement de la phase mission. On parle ici de systèmes de multi-missions, dans lesquels la configuration ou la structure du système est modifiée pour la réalisation d'une tâche spécifique.

Sur un horizon de planification  $HZ$  défini par  $[T_{début}, T_{fin}]$ , la structure du système va changer à un instant  $T_{dc}$ . La structure groupante ou le regroupement optimal doit être mis à jour. Il fait tout d'abord, analyser la nouvelle structure (identifier les composants et les groupes critiques, analyser la durée de vie...), proposer une maintenance individuelle et puis optimiser la maintenance regroupée comme illustré dans la figure 4.1.

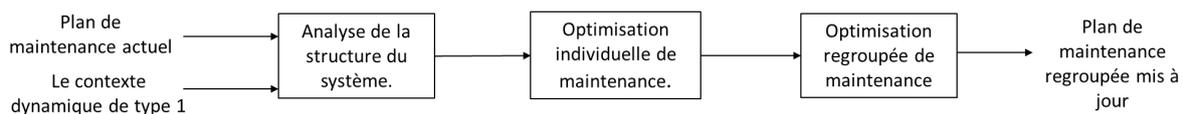


FIGURE 4.1 – Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type 1

### 4.2.2 Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type composant

Durant l'horizon de planification de la maintenance préventive, un composant du système peut subir des changements. Selon T.P.K. Nguyen et al [118], il peut être dû à :

- des changements liés au coût de la maintenance (préventive ou corrective) en raison des fluctuations des prix du marché.

- des changements liés à l’environnement opérationnel, à titre d’exemple des changements climatiques.
- des changements liés à des caractéristiques des composants (qualité, performance).

Les contextes dynamiques de type composant n’influence pas la structure du système et les modifications ne concernent que des composants donc il ne faut apporter les changements au niveau de la deuxième phase du processus de regroupement (la maintenance individuelle) comme illustré par la figure 4.2.

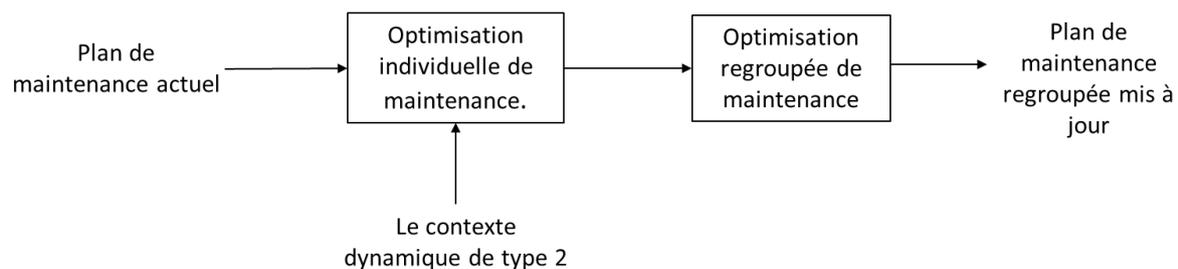


FIGURE 4.2 – Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type 2

### 4.2.3 Procédures de mise à jour du plan de regroupement de type externe

Le contexte dynamique n’est pas toujours lié à la structure ou aux composants du système, mais d’autres changements externes doivent être pris en compte. H.C. VU [160] a listé ces modifications.

- Changements du planning : les périodes intenses de production peuvent être incompatibles avec la maintenance préventive. Le plan de regroupement doit donc être mis à jour en prenant en compte ces changements.
- Changements de disponibilité et de fiabilité. Par exemple, un retard de livraison de pièces ou de matériels nécessaires pour une action de maintenance ou dans d’autres cas, le système doit satisfaire certaines contraintes de sécurité et de production.

Dans ce cas de contexte dynamique externe, les modifications concernent l’horizon de planification et le plan provisoire de maintenance. Cependant, le plan de regroupement change et il faut donc inclure ces nouvelles informations au niveau de la troisième phase du processus de regroupement comme le décrit la figure 4.3.

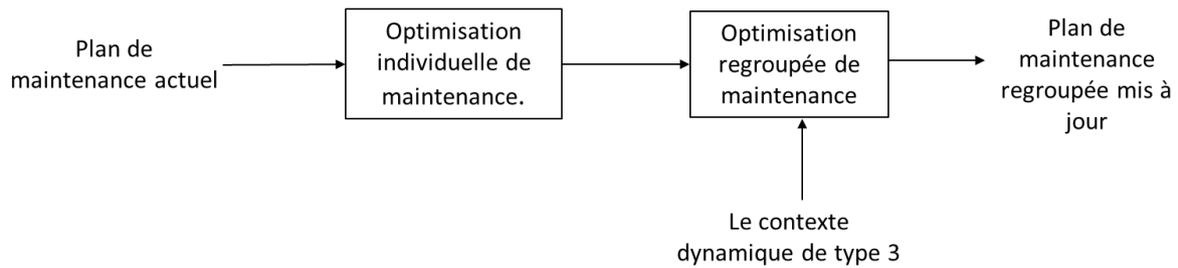


FIGURE 4.3 – Procédure de mise à jour dans le cas de contexte dynamique de type 3

### 4.3 Stratégie de regroupement dynamique pour les systèmes à plusieurs composants

Comme indiqué dans la section bibliographique 4.1, les plans de regroupement de maintenance nécessitent une première analyse du système afin d’identifier les différentes dépendances entre ses composants. Dans ce manuscrit, une stratégie de maintenance dynamique passe par 4 phases principales comme illustrées sur la figure 4.4 :

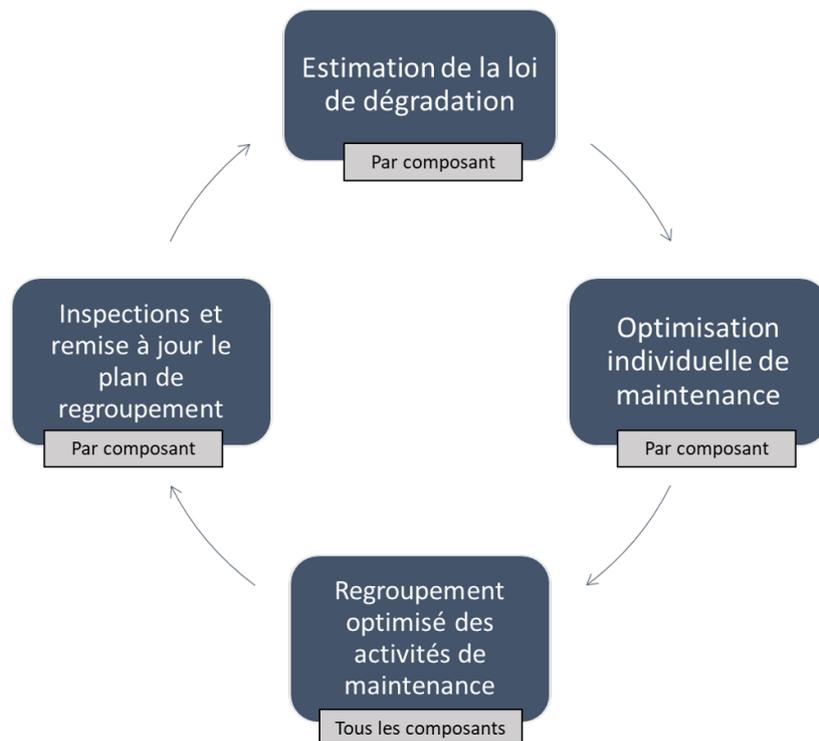


FIGURE 4.4 – Stratégie de maintenance dynamique

- La première étape consiste à estimer la loi de probabilité de panne pour chaque composant du système pris individuellement. Pour cela, le niveau de détérioration de chaque composant est récupéré. En se basant sur cette information, un modèle de dégradation est construit pour prédire la dégradation future du composant. En utilisant un modèle et une limite de dégradation, la loi de probabilité de panne

peut être estimée. Dans ce manuscrit, la dégradation des composants d'un système est modélisée par une loi de Weibull  $W(\alpha, \beta)$  dont les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont estimés en appliquant l'algorithme EM présenté dans le chapitre 3.

- La seconde étape utilise cette loi de probabilité pour déterminer la date optimale  $T_i^*$  de maintenance de chaque composant  $i$  du système  $S$ . Cette date est définie en supposant qu'une politique de maintenance préventive basée sur l'âge est appliquée aux différents composants. La période de maintenance spécifiée représente un compromis entre le coût correctif  $C_c^i$  lié à une panne et le coût préventif  $C_p^i$ . À noter, que la connaissance de cette date optimale pour chaque composant est nécessaire pour la mise en place de la méthode de regroupement.
- La troisième étape a pour objectif de regrouper plusieurs opérations de maintenance à la même date afin d'améliorer la disponibilité opérationnelle du système. L'idée est de considérer que le regroupement entraîne une diminution du nombre d'arrêts de maintenance. En conséquence, les coûts fixes liés à la mise en œuvre  $S_p$  sont réduits. En contrepartie, le coût total de maintenance est pénalisé par des maintenances préventives effectuées avant leurs dates optimales. Une maintenance effectuée trop tôt entraîne une réduction de la durée de vie utile du composant, et une maintenance retardée augmente la probabilité qu'un composant tombe en panne avant la date de la maintenance préventive. Des fonctions de pénalités ont été introduites afin d'évaluer pour chaque composant, le coût additionnel lié au déplacement de la maintenance de sa date optimale noté  $\Delta H^1$ . La maintenance préventive va entraîner l'arrêt du système, un coût additionnel lié à l'arrêt du système est noté  $\Delta H^2$ . Une heuristique a été développée afin de déterminer la structure groupante  $SG$  optimale qui respecte les contraintes du système. Cette structure minimise le coût total de maintenance sur un horizon de planification donné. Le profit économique  $PET$  associé à une structure groupante  $SG$  est donné par :

$$PET(SG) = \sum_{G^k \in SG} PE(G^k) \quad (4.1)$$

avec  $PE(G^k)$  le profit économique lié à un groupe  $G^k$  appartenant à la structure groupante  $SG$  avec :

$$PE(G^k) = U_{G^k} - \Delta H_{G^k}^1 - \Delta H_{G^k}^2 \quad (4.2)$$

Elle est constituée de groupes d'opération de maintenance dont les dates individuelles et optimales de remplacement sont consécutives.

- La quatrième et dernière étape entraîne la remise à jour du planning de maintenance en fixant les groupes d'opérations à réaliser et les dates associées. Les informations sont collectées en inspectant les composants du système périodiquement. Dans ce cas, le profit économique est modifié, le coût de l'inspection doit être intégré. Il est noté  $TPE_D$  et est donné par la fonction 4.3 où  $C_{insp}$  représente le coût d'une inspection et  $n$  le nombre total des inspections programmées sur l'horizon de planification.

$$TPE_D(SG) = PE(SG) - n * C_{insp} \quad (4.3)$$

Pour améliorer le plan de regroupement statique, les composants doivent donc être inspectés périodiquement. Soit  $\theta_i$  l'indicateur d'état du composant  $i$  du système  $S$ . Le niveau de  $\theta_i$  est donc évalué avec une périodicité  $\tau_{insp(i)}$ . Comme illustré par la figure 4.5, en se basant sur la valeur de  $\theta_i$  au moment de l'inspection, la solution de regroupement statique est mise à jour. Le paramètre  $\theta_i$  indique donc si le composant inspecté s'est dégradé d'une manière différente à celle estimée. La vitesse de dégradation peut être liée à des facteurs internes et/ou externes.

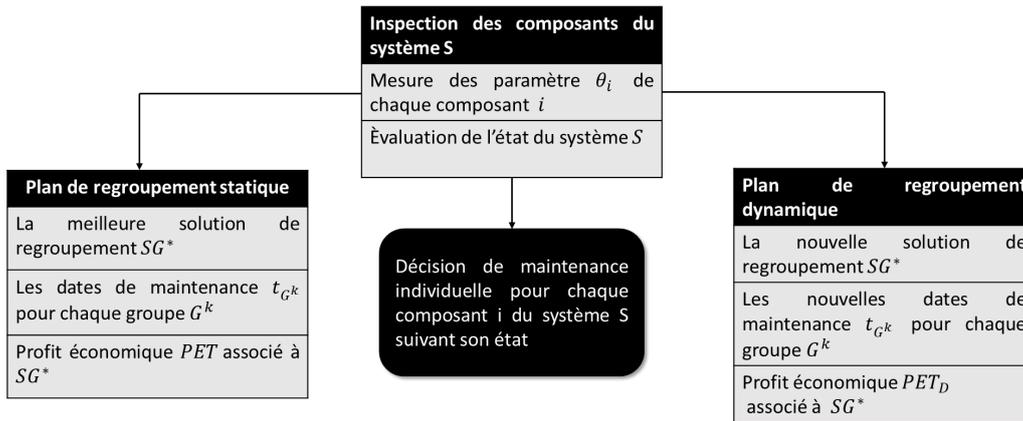


FIGURE 4.5 – Stratégie de mise du plan de regroupement statique

La décision concernant le changement de date de maintenance suivant le niveau de dégradation courant est propre à chaque système. Chacun a ses contraintes de disponibilité, de budgets et de durée de maintenance. Pour la stratégie que nous proposons dans ce manuscrit, la durée de la maintenance est considérée négligeable. L'algorithme de regroupement dynamique des actions de maintenance est représenté, dans le cas général, avec l'algorithme 3. Cet algorithme illustre les étapes principales du regroupement dynamique.

Pour la stratégie de regroupement que nous présentons dans ce chapitre, des états limites de services pour les composants de l'infrastructure routière est prédéfinie. Un marquage routier est considéré en état limite de service si son niveau de rétro-réflexion inférieur à  $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lux}$   $RL_i(t_{insp}) < 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lux}$ . Une chaussée est dite en état limite de service si le pourcentage de fissuration présent dépasse les 15%  $PF_i(t_{insp}) > 15\%$ . Au moment de l'inspection ce sont les 2 paramètres  $RL$  et  $PF$  qui sont inspectés.

Dans la prochaine section, nous présentons une stratégie de regroupement des actions de maintenance en considérant les contextes dynamiques adaptés à l'infrastructure routière. Cette stratégie prend en compte l'état courant de ses composants.

---

**Algorithm 3:** Regroupement dynamique des actions de maintenance

---

**Entrée :** L'algorithme prend en entrée la solution optimale donnée par le regroupement statique :

- $SG^*$  la solution de regroupement optimale
- Les groupes  $G^k$  pour  $k = 1, \dots, m$ , avec  $m$  le nombre de groupe associée à la solution  $SG^*$
- Les instants de maintenance optimaux  $t_{G^k}$  associés aux groupes  $G^k$
- Le profit économique totale  $PET$  associé à  $SG^*$
- La vitesse de dégradation de chaque composant

**Étape 1 :** Initialisation :  $\tau = 0$  ,  $TEP_D = 0$

- Le niveau de la dégradation des composants inspectés
- Comparaison avec le niveau de service limite.

**Étape 2 :** Décision de maintenance pour les composants inspectés :

- Si la valeur de  $\theta_i$  associée au composant  $i$  implique que ce dernier n'a pas atteint le seuil critique aucun changement n'est appliqué.
- Si la valeur de  $\theta_i$  associée au composant  $i$  implique que ce dernier est en état limite de service, une date de maintenance corrective est attribuée.

**Étape 3 :** Regroupement d'actions de maintenance en fonction des nouvelles dates de maintenance en lançant l'algorithme de regroupement statique (algorithme 1).

- Déterminer les instants de maintenance de chaque groupe et pour chaque structure groupante

$$t_{G^k}^* = \min_{G^k} \Delta H_{G^k}^1, k = 1, \dots, M$$

- Déterminer l'ordre de maintenance (OM)  $OM = (G^1, G^2, \dots, G^m)$  des groupes de SG avec  $t_{G^1}^*, t_{G^2}^*, \dots, t_{G^m}^*$
- Initialisation  $k = 1$ ,  $PET = 0$
- Déterminer  $t_{G^k}^*$ , mise à jour du plan provisoire de maintenance et calcul du profit économique total  $PET = PET + PE(G^k)$ .  
Mise à jour du plan de regroupement et de l'ordre de maintenance (OM) :
  - Mise à jour des dates de maintenance  $t'_{ij} = t_{ij} + \Delta t_{ij}$  avec  $t_{ij} < T_{fin}$
  - Mise à jour des ordres (OM)
- $k = k+1$  et retourner à l'étape 5 jusqu'à ce que  $k = M$ .

**Étape 4 :** Mise à jour de la structure groupante. La nouvelle structure ne prend en compte que les actions de maintenance planifiées entre  $t_{insp}$  et  $T_{fin}$  et  
 $PET_D = PET_D + PET$

**Sortie :** L'algorithme de regroupement dynamique des actions de maintenance retourne :

- $SG^*$  la solution de regroupement optimale
  - Les groupes  $G^k$  pour  $k = 1, \dots, m$ , avec  $m$  le nombre de groupe associée à la solution  $SG^*$
  - Les instants de maintenance optimaux  $t_{G^k}$  associés aux groupes  $G^k$
  - Le profit économique totale  $PET$  associé à  $SG^*$
-

## 4.4 Stratégie de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour l'infrastructure routière :

Les stratégies de regroupement d'actions de maintenance statiques ne considèrent que les règles de maintenance statiques fixées au cours de l'horizon de planification. Elles sont plus adaptées dans des milieux où les composants du système évoluent dans un environnement stable. Les caractéristiques de maintenance connues au début de l'horizon sont supposées invariantes. Comme indiqué précédemment, le plan de regroupement dynamique des actions de maintenance prend en compte l'état actuel des composants du système. On parle donc d'une maintenance conditionnelle. Selon la norme NF EN 13306 X 60319 [21], la maintenance conditionnelle est définie comme : *Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent*. Elle représente donc les stratégies pour lesquelles la décision de maintenance se base sur l'observation de l'état du système.

### 4.4.1 Modèles de dégradation courante et remplacement conditionné par rapport à la dégradation courante

La littérature propose plusieurs méthodes d'évaluation de la dégradation d'un composant ou du système. Les méthodes de dégradations pour les composants à état continu se basent, généralement, sur la nature du phénomène de détérioration.

Considérons un système avec  $N$  composants non-identiques. Une défaillance d'un composant  $i$  entraîne l'arrêt du système. La défaillance du système et/ou d'un composant est constatée immédiatement sans aucune inspection. Dans le cas de l'infrastructure routière, l'état limite de service d'un de ses composants n'est pas observable. Il est donc nécessaire d'inspecter la route pour évaluer son état.

Les modèles de dégradation d'une entité peuvent résulter à cause de l'usure, de la fatigue, d'érosion et des détériorations qui évoluent d'une manière continue au cours de temps. Les modèles de dégradation dans le cas continu ont souvent utilisé plusieurs modèles : processus de Lévy, Wiener ou le processus Gamma. ([37], [83], [99], [123], [168], [157]). Les propriétés d'indépendance des incréments et de stationnarité amènent à considérer la classe des processus de Lévy [37],[83]. Ces processus stochastiques s'expriment comme la somme d'un processus de Wiener (à trajectoire continue) et d'un processus de saut. Dans cette classe, la propriété de positivité des incréments conduit à se limiter aux processus de sauts purs et le choix de processus Gamma homogènes en temps se fait alors naturellement. La littérature propose aussi d'évaluer la dégradation courante d'un élément en estimant la durée de vie résiduelle. La durée de vie résiduelle, en anglais Remaining Useful Life (RUL), d'un système est définie comme étant la durée entre le moment présent et la fin de la vie. Cependant le processus Gamma reste celui le plus rencontré dans la littérature. Le choix de ce processus est justifié par plusieurs travaux (voir par exemple les travaux de V. Noortwijk [157]).

#### 4.4.1.1 Généralité sur les modèles de dégradation courante et les stratégies de maintenance conditionnelle

La durée de vie utile résiduelle d'un système est liée à la durée de vie résiduelle de ses composants qui sont fournis par un système de gestion de la qualité. La RUL est une variable aléatoire, car elle est influencée par les caractéristiques stochastiques de la dégradation des composants (D. Edwards et al [72] A. Voisin et al [159]). En effet, elle dépend de l'âge actuel de l'actif ou du composant, de l'environnement d'exploitation et des conditions de fonctionnement et des informations de surveillance de l'état ou de santé observée à ce moment-là. La RUL est donnée comme une estimation probabiliste délimitée par des intervalles de confiance (S. Sankararaman et K. Goebel 2013 [140]).

D. Medjaher et al [111] ont proposé une méthode basée sur les données pour l'estimation de la RUL des roulements. Ces derniers composants sont présentés dans les machines rotatives et leurs défaillances peuvent entraîner l'indisponibilité de la machine et une perte de productivité. Ils peuvent donc être considérés comme des composants critiques qui nécessitent d'être surveillés dans le temps. L'idée principale de la méthode proposée est de construire un indicateur de "santé" qui peut être utilisé pour suivre la progression des défauts. Pour construire l'indicateur, deux roulements d'une même catégorie sont considérés. Le premier est normal (sans défaut) est pris comme référence. Le second roulement présente une dégradation. Le signal du roulement dégradé est ensuite comparé en continu à celui du roulement nominal. La différence entre les deux est une sorte de résidu qui évolue au cours du temps. Ce résidu est considéré comme un indicateur de santé du roulement. Enfin, la projection de l'indicateur de santé peut être exploitée pour prédire l'état de santé du roulement et calculer sa RUL.

Dans le même contexte, D. An et al [36] ont proposé un pronostic basé sur un modèle de dégradation fondé sur les conditions d'utilisation  $U$ , du cycle ou du temps écoulé  $t$  et les paramètres du modèle  $\theta$ . Les conditions et le temps d'utilisation sont donnés, tandis que les paramètres du modèle caractérisant le comportement des dommages doivent être identifiés. Ensuite, la durée de vie utile résiduelle qui représente le temps restant jusqu'à la défaillance est calculée sur la base des paramètres du modèle estimés.

Le processus Gamma, quant à lui, est un processus de Lévy dont les incréments de dégradation suivent une loi Gamma [31]. Le processus Gamma a la propriété d'avoir un support positif. De ce fait, le processus Gamma définit un processus à accroissements positifs, adapté à la modélisation de dégradation continue et monotone contrairement au processus de Wiener.

Le choix d'un processus gamma comme modèle de dégradation a été initialement introduit en 1975. Ce processus admet trois propriétés principales : associé à une distribution gamma avec au moins un paramètre d'échelle identique, les incréments sont indépendants et non négatifs. Ces propriétés sont la troisième raison pour laquelle cette approche est populaire pour modéliser un système qui se dégrade progressivement de façon monotone

en s'accumulant au fil du temps.

Ainsi, les composants du système se dégradent progressivement sans alerte et ne sont inspectés qu'avec des intervalles de temps périodiques. Le processus gamma, noté  $Y$ , est donc introduit sous les hypothèses suivantes [132] :

- $Y(0) = 0$  avec une probabilité 1 ;
- $Y$  est une variable non-décroissante ;
- Les incréments  $\Delta Y(t) = Y(t + \tau) - Y(t)$  sont indépendants ;
- $\Delta Y(t)$  suit une distribution gamma défini par  $\gamma((\alpha(t + \tau - t), \beta) = \gamma(\alpha\tau, \beta)$  avec  $\alpha, \beta > 0$ .

La littérature présente de nombreuses applications du processus Gamma. L'optimisation de l'inspection avant la réparation par un processus de gamma a été développée par M. Newby et R. Dagg [116]. Ils ont proposé une optimisation de la périodicité d'inspection pour évaluer l'état d'un système dans le but d'optimiser la maintenance.

L. Bordes et al [49] ont proposé une approche pour décrire la dégradation d'un système en combinant le processus gamma  $(Y_t)_{t \geq 0}$  et un mouvement brownien  $(B_t)_{t \geq 0}$ , indépendant de  $(Y_t)_{t \geq 0}$  multiplié par une constante  $a \in \mathbf{R}$ . Le mouvement brownien est une description du mouvement aléatoire d'une "grosse" particule immergée dans un fluide et qui n'est soumise à aucune autre interaction que des chocs avec les petites molécules du fluide environnant [7].

Pour évaluer le niveau de dégradation des composants de l'infrastructure routière (chaussée et marquages routiers) un processus Gamma est utilisé. Ce processus est fréquemment utilisé dans la littérature non seulement parce que les calculs sont souvent explicites mais aussi parce que ce processus modélise bien la variabilité temporelle de la détérioration et permet de déterminer des politiques de maintenance optimales [49]. Cette caractéristique donne aux processus Gamma une grande flexibilité pour modéliser des comportements de dégradation très différents. Le niveau de rétroreflexion du marquage routier diminue avec le temps tandis que le niveau de fissuration augmente.

En théorie des probabilités et en statistiques, une distribution Gamma ou loi Gamma est un type de loi de probabilité de variables aléatoires réelles positives. La famille des distributions Gamma inclut, entre autres, la loi du  $\chi^2$  et les distributions exponentielles [18]. Une distribution Gamma est caractérisée par deux paramètres qui affectent respectivement la forme et l'échelle de sa représentation graphique (voir équation 4.4). Les distributions Gamma sont utilisées pour modéliser une grande variété de phénomènes, et tout particulièrement les phénomènes se déroulant au cours du temps où par essence, le temps écoulé est une grandeur réelle positive ; c'est le cas par exemple dans l'analyse de survie.

$$f(x, k, \theta) = \frac{x^{k-1} e^{-x/\theta}}{\Gamma(k) \theta^k} \quad (4.4)$$

La maintenance conditionnelle à l'état courant est un programme de maintenance qui recommence des décisions de maintenance basées sur les informations collectées par la surveillance de l'état du système. Elle comprend trois étapes principales : l'acquisition des données, le traitement des données et la prise de décision. Dans cette section, la dernière étape de ce processus est étudiée. La maintenance conditionnelle est prometteuse en particulier pour des systèmes étant sujets au vieillissement et à l'usure. En effet, la maintenance conditionnelle est plus efficace que l'approche systématique, dans le cas où la dégradation n'est pas constante, car elle permet d'intégrer dans le processus de décision des informations sur l'état courant du système.

K. S. Park [124] s'est intéressé à l'optimisation de la maintenance pour des systèmes avec une dégradation stochastique continue stationnaire. Il a utilisé un algorithme d'optimisation lorsque l'inspection est périodique, on recherche la valeur optimale du seuil de remplacement préventif en fonction des valeurs de la période des inspections. L'évolution du système maintenu est un processus de renouvellement simple. L'utilisation des propriétés régénératrices d'un tel processus permet de réduire l'étude asymptotique du système à un simple cycle de régénération défini par deux dates successives de remplacement.

Les travaux menés par Berenguer et al [48] ont présenté une structure CBM pour des systèmes multi-composants en détérioration continue, qui permet de tirer un profit économique en réduisant les coûts des actions de maintenance. Barata et al [44] ont utilisé la simulation Monte Carlo pour modéliser des systèmes détériorés surveillés en permanence. Ils supposent que les composants sont non réparables. Les seuils de dégradation optimaux de l'intervention de maintenance ont ensuite été trouvés pour minimiser le coût total attendu sur un horizon de mission. Marseguerra et al [110] ont utilisé un algorithme génétique pour trouver les seuils optimaux en optimisant le profit économique et la disponibilité. Hosseini et al [92] ont utilisé des réseaux de Petri stochastiques généralisés pour représenter un modèle CBM pour un système soumis à des défaillances Poisson. Ils ont supposé que les défaillances dues à la détérioration sont maintenues avec des réparations minimales. La politique de maintenance optimale et l'intervalle d'inspection ont ensuite été trouvés pour maximiser le débit du système.

M. Redondin [131] a proposé un modèle de maintenance conditionnelle pour le marquage routier avec des inspections  $\tau$ -périodiques. Le remplacement conditionnel se base sur la surveillance de la dégradation moyenne en fonction des seuils de maintenance correctif et préventif. Une portion de ligne de marquages est défaillante si le niveau de rétro réflexion moyen est inférieur à un seuil minimal préalablement fixé. Le processus  $Y$  est partiellement connu à travers les inspections et indique la dégradation courante moyenne de la portion de ligne. Le processus gamma est choisi, car les paramètres de la loi gamma sont estimés par la méthode MV entraînée par des variations exactes et observés. La stratégie de remplacement proposée par M. Redondin est adoptée pour le reste de ce manuscrit.

La vitesse de la dégradation moyenne d'un élément  $i$  du système est donnée par  $\mu_i = \alpha_i \beta_i$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  sont les paramètres de la loi gamma, et la dégradation moyenne est donnée par  $\mathbf{E}[\Delta Y] = \mu_i \tau$  avec  $\tau$  la périodicité d'inspection.

Soit  $Y_c$  le seuil de la maintenance corrective et  $Y_p$  celui associé à la maintenance préventive. Soit  $y \in ]0; Y_c[$  un seuil préventif arbitraire. Le temps moyen entre réparations (Mean Time Between Repairs)  $MTBR$  associé est donné par la fonction 4.5. Il correspond à un pas de maintenance arbitraire.

$$MTBR = \int_0^y 1 - F_{\Delta Y}(x) dx = \left(\frac{y}{\alpha\beta\tau} + 1\right)\tau \quad (4.5)$$

La fonction coût de maintenance adaptée à la stratégie conditionnée à la dégradation courante est donnée par l'équation 4.6 avec  $C_p$  le coût de remplacement préventif,  $C_c$  le coût de remplacement correctif,  $C_{insp}$  le coût d'inspection et  $F$  la fonction de répartition de la loi gamma. Comme illustré, cette fonction dépend de la vitesse de dégradation et du temps moyen avant le remplacement  $MTBR$ .

$$\begin{aligned} C_{CBM}(y) &= \frac{C_p + C_{insp} + C_c \cdot P(\Delta Y > Y_c - y)}{MTBR(y)} \\ &\approx \frac{C_p + C_{insp} + C_c \cdot (1 - F_{\Delta Y}(Y_c - y))}{\left(\frac{y}{\alpha\beta\tau} + 1\right)\tau} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Le ratio entre le coût préventif  $C_{CBM}(Y_p)$  et correctif  $C_{CBM}(Y_c)$  est donné par l'équation 4.7. Il résulte donc que l'économie relative est  $1 - \frac{C_{CBM}(Y_p)}{C_{CBM}(Y_c)}$ .  $Y_p$  le seuil optimal de maintenance préventif garantissant le minimum de la fonction coût notée  $C_{CBM}$  :

$$\frac{C_{CBM}(Y_p)}{C_{CBM}(Y_c)} = \frac{C_p + C_{insp} + C_c(1 - F_{\Delta Y}(Y_c - Y_p))}{C_p + C_{insp} + C_c} \cdot \frac{Y_c + \alpha\beta\tau}{Y_p + \alpha\beta\tau} \quad (4.7)$$

$$Y_p = \inf\{Y/C_{CBM}(Y) = \min_{0 < y < Y_c} C_{CBM}(y)\} \quad (4.8)$$

Dans la prochaine sous-section, une adaptation de ces équations dans le cas de l'infrastructure routière est proposée. Elle dépend de la nature de dégradation de chacun de ses composants.

#### 4.4.1.2 Application sur le cas de l'infrastructure routière

La dégradation du marquage routier est un processus décroissant. En effet, le niveau de rétroreflexion diminue avec le temps. Cependant, la dégradation de la chaussée est un processus croissant puisque la fissuration à l'état neuf est 0% et plus la chaussée vieillit plus le PFL augmente. Dans ce cas, on est devant deux processus Gamma différents ce qui rend le modèle plus complexe contrairement à la loi de Weibull, présentée dans le chapitre 3, où la seule différence réside dans l'ordre de grandeur de ses paramètres.

La perte de rétroreflexion en fonction du niveau à neuf  $RL(0)$  est donné par l'équation 4.9. Pour un niveau de service minimal de  $L_c = 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lux}$  pour le marquage routier, la perte maximale  $Y_c^m$  autorisée est donnée par l'équation 4.10. Si une inspection

montre que la dégradation atteint ce seuil, alors la ligne est insuffisamment rétroréfléchissante et un remplacement correctif doit être organisé en urgence.

$$Y^m(t) = RL(0) - RL(t) \quad (4.9)$$

$$Y_c^m = RL(0) - L_c \quad (4.10)$$

$$\Delta Y_m(t) = RL(t) - RL(t + \tau) \quad (4.11)$$

Pour la chaussée le niveau d'accroissement de la fissuration  $PF(t)$  à un instant  $t$  en fonction du niveau à neuf  $PF(0)$  est donné par l'équation 4.12. Pour une fissuration maximale de la chaussée  $F_{max} = 15\%$ , la fissuration maximale est donnée par 4.13. Si une chaussée montre que la dégradation atteint ce seuil, alors la section de route est très dégradée et nécessite une maintenance en urgence.

$$Y^c(t) = PF(t) \quad (4.12)$$

$$Y_c^c = F_{max} \quad (4.13)$$

$$\Delta Y_{PF}(t) = PF(t + \tau) - PF(t) \quad (4.14)$$

Le remplacement systématique par rapport à l'âge, présenté dans le chapitre précédent, est basé sur le comportement a priori des composants de l'infrastructure routière, décrit par une loi de Weibull. Dans ce chapitre, la maintenance des composants d'un système est basée sur sa dégradation courante. Le remplacement conditionné est, quant à lui, basé sur le suivi de ces composants et sur un modèle de dégradation. Un composant de l'infrastructure est donc périodiquement inspecté avec un pas constant  $\tau > 0$  unité de temps.

Les processus  $Y^m$  et  $Y^c$  (connus uniquement au travers des inspections) indiquent respectivement la perte de rétroréflexion pour le marquage et le niveau de fissuration pour la chaussée en fonction des niveaux à neuf. Cependant ces informations dynamiques à court terme durant l'horizon de planification sont incluses afin d'affiner le plan de maintenance. Le processus gamma utilisé estime l'état des composants au moment de l'inspection. La solution de regroupement des actions de maintenance est mise à jour suivant une maintenance conditionnée.

Dans le cas du marquage routier, le seuil optimal pour la maintenance conditionnée  $Y_p^m$  est donné en minimisant la fonction  $C_{CBM}^m$  et le ratio de maintenance est donné par 4.16 :

$$\begin{aligned}
C_{CBM}^m(y) &= \frac{C_p + C_{insp} + C_c \cdot P(\Delta Y_m > Y_c^m - y)}{MTBR(y)} \\
&\approx \frac{C_p + C_{insp} + C_c \cdot (1 - F_{\Delta Y_m}(Y_c^m - y))}{\left(\frac{y}{\alpha\beta\tau} + 1\right)\tau} \\
&\approx \frac{C_p + C_{insp} + C_c \cdot (1 - F_{\Delta Y_m}(RL(0) - L_c - y))}{\left(\frac{y}{\alpha\beta\tau} + 1\right)\tau}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

$$\frac{C_{CBM}^m(Y_p^m)}{C_{CBM}^m(Y_c^m)} = \frac{C_p + C_{insp} + C_c(1 - F_{\Delta Y^m}(Y_c^m - Y_p^m))}{C_p + C_{insp} + C_c} \cdot \frac{Y_c^m + \alpha\beta\tau}{Y_p^m + \alpha\beta\tau} \tag{4.16}$$

Dans le cas de la chaussée, la fonction coût pour la stratégie de maintenance conditionnelle est donnée par l'équation 4.17 et le ratio de la maintenance corrective et la maintenance préventive est donnée par l'équation 4.18.

$$\begin{aligned}
C_{CBM}^c(y) &= \frac{C_p + C_{insp} + C_c \cdot P(\Delta Y_c > Y_c^c - y)}{MTBR(y)} \\
&\approx \frac{C_p + C_{insp} + C_c \cdot (1 - F_{\Delta Y_c}(Y_c^c - y))}{\left(\frac{y}{\alpha\beta\tau} + 1\right)\tau} \\
&\approx \frac{C_p + C_{insp} + C_c \cdot (1 - F_{\Delta Y_c}(F_{max} - y))}{\left(\frac{y}{\alpha\beta\tau} + 1\right)\tau}
\end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\frac{C_{CBM}^c(Y_p^c)}{C_{CBM}^c(Y_c^c)} = \frac{C_p + C_{insp} + C_c(1 - F_{\Delta Y^c}(Y_c^c - Y_p^c))}{C_p + C_{insp} + C_c} \cdot \frac{Y_c^c + \alpha\beta\tau}{Y_p^c + \alpha\beta\tau} \tag{4.18}$$

Suivant les données utilisées durant ces travaux, le marquage routier est périodiquement inspecté avec une fréquence de  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 12$  mois tandis que l'état de la chaussée est relevé tous les  $\tau_4 = 24$  mois. Gardons la même fréquence d'inspection, le plan de regroupement statique est modifié en fonction des résultats de l'inspection.

#### 4.4.2 Stratégie de regroupement dynamique pour l'infrastructure routière

L'idée principale de la phase de regroupement dynamique est d'effectuer simultanément plusieurs opérations de maintenance préventive afin de réaliser des économies au niveau des coûts alloués à la maintenance préventive en tenant compte de la condition et de l'état de l'infrastructure routière.

La stratégie de regroupement dynamique se base sur les résultats de celui obtenu lors du regroupement statique. Les dates de maintenance prises en compte au début de l'horizon de planification sont celles associées à la solution optimale donnée par le regroupement statique. La stratégie de regroupement dynamique des actions de maintenance propose une approximation à la réalité. En effet, dans le cas de l'infrastructure routière, les changements climatiques ou le trafic peuvent influencer la vitesse de dégradation. Le profit économique est formulé lorsqu'une solution (candidate) de regroupement est proposée. Lorsque les composants de l'infrastructure sont inspectés, les informations obtenues

seront inclus pour mettre à jour le plan de maintenance en tenant compte de l'état actuel de l'infrastructure routière. Une décision parmi les trois décisions possibles est à choisir :

- Retarder une action de maintenance ;
- avancer une action de maintenance ;
- ne rien changer.

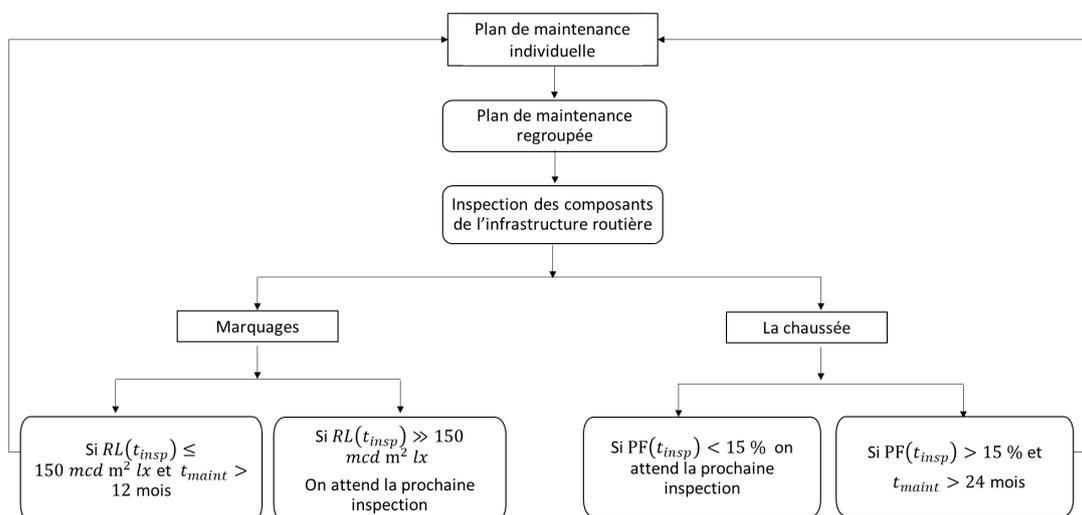


FIGURE 4.6 – Stratégie de maintenance dynamique pour l'infrastructure routière

Pour le marquage routier, si le niveau de rétro-réflexion du marquage est proche du seuil critique pour la maintenance préventive et que la prochaine action n'est pas programmée qu'après la prochaine inspection (dans les 12 mois qui suivent), alors le marquage nécessite un remplacement. L'idée est donc de définir le plan de maintenance individuelle du composant en question et puis introduire cette information dans le plan de regroupement comme illustré par la figure 4.6. La même stratégie est appliquée à la chaussée. Si le pourcentage de fissuration est supérieur à au seuil critique défini par l'algorithme CBM et que la prochaine campagne de maintenance n'est pas programmée dans les 24 mois qui suivent, alors un instant de maintenance est identifié et cette information est envoyée dans le plan de regroupement.

Dans le cas où un composant se dégrade moins vite que prévu, sa date de maintenance doit être changée afin d'éviter une sur-maintenance. Si au moment de l'inspection un composant n'a pas atteint le seuil critique de maintenance et que sa prochaine occurrence de maintenance est programmée dans les 12 mois qui suivent l'inspection, alors la date de maintenance est décalée de 12 mois pour le marquage routier et 24 mois pour la chaussée.

Dans ces conditions, le profit économique du regroupement associé à une structure groupante  $SG$  pour la maintenance regroupée dynamique  $TEP_D$  est donné par 4.19 :

$$TEP_D(SG) = TEP(SG) - \sum_{i=0}^{N_{insp}} C_{insp} \quad (4.19)$$

Cluster	Alpha à 12 mois	Alpha à 6 mois	Alpha à 3 mois	Beta	Espérance de dégradation à 12 mois	Espérance de dégradation à 6 mois	Espérance de dégradation à 3 mois
1	1,04	0,52	0,26	188,3	195,83	97,92	48,96
2	1,41	0,705	0,14	55,81	78,69	39,35	7,81
3	1,08	0,54	0,09	112,23	121,21	60,60	10,10
4	0,93	0,465	0,11	72	66,96	33,48	7,92
5	1,46	0,73	0,02	66,43	96,99	48,49	1,33
6	1,13	0,565	0,27	65,33	73,82	36,91	17,64
7	0,81	0,405	0,04	166,9	135,19	67,59	6,68
8	1,09	0,545	0,19	52,76	57,51	28,75	10,02
9	0,91	0,455	0,05	116,36	105,89	52,94	5,82

TABLE 4.1 – Vitesse de dégradation de la ligne axiale

Cluster	Alpha à 12 mois	Alpha à 6 mois	Alpha à 3 mois	Beta	Espérance de dégradation à 12 mois	Espérance de dégradation à 6 mois	Espérance de dégradation à 3 mois
1	0,57	0,285	0,14	124,75	71,11	35,55	17,77
2	0,86	0,43	0,22	56,04	48,19	24,10	12,04
3	0,59	0,295	0,15	89,01	52,52	26,26	13,12
4	0,54	0,27	0,14	100,9	54,49	27,24	13,62
5	0,76	0,38	0,19	64,85	49,29	24,64	12,32
6	0,53	0,265	0,13	85,96	45,56	22,78	11,38
7	0,6	0,3	0,15	114,57	68,74	34,37	17,18
8	0,76	0,38	0,19	63,82	48,50	24,25	12,12
9	0,39	0,195	0,10	154,24	60,15	30,08	15,03

TABLE 4.2 – Vitesse de dégradation de la bande d'arrêt d'urgence

#### 4.4.2.1 Regroupement dynamique des actions de maintenance pour la signalisation horizontale

Comme dans le chapitre 3, une première application de la stratégie de regroupement dynamique d'actions de maintenance est faite en tenant compte que des marquages routiers. L'infrastructure routière est considérée comme un système à 3 composants : ligne axiale, la bande d'arrêt d'urgence et la ligne TPC. La stratégie de regroupement dynamique des actions de maintenance est basée sur la solution proposée par le regroupement statique.

Les lignes de marquage sont donc inspectées périodiquement et la stratégie de regroupement dynamique va venir adapter la solution obtenue par la stratégie de regroupement statique en fonction de la dégradation courante.

Cluster	Alpha à 12 mois	Alpha à 6 mois	Alpha à 3 mois	Beta	Espérance de dégradation à 12 mois	Espérance de dégradation à 6 mois	Espérance de dégradation à 3 mois
1	0,99	0,495	0,25	61,06	60,45	30,22	15,11
2	0,69	0,345	0,17	47,13	32,52	16,26	8,13
3	1,15	0,575	0,29	40,44	46,51	23,25	11,63
4	0,58	0,29	0,15	59,39	34,45	17,22	8,61
5	0,47	0,235	0,12	153,93	72,35	36,17	18,09
6							
7	0,62	0,31	0,16	48,27	29,93	14,96	7,48
8							
9	0,46	0,23	0,12	99,13	45,60	22,80	11,40

TABLE 4.3 – Vitesse de dégradation de la ligne TPC

Selon les rapports de gestionnaires de l'infrastructure routière, le coût d'une inspection pour les lignes de marquages est estimé à 3 euros par mètre et par ligne dans le cas de la maintenance préventive et 10 euros par mètre et par ligne dans le cas d'une maintenance corrective. Le tableau 4.4 représente le coût d'inspection alloué à chaque cluster en fonction de sa taille. L'idée principale est de simuler le résultat d'une inspection en se basant sur les paramètres de la loi gamma et la vitesse de dégradation.

Les résultats de l'application du processus Gamma sur les données des marquages routiers sont présentés par les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3. Ils représentent respectivement les paramètres de la loi de gamma et la vitesse de dégradation des clusters de la ligne axiale, la bande d'arrêt d'urgence et la ligne TPC. Comme indiqué par M. Redondin et al [132], la vitesse de la dégradation est donnée par l'espérance de la loi de gamma. Pour la ligne axiale, les clusters perdent en moyenne  $100 \text{ mcd/m}^2/\text{lux}$  en 12 mois. Cependant, la bande d'arrêt d'urgence et la ligne TPC perdent respectivement en moyenne 55 et 45  $\text{mcd/m}^2/\text{lux}$ .

Prenons l'exemple du cluster 1. La ligne axiale associée perd en moyenne  $195 \text{ mcd/m}^2/\text{lux}$ . La bande d'arrêt d'urgence, quant à elle, perd  $71 \text{ mcd/m}^2/\text{lux}$ . Finalement, la vitesse de dégradation de la ligne TPC est la plus faible, elle perd environ  $60 \text{ mcd/m}^2/\text{lux}$  par an.

La solution de regroupement pour ce cluster, présentée dans le chapitre 3, propose de remplacer les lignes de marquage simultanément tous les 13 mois. Le regroupement est donc périodique, les trois marquages sont maintenus en même temps. Cependant la stratégie de regroupement dynamique a donné les résultats suivants sur un horizon de planification de 60 mois (voir table 4.5) :

La figure 4.7 présente la fiabilité du système sous les deux stratégies de regroupement. La courbe en vert illustre la fiabilité quand un regroupement statique est pris en compte. Dans ce cas, la fiabilité est périodique et varie entre 1 et 0.5. La signalisation horizontale perd en maximum 50% de rétro réflexion avec une fiabilité moyenne de 0.82. La courbe jaune présente la fiabilité du marquage routier sous un regroupement dynamique des ac-

Cluster	La longueur (km)	Coût d'inspection pour 3 lignes
1	9.18	27540
2	12.24	36720
3	9.18	27540
4	11.22	33660
5	2.04	6120
6	27.54	55080
7	4.08	12240
8	19.38	38760
9	5.1	15300

TABLE 4.4 – Coûts d'inspection des lignes de marquage par cluster

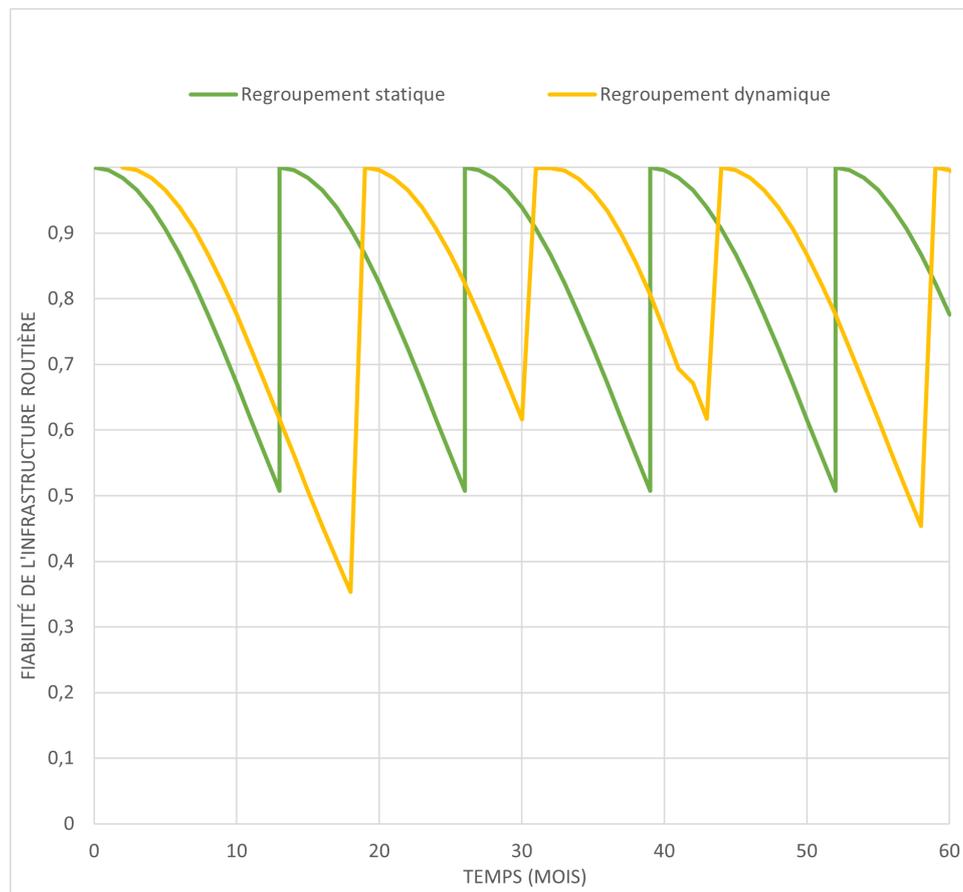


FIGURE 4.7 – Fiabilité des marquages routiers sous les deux stratégies de regroupement des actions de maintenance

tions de maintenance. Elle varie entre 0.6 et 1 avec une fiabilité moyenne de 0.86%. Certes la différence de fiabilité entre les deux stratégies ne dépasse pas les 0.04%, mais d'un point de vue économique, le regroupement dynamique est plus intéressant. En effet, pour le regroupement statique, les lignes de marquage sont remplacées tous les 13 mois. Sur un horizon de planification de 60 mois, 12 actions de maintenance sont planifiées. Par contre le regroupement dynamique propose moins d'actions de maintenance sur le même horizon.

Groupes	Date de maintenance
$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	17
$\{1^2, 2^2, 3^2\}$	28
$\{1^3, 2^3, 3^3\}$	40
$\{1^4, 2^4, 3^4\}$	54

TABLE 4.5 – Solution de maintenance du cluster 1 sous un regroupement dynamique

Un autre exemple est donné par le cluster 5 qui était caractérisé comme un cluster atypique. La figure 4.8 présente la fiabilité de ce cluster sous les deux stratégies de regroupement. La courbe en vert illustre la fiabilité du système avec le regroupement statique de maintenance et la deuxième en jaune est dédiée au regroupement dynamique des actions de maintenance. On remarque que les deux courbes ont la même forme et la même tendance. La fiabilité moyenne aussi reste presque équivalente. En effet, la fiabilité moyenne du système sous le regroupement statique est 0.41 tandis qu'elle est de 0.43 pour le regroupement dynamique. On remarque aussi qu'entre les mois 30 et 40, le système atteint sa fiabilité la plus faible dans le cas de la stratégie de regroupement statique alors que sous la stratégie de regroupement dynamique le système atteint une fiabilité égale à 1 (le système est comme neuf).

La figure 4.9 illustre la fiabilité du cluster 6 (e contient que deux lignes de marquage) sous les deux stratégies de regroupement. La courbe en vert présente la fiabilité du système avec un regroupement dynamique et celle en jaune est pour le regroupement statique. On remarque que les deux courbes ont la même tendance vu que tous les composants de ce cluster se remplacent en même temps. D'un autre côté, le niveau de la fiabilité moyenne du regroupement statique est de 0.83% contre 0.8% pour le regroupement dynamique. On remarque donc qu'il y a une légère différence au niveau de la fiabilité. D'un point de vue économique, le profit économique sous un regroupement statique est d'environ 15% tandis qu'il est de 11% pour un regroupement dynamique. Dans ce cas, le regroupement statique est plus intéressant.

En conclusion, pour un gestionnaire d'infrastructure routière, le regroupement dynamique des actions de maintenance est plus intéressant d'un point de vue fiabilité. En effet, la dégradation de l'infrastructure routière n'est pas stationnaire et peut être influencée par les événements externes.

#### 4.4.2.2 Regroupement dynamique des actions de maintenance de l'infrastructure routière

En appliquant le processus gamma sur les données de la chaussée (la fissuration observée par inspection) et avec un seuil de fissuration de 15%, on souhaite obtenir le seuil critique tolérable pour la chaussée. La figure 4.10 représente la dégradation de toutes les sections du Texas sans tenir compte des zones stratégiques de maintenance. La fissuration varie en général en 0 et 32%. Le processus gamma indique qu'à partir du moment où les sections représentent 7.1% de fissuration, le gestionnaire de l'infrastructure routière a 24

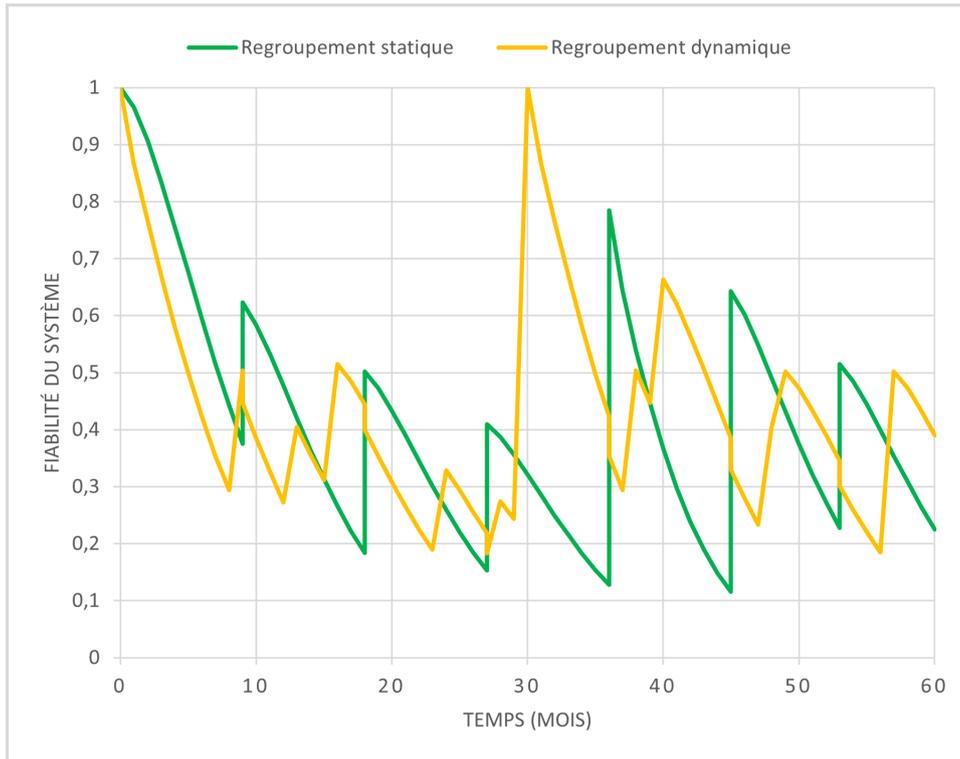


FIGURE 4.8 – Fiabilité des marquages routiers du cluster 5 sous les deux stratégies de regroupement des actions de maintenance

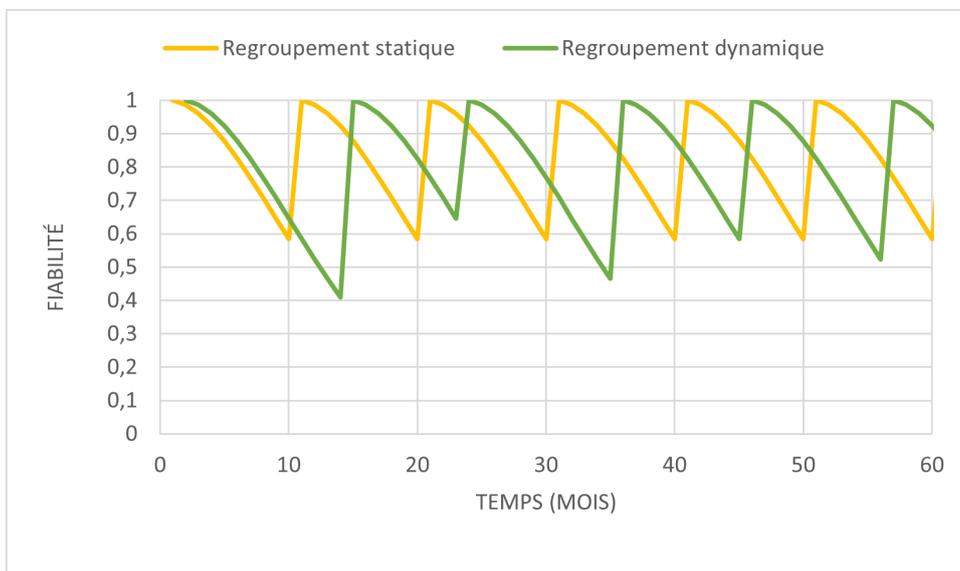


FIGURE 4.9 – Fiabilité des marquages routiers du cluster 6 sous les deux stratégies de regroupement des actions de maintenance

mois pour organiser une campagne de maintenance.

Prenant en compte, la classification présentée dans le chapitre 2, la figure 4.11 représente la fissuration des sections de ce cluster durant la période d'observation. La

fissuration de ces sections n'a jamais dépassé le seuil critique (15%). Le processus gamma indique qu'au moment où les sections de ce cluster franchissent un pourcentage de fissuration de 8.7%, le gestionnaire de l'infrastructure routière a 24 mois pour organiser une campagne de maintenance.

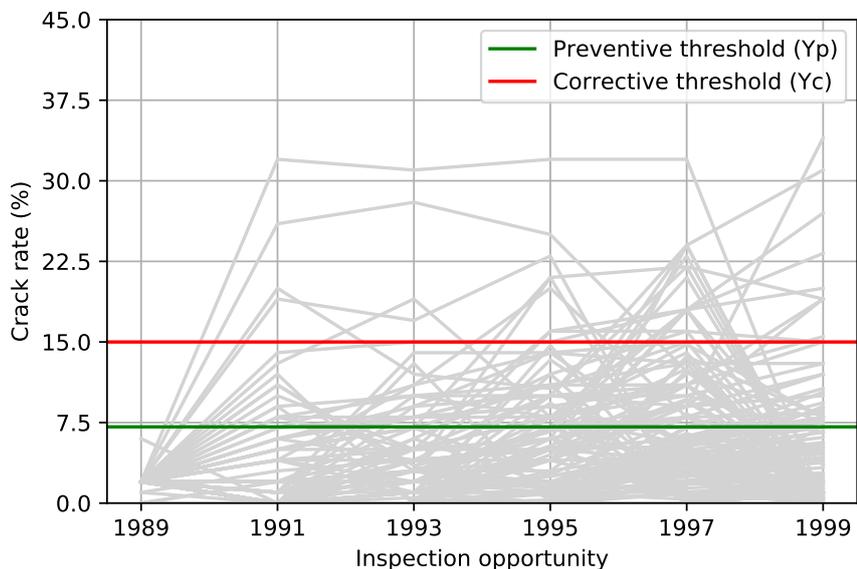


FIGURE 4.10 – Stratégie de maintenance des sections de chaussée sans tenir compte de la classification

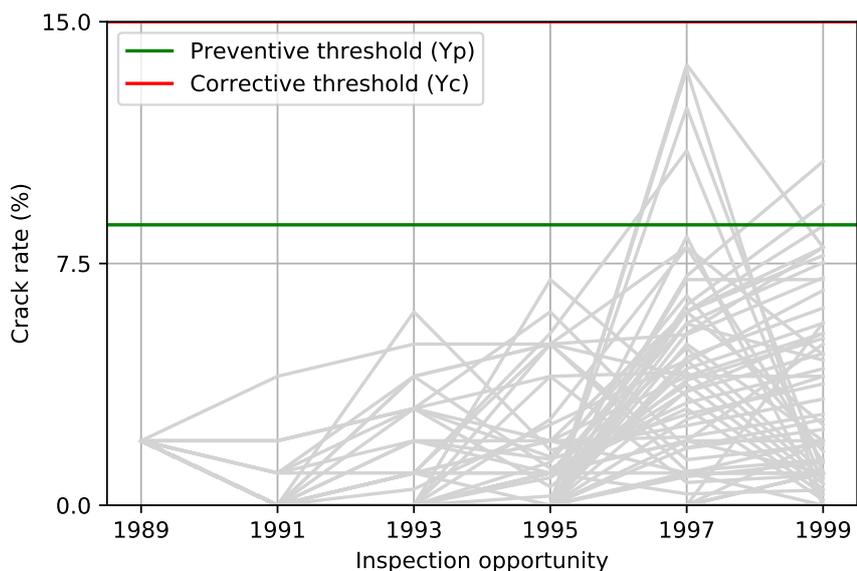


FIGURE 4.11 – Stratégie de remplacement conditionnelle pour le cluster 1

Cluster	Seuil préventif	Coût de maintenance préventive	Coût d'inspection	Alpha	Beta	Vitesse de dégradation
1	8,7	45000	4500	1,41	1,82	2,58
2	9,5	20000	2000	3,05	0,76	2,33
3	9,1	4000	400	80,66	0,05	4,50
4	6,7	5000	500	1,10	11,58	12,79
5	5,2	7000	700	1,86	3,26	6,09
6	6,2	2000	200	1,54	3,30	5,11
7	5,2	1000	100	1,66	4,18	6,9
8	6,2	6000	600	2,73	1,56	4,2
0 (global)	7,1	100000	10000	1,25	3,411	4,29

TABLE 4.6 – Résultats du processus Gamma appliqué aux clusters de la chaussée

La table 4.6 représente les résultats de l'application du processus Gamma sur les clusters de la chaussée du Texas sans tenir compte de la classification en zone de maintenance (représenté par le cluster 0). Le coût de la maintenance préventive étant fixé à 100 000 unités et celui réservé pour les inspections est donné par 10 000 unités. Ces coûts sont divisés pour les clusters proportionnellement aux nombres de sections appartenant à chacun. La table 4.6 illustre aussi les paramètres de la loi Gamma associée à chaque cluster et aussi la vitesse de la dégradation qui est donnée par la moyenne de la loi Gamma  $\alpha * \beta$ .

Selon La table 4.6, le seuil préventif de maintenance pour les clusters varie entre 5.2 et 9.5%. Cela signifie, pour un pourcentage de fissuration de maximal de 15%, au moment où un cluster franchit ce seuil, le gestionnaire de l'infrastructure routière dispose de 24 mois pour organiser une campagne de maintenance. La vitesse de dégradation quant à elle varie entre 2.33 et 12.79. On constate donc une grande variété de dégradation. En fonction de la position des sections de route, la dégradation change.

Dans la suite de ce chapitre, le cluster 1 est pris comme un exemple d'illustration. Ce choix est justifié par la présence de plus de sections de route et le plus de marquage routier.

La figure 4.12 représente le plan de maintenance individuelle de ce système. Les lignes axiale, la bande d'arrêt d'urgence et la ligne TPC sont respectivement maintenus tous les 11, 12 et 19 mois. Sur un horizon de planification de 300 mois (25 ans) représentant 2 cycles de maintenance, la ligne axiale est remplacée 21 fois, la bande d'arrêt d'urgence 15 fois, la bande d'arrêt d'urgence 7 fois et la chaussée 2 fois.

Le plan de regroupement statique est donné par la figure 4.13, cette stratégie a proposé un regroupement en 15 groupes sur l'horizon de planification défini avec un profit économique de 10.3%.

En appliquant la stratégie de regroupement dynamique avec des inspections périodiques de 12 mois pour les lignes du marquage routier, le regroupement dynamique est représenté par la figure 4.14. Cette stratégie a permis de réduire le nombre d'actions de maintenance avec un profit économique de 13,47%. La table 4.7 résume le regroupement

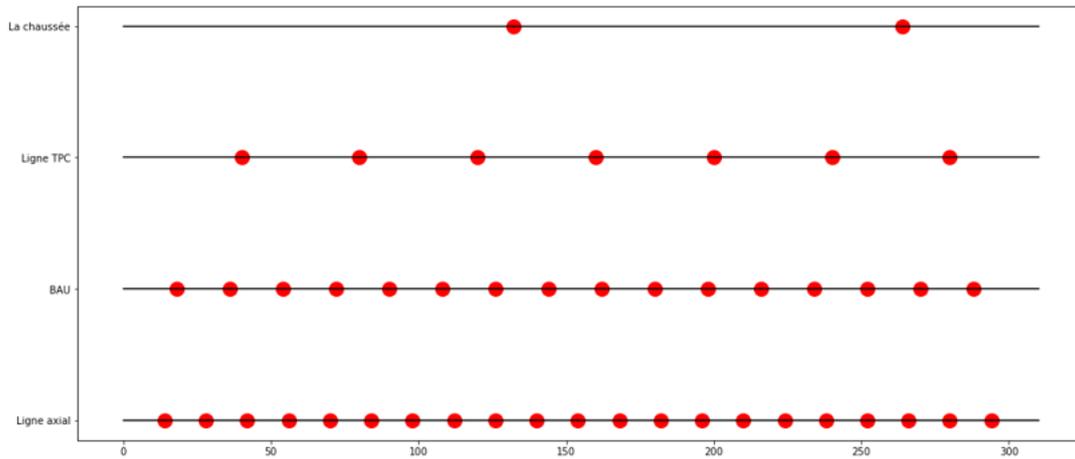


FIGURE 4.12 – Plan de maintenance individuelle des composants du cluster 1

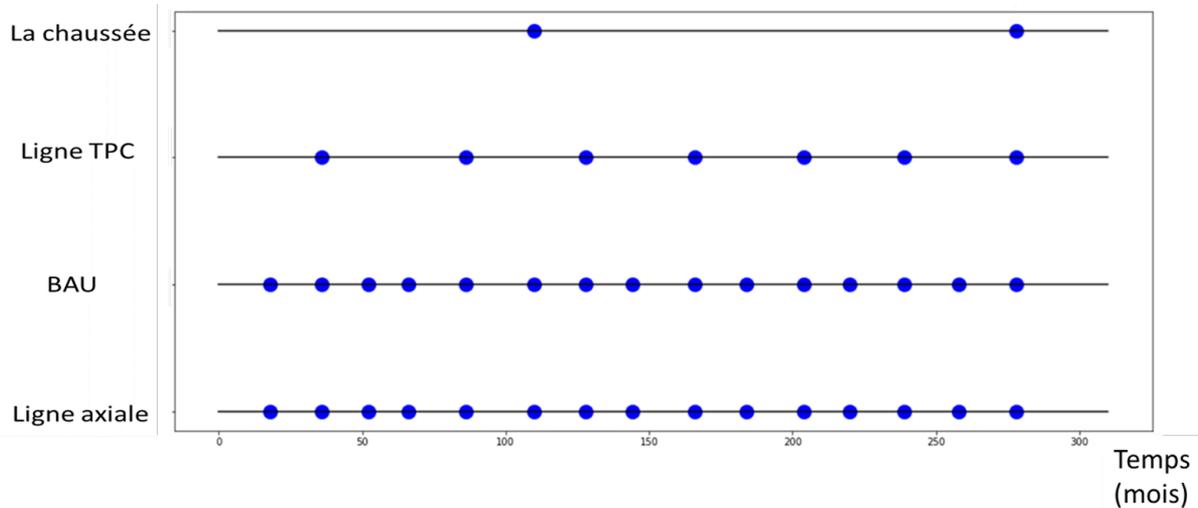


FIGURE 4.13 – Plan de regroupement statique pour le cluster 1

proposé par cette stratégie ainsi que les instants de maintenance associés.

Au niveau fiabilité, le regroupement statique des actions de maintenance appliqué au cluster 1 a donné un niveau de fiabilité moyen de 0.37 tandis que la fiabilité moyenne associée au regroupement dynamique est de 0.45.

La table 4.8 présente le profit économique ainsi que la fiabilité moyenne associés à chaque cluster de l'infrastructure routière sous les deux stratégies de regroupement (statique et dynamique). Pour ces résultats, les lignes de marquage sont inspectées périodiquement tous les ans et la chaussée est inspectée tous les deux ans. Généralement, le profit économique pour le regroupement statique est équivalent à celui associé au regroupement dynamique. Cependant, la fiabilité moyenne est plus élevée dans le cas du regroupement dynamique. D'après la table 4.9, le nombre d'actions de maintenance change entre les deux solutions proposées. Le nombre d'actions de maintenance pour le regroupement statique est plus élevé que celui associé au regroupement dynamique sauf pour le cluster

Cluster	Date de maintenance
$\{1^1, 2^1, 3^1\}$	17
$\{1^2, 2^2\}$	28
$\{1^3, 2^3, 3^2\}$	40
$\{1^4, 2^4, 3^3\}$	54
$\{1^5, 2^5, 3^4\}$	68
$\{1^6, 2^6, 3^5\}$	82
$\{1^7, 2^7, 3^6\}$	93
$\{1^8, 2^8, 3^7\}$	102
$\{1^9, 2^9\}$	114
$\{1^{10}, 2^{10}, 3^{10}\}$	123
$\{1^{11}, 2^{11}, 4^1\}$	133
$\{1^{12}, 2^{12}, 3^{11}\}$	144
$\{1^{13}, 2^{13}, 3^{12}\}$	159
$\{1^{14}, 2^{14}\}$	170
$\{1^{15}, 2^{15}, 3^{13}\}$	182
$\{1^{16}, 2^{16}\}$	194
$\{1^{17}, 2^{17}, 3^{14}\}$	204
$\{1^{18}, 2^{18}\}$	216
$\{1^{19}, 2^{19}, 3^{15}\}$	225
$\{1^{20}, 2^{20}\}$	237
$\{1^{21}, 2^{21}, 3^{16}\}$	246
$\{1^{22}, 2^{22}, 3^{17}, 4^2\}$	263

TABLE 4.7 – Instants de maintenance simultanée pour chaque groupe pour un regroupement dynamique pour le cluster 1

Cluster	Regroupement statique		Regroupement dynamique	
	Profit économique (%)	Fiabilité moyenne	Profit économique (%)	Fiabilité moyenne
1	11	0.37	13	0.45
2	10	0.52	11	0.55
3	8	0.57	10	0.61
4	12	0.46	15	0.48
5	15	0.39	13	0.44
6	13	0.43	10	0.48
7	10	0.38	11	0.42
8	11	0.53	12	0.57
9	14	0.56	17	0.6

TABLE 4.8 – Profit économique et fiabilité moyenne associés à chaque cluster sous les deux stratégies de regroupement

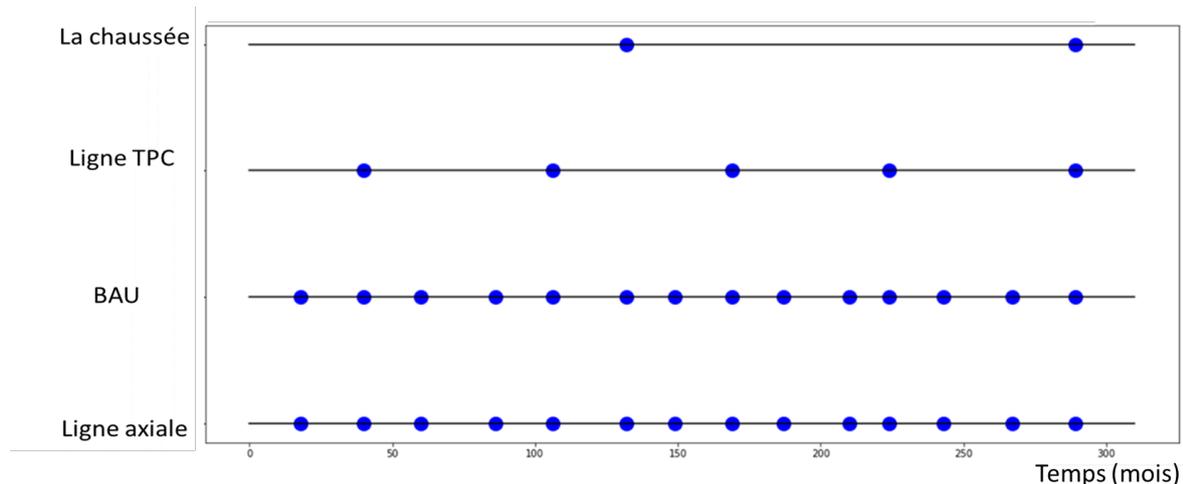


FIGURE 4.14 – Plan de maintenance regroupée et dynamique avec inspections des lignes de marquages tous les 12 mois

Clusters	Regroupement statique				Regroupement dynamique			
	Ligne axiale	BAU	Ligne TPC	Chaussée	Ligne axiale	BAU	Ligne TPC	Chaussée
1	15	15	7	2	14	14	5	2
2	16	16	16	2	14	15	12	2
3	20	10	17	2	17	9	14	2
4	16	23	16	2	13	22	13	2
5	36	19	8	2	33	17	6	2
6	24	24		2	25	25		2
7	16	16	18	2	15	15	15	2
8	20	20		2	18	18		2
9	23	23	19	2	20	20	17	2

TABLE 4.9 – Nombre d’actions de maintenance pour chaque cluster sous deux stratégies de regroupement sur un horizon de planification de 300 mois

6. Ceci est justifié par le fait que ce dernier adapte le plan de regroupement suivant la dégradation courante.

Pour identifier le pas d’inspection optimal, une analyse de sensibilité est faite. La figure 4.15 représente le profit économique associé à chaque pas d’inspection. Il est calculé avec des pas  $\tau = 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18$  et 24 mois. Les profits économiques donnés en fonction des pas d’inspections sont comparés avec celui donné par le plan de regroupement statique. Comme illustré par cette figure, les deux premiers pas donnent des profits économiques moins intéressants comparant à celui obtenu dans le cas d’un regroupement statique. Inspecter les composants tous les mois donne un profit économique négatif. Cela signifie que les coûts liés à l’inspection sont plus élevés par rapport au profit économique de la solution statique. A partir d’une périodicité d’inspection de 6 mois, le profit économique dynamique devient plus intéressant que le profit économique statique. Il varie généra-

lement entre 11% et 19 % et atteint son maximum dans le cas où les inspections sont effectuées tous les 18 mois. On remarque donc que le regroupement dynamique converge vers le regroupement statique. Cela signifie que plus les pas d'inspections sont éloignés moins sont les informations à intégrer. La solution donnée par le regroupement statique n'est pas mise à jour.

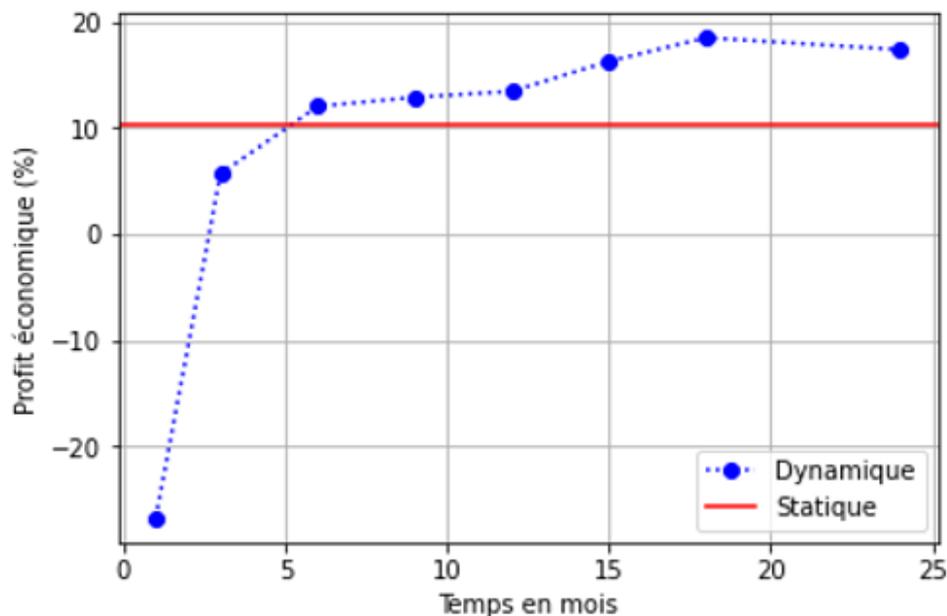


FIGURE 4.15 – Profit économique associée à chaque pas d'inspection pour le cluster 1

En résumé, le plan de maintenance adopté en mettant à jour le plan de regroupement en fonction des inspections du marquage routier et de la chaussée est présenté dans ce chapitre. Pour la chaussée, un pas d'inspection de 24 mois est respecté. Le niveau de fissuration d'une section de route est donc estimé en suivant le processus Gamma préalablement considéré. En fonction du pourcentage de fissuration donné par l'inspection, le plan de regroupement est modifié. Si la fissuration observée est inférieure à 15% et que la date de la maintenance de la chaussée n'est programmée qu'avant le moment où la section atteint le seuil critique, alors une date de maintenance préventive est donnée et le plan de regroupement est relancer pour optimisation comme illustrée par la figure 4.6.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une stratégie de regroupement dynamique pour les systèmes à plusieurs composants est proposée. Elle consiste à mettre à jour le plan de regroupement statique en fonction des états des composants de l'infrastructure routière. En résumé, le plan de regroupement dynamique des actions de maintenance passe par 4 étapes principales :

- La première phase consiste à étudier la structure du système et les dépendances entre ses composants.

- La deuxième phase établit un plan de maintenance individuel optimal pour chaque composant du système sans tenir compte des dépendances présentes entre les composants du système.
- La troisième phase propose un regroupement statique optimal des actions de maintenance sur un horizon de planification fini en utilisant une optimisation basée sur l'algorithme génétique.
- La quatrième phase a pour but de mettre à jour les dates des occurrences de maintenance en se basant sur l'état courant du système.

Le plan de regroupement dynamique des actions de maintenance se base donc sur les résultats des inspections périodiques de l'infrastructure routière. Pour estimer le niveau de dégradation des composants du système en question, un processus Gamma est utilisé afin d'étudier la vitesse de dégradation. Cette approche consiste à établir un seuil de maintenance préventive tolérable, permettant de donner du temps au gestionnaire de l'infrastructure routière pour organiser une maintenance dans les mois qui suivent.

Cette technique a démontré que le suivi des composants de l'infrastructure routière aide à établir un plan de maintenance plus adapté vu qu'elle considère la dégradation courante. En effet, des éléments externes peuvent influencer la vitesse de dégradation des composants. Ces changements doivent être inclus dans la stratégie de regroupement. Les actions de maintenance sont programmées en fonction de l'état actuelle de l'infrastructure routière. Au moment de l'inspection, le gestionnaire de l'infrastructure routière peut choisir entre trois solutions : retarder ou retarder une action de maintenance et ne rien changer. Le plan de maintenance dynamique évite donc de tomber sur le cas d'une sur ou sous maintenance.

La complexité de ce modèle de regroupement dynamique des actions de maintenance est plus du côté de l'estimation de la dégradation courante. En effet, la dégradation de la chaussée est un processus croissant tandis que celle du marquage routier est décroissant. Cela implique qu'on est face à deux modélisations du processus gamma. D'autres alternatives peuvent être utilisées afin de modéliser la dégradation courante de l'infrastructure routière.

La stratégie de regroupement proposée a démontré son efficacité d'un point de vue économique et fiabiliste. En effet, le coût de la maintenance reste plus élevé par rapport au coût de l'inspection. Pour avoir un profit économique encore plus intéressant, on peut imaginer des inspections de l'infrastructure routière par le biais d'autres techniques. Il faut tirer avantage des technologies déjà existantes pour inspecter plus fréquemment les routes tout en économisant les budgets. Les applications mobiles, Waze par exemple, peuvent être une bonne alternative d'inspections. Leurs utilisateurs peuvent indiquer les zones de routes où la dégradation est importante. De ce fait, ces techniques "low cost" envoient des informations à temps réel aux gestionnaires de l'infrastructure pour décider par la suite de l'intervention à effectuer. A long terme, quand une grande partie des véhicules seront connectés, on peut tirer avantage de leur présence sur les routes existantes pour les intégrer dans la prise de décision de maintenance. Cette technique peut être moins chère comparant à une la technique classique d'inspection. En traitant les images envoyées par ces caméras, le niveau de dégradation courant peut être évalué. Par ce biais,

les inspections sont plus fréquentes. Cela implique que le plan de regroupement sera plus adapté à la dégradation courante.

## Conclusion et perspectives

Le premier objectif de ces travaux de thèse était de proposer un plan de regroupement d'actions de maintenance pour l'infrastructure routière. Cette demande est motivée par l'arrivée des nouvelles solutions de transport telles que la conduite autonome présentée comme une potentielle solution pour répondre aux nouvelles contraintes de mobilité. Même si on est encore loin de pouvoir utiliser des véhicules complètement autonomes, la technologie nécessaire existe et des applications ont déjà été déclinées.

Il se trouve que ces véhicules sont dotés d'un système de pilotage automatique et de capteurs particulièrement élaborés les rendant capables de rouler sans aucune intervention humaine. Pour cela, ce type de véhicule utilise le marquage routier pour se positionner et comprendre l'environnement dans lequel il circule. La bibliographie scientifique a montré que la dégradation de l'infrastructure routière est incompatible avec le fonctionnement des véhicules totalement automatisés.

Dans ce mémoire de thèse, l'infrastructure routière est considérée comme un système à plusieurs composants : la chaussée et des lignes de marquage. Le nombre de composants dépend de la nature de la route et du nombre de voies. Comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique, plusieurs études ont proposé des stratégies de maintenance, soit pour le marquage routier, soit pour la chaussée. De ce fait, le but principal de ces travaux de thèse était de combiner ces deux approches afin de considérer l'infrastructure routière dans son ensemble.

La stratégie de regroupement d'actions de maintenance proposée est composée de trois étapes fondamentales : l'analyse de l'historique de maintenance et de l'évaluation de la dégradation, la définition d'une maintenance individuelle optimale puis la proposition d'une stratégie de maintenance par regroupement.

Par ailleurs, la stratégie de regroupement des actions de maintenance se base sur les données de retour d'expérience telles que l'historique d'inspection de la route. Or, en l'absence d'une base de données « complète » regroupant les inspections du marquage routier et de la chaussée, nous avons été amenés à proposer une route "simulée" s'appuyant sur deux jeux de données réelles.

Une première base française pour le marquage routier (les données de la route nationale 4) et une américaine (Long Term Pavement Performance) pour les données concernant la fissuration de la chaussée. L'accès à des bases de données routières suffisamment riches et renseignées fut donc la première difficulté rencontrée dans ces travaux.

Une perspective potentielle pour diminuer ce genre de problème, pourrait être de développer des applications mobiles d'aide à la conduite et d'assistance à la navigation basées sur des systèmes de positionnement par satellites couplés à une cartographie modifiable par ses utilisateurs. Les passagers des véhicules pourraient alors signaler la présence de fissures, nids de poule ou marquage non-visible en temps réel. Ces informations seraient par la suite envoyées aux gestionnaires de l'infrastructure routière pour les intégrer la base de retour d'expérience.

Les données étant maintenant disponibles, la première étape de la stratégie de regroupement (l'analyse de l'historique de maintenance et de l'évaluation de la dégradation) pouvait être initiée. Le marquage routier tout comme l'état de la chaussée étant localisés par des points de repère kilométriques, une section de route est divisée en différentes zones (définies par leurs PRs) sur lesquelles une mesure définit le niveau de dégradation de chaque élément. Une formalisation de la base de suivi de la dégradation a donc été proposée permettant d'identifier des zones stratégiques de maintenance.

Une classification des PRs en fonction de la dégradation est réalisée par une Classification Ascendante Hiérarchique. Au-delà de la grande simplicité de cette approche, cette méthode fournit de très bons résultats permettant à l'utilisateur de choisir le nombre de clusters qu'il veut mettre en évidence. Ainsi, plusieurs différentes zones géographiques ont pu être identifiées, caractérisées par leur historique de maintenance et leur dynamique de dégradation. Dans notre application routière, 9 clusters ont été identifiés pour le marquage routier et 8 pour la chaussée. Cette différence au niveau du nombre de clusters entre les deux composants de la route s'explique par la classification qui a été faite individuellement pour chaque composant, car provenant de deux bases différentes.

Il fallait ensuite estimer les paramètres de loi de survie pour chaque composant et pour chaque cluster. Or, les composants de l'infrastructure routière étant inspectés périodiquement, la date exacte où un composant passe d'un état de bon fonctionnement à un état limite de service n'est généralement pas observée. Les données d'inspections sont donc fortement censurées (à gauche, par intervalle et à droite). Il était donc nécessaire de gérer ce problème de données censurées.

Pour le marquage routier, Sathyanarayanan et al [?] ont établi un premier modèle de durée de vie basé sur la méthode de Maximum de Vraisemblance (MV). Cette méthode a été reformulée afin de prendre en considération les données censurées. Dans mes travaux de thèse, la proposition faite par M. Redondin avec un algorithme EM a donc été adoptée. En effet, cet algorithme reste plus simple au niveau des calculs par rapport à la méthode MV et apporte une estimation des paramètres de loi durées de vie des composants à partir de données triplement censurées.

L'algorithme EM a été appliqué à chaque cluster pour lequel il établit une date estimée du passage à l'état limite de service ainsi que les paramètres de la loi de Weibull associée. Ces derniers servent à identifier les intervalles de remplacement optimaux pour chaque composant. Pour cela, un remplacement systématique par rapport à l'âge a été pris en compte, s'appuyant sur la loi de durée de vie ainsi que sur des contraintes budgétaires. La définition de ces intervalles optimaux pour chaque composant définissait donc la deuxième phase de notre procédure de regroupement introduite précédemment. Si le choix a été fait de considérer pour cela un remplacement systématique par rapport à l'âge d'autres approches pourraient être considérées telles que le remplacement par bloc. Toutefois cette seconde phase de définition de la stratégie optimale individuelle ne représente que l'initialisation du processus de regroupement et la méthode utilisée pour cela ne nous semblait donc pas un point primordial d'investigation.

Tout ceci ayant été fait, il était alors possible de commencer le développement de l'algorithme de regroupement des tâches de maintenance. Pour cela, une modélisation du système était nécessaire. Elle se décompose en trois étapes : la modélisation structurelle, la modélisation stochastique et la modélisation de la dépendance économique. La modélisation structurelle d'un système consiste à identifier la structure du système (série, parallèle ou complexe). Dans notre cadre applicatif, l'infrastructure routière est considérée comme un système en série. Certes, la dégradation d'un composant de l'infrastructure routière n'empêche pas de l'utiliser, mais elle atteint un état limite de service. Dans certains cas, on peut constater la présence d'une fissure sur une ligne de marquage, ce qui rend cette dernière illisible par la caméra du véhicule. La dégradation de la chaussée peut donc influencer la dégradation du marquage routier. Si en plus du pourcentage de fissuration, on peut avoir sa position, le système pourra être modélisé comme un système série parallèle. Cela peut être une perspective pour les travaux à venir. La modélisation stochastique du système identifie les espaces d'états par lesquels ses composants passent. Pour ceux de l'infrastructure routière, on ne considère que deux états possibles : état de bon fonctionnement et état limite de service. Les stratégies de regroupement sont utilisées pour profiter des dépendances économiques entre les composants.

Un premier algorithme de regroupement de tâches de maintenance est proposé dans le chapitre 3, s'appuyant sur une approche statique. Dans ce cas, un horizon de planification a été défini et les dates de maintenance des groupes de composants de l'infrastructure routière ont été proposées. Aucun changement n'est alors à prévoir durant toute cette période. Une comparaison a été faite entre cette démarche et celle proposée par M. Redondin dans ses travaux de thèse sur le regroupement de la maintenance des marquages au sol. Il ressort que le regroupement statique proposé ici est plus intéressant d'un point de vue globale de fiabilité du système que l'approche "naïve" proposée par M. Redondin. La stratégie de regroupement statique proposée dans le chapitre 3 a donc démontré son efficacité d'un point de vue économique mais également en termes de fiabilité du système. La solution de regroupement optimale a été trouvée en utilisant un algorithme génétique. Ce dernier est le plus utilisé dans la littérature pour ce genre de problème d'optimisation.

Si les approches par regroupement statiques ont montré leur intérêt, elles ne tiennent cependant pas compte d'éventuelles modifications dans les dynamiques de dégradation

pouvant être détectées par des procédures de monitoring des infrastructures routières. Les méthodes de regroupements dynamiques des actions de maintenance permettent au contraire de prendre en considération les changements qu'un système peut subir. Dans ce manuscrit, nous avons proposé une mise à jour de la solution donnée par le regroupement statique. L'idée était d'affiner cette solution et de l'adapter au mieux à la dégradation courante observée lors des inspections des équipements. Il était donc nécessaire de modéliser le fait que les composants de l'infrastructure routière sont inspectés périodiquement pour évaluer leur niveau de la dégradation.

Pour cela, la dégradation des composants a été modélisée par un processus gamma. Le niveau de rétroreflexion d'un marquage routier diminue avec le temps tandis que le pourcentage de fissuration de la chaussée augmente. Deux processus de dégradation ont donc été proposés. La complexité de ce modèle résidait dans l'adaptation de la simulation de la dégradation des différents composants de l'infrastructure routière. Le processus gamma offre une grande flexibilité pour modéliser des comportements de dégradation différents, c'est pour cela qu'il a été considéré ici. Une stratégie de maintenance basée sur la dégradation courante a été proposée. Lors d'une inspection, en fonction de l'état observé et l'historique des observations précédentes une date de maintenance prévisionnelle est proposée. Cette dernière est par la suite comparée à la date de maintenance programmée par la stratégie de regroupement et une mise à jour est effectuée. Elle peut avancer ou retarder une action de maintenance et une solution de regroupement est par la suite adaptée en fonction de cette nouvelle date. Cette stratégie de regroupement a démontré une bonne efficacité au niveau du profit économique et aussi au niveau de la fiabilité globale du système. Comme pour le regroupement statique, l'optimisation de la solution de regroupement est modélisée par un algorithme génétique. Toutefois, M. Hanini et al [86] ont étudié ce problème avec d'autres algorithmes (algorithme genetique, Particle Swarm Optimizatio (PSO), méthodes par clustering). Ces travaux ont discuté l'efficacité de ces algorithmes pour différentes structures de système : série, parallèle et complexe. Il ressort de ces travaux que, comme l'algorithme génétique, ces algorithmes souffrent d'évolutivité et de convergence. Par conséquent, les solutions proposées basées sur des méthodes de clustering ont présenté des perspectives intéressantes pour le regroupement des tâches de maintenance ; les auteurs ayant démontré la performance de ces méthodes et de leur adaptabilité même pour des systèmes complexes de grande dimension.

Les solutions de regroupement des actions de maintenance, proposées dans ces travaux, sont appliquées sur un système en série avec 4 composants, mais restent applicables pour d'autres types de structures. En effet grâce au paramètre identifiant les composants critiques, l'algorithme de regroupement proposé peut prendre en considération des systèmes en parallèle ou en structure plus complexe.

Afin de minimiser encore plus les coûts de maintenance, une alternative d'inspection a été proposée en intégrant les caméras des véhicules autonomes et des véhicules connectés. En effet, les infrastructures routières sont actuellement inspectées, en vue de les maintenir, avec des appareils d'auscultation onéreux comme l'analyse du profil en long (pour mesurer l'uni des chaussées) ou l'Ecodyn 3 (pour mesurer la rétroreflexion des marquages). Comme la stratégie de regroupement de maintenance dynamique se base

sur des inspections périodiques des composants de l'infrastructure routière et que ces inspections avec des techniques "classiques" sont assez coûteuses, d'autres alternatives pourraient être proposées. Une première approche qui s'appuie sur les applications mobiles grand public comme Waze. Une autre perspective pourrait profiter de l'arrivée des véhicules autonomes et des véhicules connectés sur nos réseaux routiers pour exploiter les capacités des capteurs standards prévus initialement pour l'aide à la conduite pour mettre en place des routines d'inspection à bas-coût. Par exemple, au cours du voyage d'un véhicule, une caméra embarquée pourrait construire une base de données d'images qui seraient analysées par un algorithme de détection de fissures. Pour confirmer la pertinence de cette approche, il faudrait établir un état de l'art des algorithmes de détection de fissure, établir des bases de données d'images traitables par un tel algorithme et produire une première solution de détection de fissure. Ce sujet a fait l'objet d'un stage de fin d'études à l'institut Vedecom.

Ainsi pour le marquage routier, il y a deux grandes familles de solutions : une première basée sur une technique de traitement d'image et une deuxième s'appuyant sur une technique de deep learning.

Pour la chaussée, la méthode Otsu est la plus populaire pour la détection des fissures avec des techniques de traitement d'image [23]. Elle se base sur la différence entre les fissures et la chaussée. La plupart des solutions restent difficiles à mettre en œuvre parfaitement, car la différence de contraste entre la fissure et la couche de roulement environnante est faible, l'intensité de niveau de gris entre deux fissures est inégale et une ombre peut avoir une intensité similaire à la fissure. Les alternatives à la méthode Otsu sont le filtre de gradient ou les machines à vecteurs de support mais elles supposent toutes des images routières de très bonne qualité. Un exemple est proposé par N. D Hoang [91]. L'algorithme d'Otsu binarise une image routière en zones pour séparer les fissures et la chaussée. Les auteurs découpent cette solution en deux parties : le prétraitement de l'image routière et la segmentation de l'image. Le prétraitement améliore en amont la visualisation des fissures. Deux outils sont généralement déployés : l'étirement du contraste et l'égalisation de l'histogramme. La segmentation extrait les fissures en divisant l'image selon deux méthodes : la similitude et ou discontinuité. La première consiste à réaliser un seuillage sur la luminosité de la fissure et de l'arrière-plan. La seconde consiste à réaliser un seuillage sur les niveaux de gris.

Les travaux de détections de fissures par des techniques de machine learning proposent essentiellement des algorithmes basés sur un classifieur de réseau de neurones convolutif CNN. Ce dernier s'est avéré performant en traitement d'images pour la détection de défauts, notamment pour les images routières. Ces approches consistent à produire une première base d'images de chaussée et à les annoter au niveau pixélique pour indiquer les pixels décrivant des fissures et de la chaussée. Certains auteurs indiquent directement à ce stade le type de fissure. Le réseau CNN est ensuite entraîné par ces images avant d'analyser de nouvelles images de chaussée pour détecter les fissures. D'autres études ont profité du succès de l'algorithme CNN pour la détection de marquage routier. Li et al proposent un algorithme CNN et un réseau neurone récurrent pour détecter les attributs géométriques des marquages routiers. R. Ali et al ont [35] proposé une méta-analyse sur

les méthodes de détection de fissures suivant des modèle de réseaux de neurones.

En conclusion, beaucoup de travaux se sont intéressés à la détection du marquage routier et des fissures. Il en ressort qu'aujourd'hui on sait détecter mais on ne sait pas qualifier le marquage ou la fissure détectée. Une perspective de ces travaux est donc d'identifier la gravité de la dégradation de l'infrastructure routière. Il serait nécessaire, pour cela, de déterminer si les fissures détectées sur une route et le niveau de dégradation du marquage routier présentent une situation grave ou non. Les travaux de Boucetta et al ont [50] proposé une méthode de détection de fissure automatisée. La contribution de ce travail réside dans l'utilisation d'une méthode basée sur un réseau neurone CNN profond pour détecter les fissures sur des images et les conclusions d'un scanner 3D. Ces travaux montrent qu'il faudrait corrélérer des appareils de mesure standard à des détecteurs dans un premier temps. Trois niveaux de dégradation sont proposés (élevé, moyen et faible). Cette technique a détecté les fissures avec un taux de confiance de 95%.

T. Ahmed et al [33] proposent une approche d'apprentissage profond pour la détection des fissures et l'évaluation des dommages aux routes qui contribuera au secteur des transports. Le modèle proposé se compose de deux phases. Dans la première phase, le modèle est entraîné en utilisant l'apprentissage par transfert (VGG 16) pour détecter l'existence de fissures sur la chaussée. Dans la deuxième phase, un modèle combinant CNN (VGG16) et RNN LSTM Recurrent Neural Networks with Long Short-Term Memory) est formé pour classer la fissure dans l'une des deux catégories suivantes : faible ou grave. Ces modèles VGG16 et VGG16- LSTM ont donné une précision de 99,67% et 97,66%.

Pour le marquage routier, des études pour la détection de sa dégradation en utilisant des réseaux neurones sont proposées. A titre d'exemple, les travaux de Hillel et al [43] et Zhang et al [174]. Aucune de ces études ne prend en considération la notion du marquage rétroréfléchissant. Par conséquent, il pourrait être intéressant d'orienter les travaux dans ce sens.

Pour finir, cette thèse avait pour but de proposer une stratégie de maintenance pour l'infrastructure routière adaptée aux besoins des véhicules autonomes. Même si l'utilisation de ce genre de véhicule reste limitée il semblait être intéressant de profiter du déploiement croissant des véhicules connectés sur nos routes pour améliorer les stratégies de maintenance en enrichissant la connaissance que l'on a sur l'état du réseau au cours du temps. Cette étude ouvre une opportunité de coopération entre le véhicule autonome et connecté et l'infrastructure routière. En inspectant les routes avec les caméras des véhicules autonomes et/ ou connectés, il serait ainsi possible de proposer des plans de maintenance conditionnelle de plus en plus pertinents (et économiques) ; ce qui rendrait l'évaluation des apports de nouvelles solutions de mobilités, telles que celles proposées par les véhicules autonomes, plus simple et donc leur intégration plus efficace.

# Bibliographie

- [1] Calcul de distance. <https://lemakistatheux.wordpress.com/category/outils-danalyse-non-supervisee/la-classification-ascendante-hierarchique/>.
- [2] Diagramme de fiabilité. [https://moodle.univ-angers.fr/pluginfile.php/236998/mod\\_resource/content/1/Alstom-cours.pdf](https://moodle.univ-angers.fr/pluginfile.php/236998/mod_resource/content/1/Alstom-cours.pdf).
- [3] Données d'inspection de la chaussée au Quebec. <https://www.donneesquebec.ca/>.
- [4] Définition de la panne. [http://colbertserv.lyceecolbert-tg.org:3007/strategie\\_de\\_maintenance/medias/236.pdf?PHPSESSID=1e408c35e7138c4fc5b57721c0b92382#:~:text=Panne%20\(NF%20EN%2013306\)%20%3A,fonctionnement%20%E2%86%92%20%C3%A9tat%20de%20dysfonctionnement](http://colbertserv.lyceecolbert-tg.org:3007/strategie_de_maintenance/medias/236.pdf?PHPSESSID=1e408c35e7138c4fc5b57721c0b92382#:~:text=Panne%20(NF%20EN%2013306)%20%3A,fonctionnement%20%E2%86%92%20%C3%A9tat%20de%20dysfonctionnement).
- [5] Définition de la rupture. [https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique\\_de\\_la\\_rupture](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_de_la_rupture).
- [6] Définition de la rétroréflexion. [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9tror%C3%A9flexion\\_d%27un\\_marquage\\_routier](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9tror%C3%A9flexion_d%27un_marquage_routier).
- [7] Définition du mouvement Brownien. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mouvement\\_brownien](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mouvement_brownien).
- [8] Définition du système. [https://stringfixer.com/fr/Complex\\_systems](https://stringfixer.com/fr/Complex_systems).
- [9] Définition système en série. <http://jackadit.com/index.php?p=indus3#:~:text=4.,si%20les%20d%C3%A9faillances%20sont%20ind%C3%A9pendantes>.
- [10] Ecodyn. <https://www.nextroad.com/produit/ecodyn-3/>.
- [11] Éléments de mécanique linéaire de la rupture. [http://mms2.ensmp.fr/mms\\_paris/2015/transparents/RUPTURE2015.pdf](http://mms2.ensmp.fr/mms_paris/2015/transparents/RUPTURE2015.pdf).
- [12] Exemple de dégradation de la chaussée. 100-104. [https://www.groupe-sma.fr/SGM/jcms/jizhprod\\_77285/fr/desordres-sur-les-voiries](https://www.groupe-sma.fr/SGM/jcms/jizhprod_77285/fr/desordres-sur-les-voiries).
- [13] Exemple d'inspection de la base LTPP. <https://infopave.fhwa.dot.gov/Media/DistressMapsImages/>.
- [14] Guide d'utilisation de la base LTPP. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/21038/21038.pdf>.

- [15] Historique de la maintenance. <https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.univ-angers.fr%2Fdocs%2Fetudquassi%2Fmaintenance.pdf>.
- [16] Historique de la maintenance. <https://www.beaucemedia.ca/2020/10/29/levolution-de-la-maintenance-industrielle/>.
- [17] Historique de la maintenance. <https://www.weibull.com/hotwire/issue78/hottopics78.htm>.
- [18] Loi Gamma. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_Gamma#:~:text=En%20th%C3%A9orie%20des%20probabilit%C3%A9s%20et,%CF%87%C2%B2%20et%20les%20distributions%20exponentielles](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_Gamma#:~:text=En%20th%C3%A9orie%20des%20probabilit%C3%A9s%20et,%CF%87%C2%B2%20et%20les%20distributions%20exponentielles).
- [19] L'évolution de la maintenance industrielle. [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%3%A9tror%C3%A9flexion\\_d%27un\\_marquage\\_routier](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%3%A9tror%C3%A9flexion_d%27un_marquage_routier).
- [20] Niveau d'autonomie des véhicules autonomes. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Niveau\\_d%27autonomie\\_d%27un\\_v%C3%A9hicule\\_automobile](https://fr.wikipedia.org/wiki/Niveau_d%27autonomie_d%27un_v%C3%A9hicule_automobile).
- [21] Norme NF EN 13306 :. <https://www.weibull.com/hotwire/issue78/hottopics78.htm>.
- [22] Optimisation du coût de la maintenance. [bassetti-group.com/maintenance-dans-lindustrie-comment-optimiser-les-couts/](https://www.bassetti-group.com/maintenance-dans-lindustrie-comment-optimiser-les-couts/).
- [23] Otsu thresholding. <https://hbyacademic.medium.com/otsu-thresholding-4337710dc519>.
- [24] Présentation de la route nationale 4. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Route\\_nationale\\_4\\_\(France\\_m%C3%A9ropolitaine\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Route_nationale_4_(France_m%C3%A9ropolitaine)).
- [25] Présentation des sections du Texas. <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/applications/traffic-data-viewer/tdv-definitions/Functional-Classifications.htm>.
- [26] Présentation Ecodyn 3. [https://www.ifsttar.fr/uploads/tx\\_ifsttarph2/documents/ECODYN-3.pdf](https://www.ifsttar.fr/uploads/tx_ifsttarph2/documents/ECODYN-3.pdf).
- [27] Rapport sur les véhicules autonomes. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-37182-rapport-complet-etude-vehicule-autonome-forum-vies-mobiles-mars-2021.pdf>.
- [28] Synthèse infrastructure routière. <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2022-03/20220310-synthese-entretien-routes-nationales-departementales.pdf>.
- [29] Type de dégradation de la chaussée. [http://www.cotita.fr/IMG/pdf/Typologies\\_de\\_degradation\\_de\\_chaussees.pdf](http://www.cotita.fr/IMG/pdf/Typologies_de_degradation_de_chaussees.pdf), note = Accessed : 2010-09-30.
- [30] Étude MIRE : Impact de la révolution des usages de la mobilité sur les infrastructures routières et leurs Équipements <https://www.routesdefrance.com/etude-mire-impact-de-la-revolution-des-usages-de-la-mobilite-sur-les-infrastructures-routieres-et-leurs-equipements-4970/>.
- [31] Mohamed Abdel-Hameed. A gamma wear process. *IEEE transactions on Reliability*, 24(2) :152–153, 1975.

- [32] Badr Abou El Majd, J-A Desideri, and Abderrahmane Habbal. Optimisation de forme fluide-structure par un jeu de nash. *Revue Africaine de la Recherche en Informatique et Mathématiques Appliquées*, 13 :3–15, 2010.
- [33] Tawsin Uddin Ahmed, Mohammad Shahadat Hossain, Md Jahangir Alam, and Karl Andersson. An integrated cnn-rnn framework to assess road crack. In *2019 22nd International Conference on Computer and Information Technology (ICIT)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [34] GaMAC Alfano and MA1011 Crisfield. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites : mechanical and computational issues. *International journal for numerical methods in engineering*, 50(7) :1701–1736, 2001.
- [35] Raza Ali, Joon Huang Chuah, Mohamad Sofian Abu Talip, Norrima Mokhtar, and Muhammad Ali Shoaib. Structural crack detection using deep convolutional neural networks. *Automation in Construction*, 133 :103989, 2022.
- [36] Dawn An, Joo-Ho Choi, and Nam Ho Kim. Prognostics 101 : A tutorial for particle filter-based prognostics algorithm using matlab. *Reliability Engineering & System Safety*, 115 :161–169, 2013.
- [37] Gordon R Antelman and I Richard Savage. Surveillance problems : Wiener processes. *Naval Research Logistics Quarterly*, 12(1) :35–55, 1965.
- [38] Francesco Asdrubali, Cinzia Buratti, Elisa Moretti, Francesco D’Alessandro, and Samuele Schiavoni. Assessment of the performance of road markings in urban areas : the outcomes of the civitas renaissance project. *The Open Transportation Journal*, 7(1), 2013.
- [39] Daniel Ashlock. *Evolutionary computation for modeling and optimization*, volume 571. Springer, 2006.
- [40] Darko Babić, Dario Babić, Mario Fiolčić, Arno Eichberger, and Zoltan Ferenc Magosi. Impact of road marking retroreflectivity on machine vision in dry conditions : on-road test. *Sensors*, 22(4) :1303, 2022.
- [41] Vladimir Babishin and Sharareh Taghipour. Optimal maintenance policy for multicomponent systems with periodic and opportunistic inspections and preventive replacements. *Applied Mathematical Modelling*, 40(23-24) :10480–10505, 2016.
- [42] Narayanaswamy Balakrishnan, Laurent Bordes, Christian Paroissin, and Jean-Christophe Turlot. Méthodes de détection d’une rupture dans des échantillons de petite taille suivant des lois exponentielles.
- [43] Aharon Bar Hillel, Ronen Lerner, Dan Levi, and Guy Raz. Recent progress in road and lane detection : a survey. *Machine vision and applications*, 25(3) :727–745, 2014.
- [44] José Barata, C Guedes Soares, Marzio Marseguerra, and Enrico Zio. Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for ‘on condition’ maintenance optimisation. *Reliability Engineering & System Safety*, 76(3) :255–264, 2002.
- [45] Richard Barlow and Larry Hunter. Optimum preventive maintenance policies. *Operations research*, 8(1) :90–100, 1960.

- [46] Richard E Barlow and Frank Proschan. Statistical theory of reliability and life testing : probability models. Technical report, Florida State Univ Tallahassee, 1975.
- [47] Nicolas Barnier and Pascal Brisset. Optimisation par algorithme génétique sous contraintes. *HAL*, 1999, 1999.
- [48] Christophe Bérenguer, Antoine Grall, and Bruno Castanier. Simulation and evaluation of condition-based maintenance policies for multi-component continuous-state deteriorating systems. In *ESREL'2000 and SRA-Europe Annual Conference Foresight and Precaution, 2000*, 2000.
- [49] Laurent Bordes, Christian Paroissin, and Ali Salami. Un modèle de dégradation basé sur un processus gamma et le mouvement brownien. In *41èmes Journées de Statistique, SFdS, Bordeaux*, 2009.
- [50] Zakaria Boucetta, Abdelaziz El Fazziki, and Mohamed El Adnani. A deep-learning-based road deterioration notification and road condition monitoring framework. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 14(3), 2021.
- [51] Keomany Bouvard, Samuel Artus, Christophe Bérenguer, and Vincent Cocquemot. Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. application to commercial heavy vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6) :601–610, 2011.
- [52] Radim Bris, Eric Châtelet, and Farouk Yalaoui. New method to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems. *Reliability engineering & system safety*, 82(3) :247–255, 2003.
- [53] Gabriella Budai-Balke. *Operations research models for scheduling railway infrastructure maintenance*. Number 456. Rozenberg Publishers, 2009.
- [54] Tomasz E Burghardt, Harald Mosböck, Anton Pashkevich, and Mario Fiolíć. Horizontal road markings for human and machine vision. *Transportation research procedia*, 48 :3622–3633, 2020.
- [55] Bruno Castanier. *Contribution à l'optimisation de la décision sous incertitudes : application à la maintenance*. PhD thesis, Université de Nantes, 2012.
- [56] Christophe Chesneau. Modèles de régression. 2017.
- [57] Deo Chimba, Emmanuel Kidando, and Mbakisya Onyango. Evaluating the service life of thermoplastic pavement markings : Stochastic approach. *Journal of Transportation Engineering Part B-Pavements*, page 4018029, 2018.
- [58] Danny I Cho and Mahmut Parlar. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European journal of operational research*, 51(1) :1–23, 1991.
- [59] K Das, RS Lashkari, and S Sengupta. Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 183(1) :162–180, 2007.
- [60] Anne de Bortoli. *Pour un entretien routier durable : prise en compte des conséquences de l'interaction chaussée-véhicule dans l'aide à la décision des politiques de resurfacement-illustration par un cas autoroutier français*. PhD thesis, Université Paris Est, 2018.

- [61] C De Rham. La classification hiérarchique ascendante selon la méthode des voisins réciproques. *Cahiers de l'analyse des données*, 5(2) :135–144, 1980.
- [62] Rommert Dekker. Integrating optimisation, priority setting, planning and combining of maintenance activities. *European Journal of Operational Research*, 82(2) :225–240, 1995.
- [63] Rommert Dekker, Hans Frenk, and Ralph E Wildeman. How to determine maintenance frequencies for multi-component systems? a general approach. In *Reliability and maintenance of complex systems*, pages 239–280. Springer, 1996.
- [64] Rommert Dekker and Ingrid FK Roelvink. Marginal cost criteria for preventive replacement of a group of components. *European Journal of Operational Research*, 84(2) :467–480, 1995.
- [65] ROMMERT DEKKERT, ADRIAAN SMIT, and JEROSSEN LOSEKOOT. Combining maintenance activities in an operational planning phase : a set-partitioning approach. *IMA Journal of Management Mathematics*, 3(4) :315–331, 1991.
- [66] Estelle Deloux. *Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant*. PhD thesis, Université de Nantes, 2008.
- [67] Arthur P Dempster, Nan M Laird, and Donald B Rubin. Maximum likelihood from incomplete data via the em algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Methodological)*, 39(1) :1–22, 1977.
- [68] Phuc Do Van, Anne Barros, Christophe Bérenguer, Keomany Bouvard, and Florent Brissaud. Dynamic grouping maintenance with time limited opportunities. *Reliability Engineering & System Safety*, 120 :51–59, 2013.
- [69] Qiao Dong and Baoshan Huang. Evaluation of influence factors on crack initiation of ltpv resurfaced-asphalt pavements using parametric survival analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(2) :412–421, 2014.
- [70] Shi Dong, Jian Zhong, Peiwen Hao, Wenjin Zhang, Jun Chen, Yong Lei, and Adam Schneider. Mining multiple association rules in ltpv database : An analysis of asphalt pavement thermal cracking distress. *Construction and Building Materials*, 191 :837–852, 2018.
- [71] Donald S Dugdale. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2) :100–104, 1960.
- [72] Derek Edwards, Marcos E Orchard, Liang Tang, Kai Goebel, and George Vachtsevanos. Impact of input uncertainty on failure prognostic algorithms : Extending the remaining useful life of nonlinear systems. Technical report, Georgia Inst of Tech Atlanta School of Electrical and Computer Engineering, 2010.
- [73] Jacques Ehrlich, Dominique Gruyer, Olivier Orfila, and Nicolas Hautière. Autonomous vehicle : The concept of high quality of service highway. In *FISITA World Automotive Congress*, 2016.
- [74] Abdessamad El Krine, Joffrey Girard, Maxime Redondin, Christophe Heinkele, Aude Stresser, and Valérie Muzet. Road marking characterization for adas machine vision reliability. In *ESREL 2021 31st European Safety and Reliability Conference*, 2021.

- [75] Ayse Sena Eruguz, Tarkan Tan, and Geert-Jan van Houtum. Optimizing usage and maintenance decisions for k-out-of-n systems of moving assets. *Naval Research Logistics (NRL)*, 64(5) :418–434, 2017.
- [76] Brigitte Escofier and Jérôme Pagès. Analyses factorielles simples et multiples. *Dunod, Paris*, page 284, 1998.
- [77] Hongdong Fan, Changhua Hu, Maoyin Chen, and Donghua Zhou. Predictive condition-based replacement and spare ordering policy for dynamic systems suffering hidden degradatio. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(8) :1623–1628, 2009.
- [78] Frédéric Féré. Guide pratique de la signalisation horizontale. *SIGNATURE GROUP*, 2016.
- [79] Ali Gharbi, Yves Beauchamp, and Sylvia Andriamaharosa. Stratégie de maintenance préventive de type âge : Approche basée sur l’intégration de la simulation et des plans d’expérience. In *3e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation : Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriel MOSIM’01*, 2001.
- [80] Boris Vladimirovich Gnedenko, Yu K Belyayev, and Aleksandr Dmitrievič Solovyev. *Mathematical methods of reliability theory*. Academic Press, 2014.
- [81] David E Golberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Addion wesley*, 1989(102) :36, 1989.
- [82] SK Goyal and MI Kusy. Determining economic maintenance frequency for a family of machines. *Journal of the Operational Research Society*, 36(12) :1125–1128, 1985.
- [83] Antoine Grall. Modélisation stochastique pour la maintenance conditionnelle : impact du mode de surveillance. *Université de Technologie de Compiègne*, 2003.
- [84] AA Griffith. The phenomenom of rupture and flow in solids philos. *TransR Soc London Ser A*, 221 :168–98, 1920.
- [85] N Hammouda, G Habchi, C Barthod, and O Duverger. Fiabilité des systèmes mécatroniques en utilisant la modélisation et la simulation. *Université de Savoie, Nancy, France*, 2014.
- [86] Maria Hanini, Selma Khebbache, Laurent Bouillaut, and Makhoulouf Hadji. Dynamic and adaptive grouping maintenance strategies : New scalable optimization algorithms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability*, page 1748006X211049924, 2021.
- [87] Moncer Hariga. Coordinated overhaul scheduling of production units. *Naval Research Logistics (NRL)*, 41(4) :565–577, 1994.
- [88] Moncer Hariga. A deterministic maintenance-scheduling problem for a group of non-identical machines. *International Journal of Operations & Production Management*, 1994.
- [89] Nicolas Hautière, Vincent Ledoux, Jean-Philippe Tarel, Vincent Boucher, and Pierre Charbonnier. Observation, modélisation et prédiction de la dégradation temporelle des marquages routiers. *Proj. DIVAS-Dialogue Infrastruct. Véhicules pour Améliorer la Sécurité routiere*, pages 195–212, 2008.
- [90] Arne Hillerborg, Mats Modéer, and P-E Petersson. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and concrete research*, 6(6) :773–781, 1976.

- [91] Nhat-Duc Hoang. Detection of surface crack in building structures using image processing technique with an improved otsu method for image thresholding. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018.
- [92] Manouchehr M Hosseini, Roger M Kerr, and Robert B Randall. An inspection model with minimal and major maintenance for a system with deterioration and poisson failures. *IEEE Transactions on Reliability*, 49(1) :88–98, 2000.
- [93] George R Irwin. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. 1957.
- [94] Boukerch Issam, Takarli Bachir, Saidi Kamel, et al. Inspection de l'état des routes par traitement des vidéos. *Algerian Journal of Geosciences and Remote Sensing*, 2020.
- [95] Dale W Jorgenson and John J McCall. Optimal scheduling of replacement and inspection. *Operations Research*, 11(5) :732–746, 1963.
- [96] Khairy AH Kobbacy, DN Prabhakar Murthy, et al. *Complex system maintenance handbook*. Springer, 2008.
- [97] Radouane Laggoune, Alaa Chateauneuf, and Djamil Aissani. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. *Computers & Chemical Engineering*, 33(9) :1499–1510, 2009.
- [98] Radouane Laggoune, Alaa Chateauneuf, and Djamil Aissani. Preventive maintenance scheduling for a multi-component system with non-negligible replacement time. *International Journal of Systems Science*, 41(7) :747–761, 2010.
- [99] Khanh Le Son, Mitra Fouladirad, Anne Barros, Eric Levrat, and Benoît Iung. Remaining useful life estimation based on stochastic deterioration models : A comparative study. *Reliability Engineering & System Safety*, 112 :165–175, 2013.
- [100] Hyun-Seok Lee, Heung-Un Oh, and Jung-Hwa Jang. Development of the decay curve of pavement marking retroreflectivity based on a field survey. *REAAA Journal*, 16(1) :42–51, 2010.
- [101] Mei-Ling Ting Lee and George A Whitmore. Threshold regression for survival analysis : modeling event times by a stochastic process reaching a boundary. *Statistical Science*, 21(4) :501–513, 2006.
- [102] Philippe Lepert, Yves SAVARD, Diane Leroux, and Michel Rèche. Méthodes statistiques de prévision de l'évolution d'une chaussée. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 250, 2004.
- [103] Heping Li. *Condition-based maintenance policies for multi-component systems considering stochastic dependences*. PhD thesis, Troyes, 2016.
- [104] Adam Lipowski and Dorota Lipowska. Roulette-wheel selection via stochastic acceptance. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 391(6) :2193–2196, 2012.
- [105] Bin Liu, Mahesh D Pandey, Xiaolin Wang, and Xiujie Zhao. A finite-horizon condition-based maintenance policy for a two-unit system with dependent degradation processes. *European Journal of Operational Research*, 295(2) :705–717, 2021.

- [106] Jiang Long and Wei An Jiang. A method for maintenance scheduling in manufacturing systems based on tpm and mfop. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 44, pages 404–408. Trans Tech Publ, 2011.
- [107] Jian John Lu. *Performance of Traffic Markings in cold regions*. Transportation Research Center, Institute of Northern Engineering, University . . . , 1995.
- [108] Nabil Mancer. Contribution à l’optimisation de la puissance réactive en présence de dispositif de compensation dynamique (facts). 2012.
- [109] Ivan Marović, Ivica Androjić, Nikša Jajac, and Tomáš Hanák. Urban road infrastructure maintenance planning with application of neural networks. *Complexity*, 2018, 2018.
- [110] Marzio Marseguerra, Enrico Zio, and Luca Podofillini. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 77(2) :151–165, 2002.
- [111] Kamal Medjaher, Noureddine Zerhouni, and Jihene Baklouti. Data-driven prognostics based on health indicator construction : Application to pronostia’s data. In *2013 European Control Conference (ECC)*, pages 1451–1456. IEEE, 2013.
- [112] Latifa Meslem and Namir Ghoraf. Fiabilité des systèmes «k-consécutifs-sur-n : F» réparables. 2014.
- [113] Yann Monerie. *Fissuration des matériaux composites : rôle de l’interface fibre/matrice*. PhD thesis, UNIVERSITE AIX-MARSEILLE II, 2000.
- [114] George Morcoux and Zoubir Lounis. Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms. *Automation in construction*, 14(1) :129–142, 2005.
- [115] Kenneth E Murphy, Charles M Carter, and Anthony W Malerich. Reliability analysis of phased-mission systems : A correct approach. In *2007 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pages 7–12. IEEE, 2007.
- [116] Martin Newby and Richard Dagg. Optimal inspection and perfect repair. *IMA Journal of Management Mathematics*, 15(2) :175–192, 2004.
- [117] Kim Anh Nguyen. *Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, 2015.
- [118] Thi Phuong Khanh Nguyen, Bruno Castanier, and Thomas G Yeung. Maintaining a system subject to uncertain technological evolution. *Reliability Engineering & System Safety*, 128 :56–65, 2014.
- [119] Robin P Nicolai and Rommert Dekker. Optimal maintenance of multi-component systems : a review. *Complex system maintenance handbook*, pages 263–286, 2008.
- [120] MS Nikulin, N Limnios, N Balakrishnan, W Kahle, and C Huber-Carol. Advances in degradation modeling : applications to reliability. *Survival Analysis, and Finance*, 30 :35, 2010.
- [121] Andrew Clennel Palmer and James Robert Rice. The growth of slip surfaces in the progressive failure of over-consolidated clay. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 332(1591) :527–548, 1973.

- [122] KG Papakonstantinou and M Shinozuka. Optimum inspection and maintenance policies for corroded structures using partially observable markov decision processes and stochastic, physically based models. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 37 :93–108, 2014.
- [123] Kyung S Park. Optimal continuous-wear limit replacement under periodic inspections. *IEEE Transactions on reliability*, 37(1) :97–102, 1988.
- [124] Kyung S Park. Optimal continuous-wear limit replacement under periodic inspections. *IEEE Transactions on reliability*, 37(1) :97–102, 1988.
- [125] Weiwen Peng, Yan-Feng Li, Jinhua Mi, Le Yu, and Hong-Zhong Huang. Reliability of complex systems under dynamic conditions : A bayesian multivariate degradation perspective. *Reliability Engineering & System Safety*, 153 :75–87, 2016.
- [126] Adam M Pike, Timothy P Barrette, and Paul J Carlson. Evaluation of the effects of pavement marking characteristics on detectability by adas machine vision. *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) : Washington, DC, USA*, 2018.
- [127] Biswabrata Pradhan and Debasis Kundu. Analysis of interval-censored data with weibull lifetime distribution. *Sankhya B*, 76(1) :120–139, 2014.
- [128] Roy Radner and Dale Weldeau Jorgenson. Optimal replacement and inspection of stochastically failing equipment. *Studies in applied probability and management science*, pages 184–206, 1962.
- [129] Marvin Rausand and Arnljot Hoyland. *System reliability theory : models, statistical methods, and applications*, volume 396. John Wiley & Sons, 2003.
- [130] Maxime Redondin. Analyse factorielle pour la classification des produits de marquages routiers. *50emes Journée de Statistique, 2018, Palaiseau, France*, page 6p, 2018.
- [131] Maxime Redondin. *Approches de classifications à partir de données fortement censurées pour l’analyse de fiabilité et la définition de stratégies de maintenance : application aux marquages routiers dans un contexte de véhicules autonomes*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2018.
- [132] Maxime Redondin, Laurent Bouillaut, and Dimitri Daucher. Approches de classifications pour l’analyse de fiabilité et la définition de stratégies de remplacement préventive des marquages routiers. In *22e Congrès de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement ? ? 22*, page 12p, 2020.
- [133] Maxime Redondin, Laurent Bouillaut, and Dimitri Daucher. A clustering-based approach to segment a pavement markings line. *International Journal of Performability Engineering*, 16(10) :pp–1497, 2020.
- [134] Maxime Redondin, Laurent Bouillaut, and Dimitri Daucher. Em approach for weibull analysis in a strongly censored data context-application to road markings. *International Journal of Performability Engineering*, 17(4), 2021.
- [135] Marc Revilloud. *Architecture de perception adaptative pour la détection et le suivi multivoies*. PhD thesis, Université Paris-Saclay (ComUE), 2016.
- [136] Marc Revilloud, Dominique Gruyer, and Mohamed-Cherif Rahal. A lane marker estimation method for improving lane detection. In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 289–295. IEEE, 2016.

- [137] Marc Revilloud, Dominique Gruyer, and Mohamed-Cherif Rahal. A new multi-agent approach for lane detection and tracking. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3147–3153. IEEE, 2016.
- [138] Kaoutar Rhazali. Optimisation de la disponibilité des systèmes multi-etats. *Projet industriel de fin d'études*, 2015.
- [139] Murad S Samhouri. An intelligent opportunistic maintenance (om) system : A genetic algorithm approach. In *2009 IEEE Toronto international conference science and technology for humanity (TIC-STH)*, pages 60–65. IEEE, 2009.
- [140] Shankar Sankararaman and Kai Goebel. Why is the remaining useful life prediction uncertain? In *Annual Conference of the PHM Society*, volume 5, 2013.
- [141] Frédéric Santos. L'algorithme em : une courte présentation. *CNRS, UMR, 5199*, 2015.
- [142] Sudhakar Sathyanarayanan, Venky Shankar, and Eric T Donnell. Pavement marking retroreflectivity inspection data : a weibull analysis. *Transportation Research Record*, 2055(1) :63–70, 2008.
- [143] Benjamin Shiferaw. *Modélisation de la fissuration en milieu viscoélastique par approche Thick Level Set pour application au cas des enrobés bitumineux*. PhD thesis, École centrale de Nantes, 2019.
- [144] William E Sitzabee, Joseph E Hummer, and William Rasdorf. Pavement marking degradation modeling and analysis. *Journal of infrastructure systems*, 15(3) :190–199, 2009.
- [145] Mario Soilán, Belén Riveiro, Joaquín Martínez-Sánchez, and Pedro Arias. Segmentation and classification of road markings using mls data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123 :94–103, 2017.
- [146] Adam Reece Stacy. *Evaluation of machine vision collected pavement marking quality data for use in transportation asset management*. PhD thesis, 2019.
- [147] Masuda Sultana, Anisur Rahman, and Sanaul Chowdhury. A review of performance based maintenance of road infrastructure by contracting. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 2013.
- [148] Lorrino T. Rapport de la première tâche du projet sbadform. *Technical report (IFSTTAR)*, 2008.
- [149] Nader Tabatabaee, Mojtaba Ziyadi, and Yousef Shafahi. Two-stage support vector classifier and recurrent neural network predictor for pavement performance modeling. *Journal of Infrastructure Systems*, 19(3) :266–274, 2013.
- [150] Walid Tfaily. Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique. *Paris val of Marne university*, 2007.
- [151] Akila Thamizharasan, Wayne A Sarasua, David B Clarke, and William J Davis. A methodology for estimating the lifecycle of interstate highway pavement marking retroreflectivity. In *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC*, 2003.
- [152] LC Thomas. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering*, 16(4) :297–309, 1986.

- [153] Ali Tidjani, Maxime Redondin, Laurent Bouillaut, and Dimitri Daucher. Impact of road infrastructure characteristics on road markings. In *ESREL 2019, 29th European Safety and Reliability Conference*, page 9p, 2019.
- [154] Micaël Tille. *Choix de variantes d'infrastructures routières : méthodes multicritères*. PhD thesis, Verlag nicht ermittelbar, 2001.
- [155] Thomas Vallée and Murat Yildizoglu. Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie. *Revue d'économie politique*, pages 711–745, 2004.
- [156] R Van Egmond, R DEKKER, and RE Wildeman. Determining economic maintenance frequency of a transport fleet. *International journal of systems science*, 26(9) :1755–1757, 1995.
- [157] Jan M van Noortwijk. A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(1) :2–21, 2009.
- [158] CG Vassiliadis and EN Pistikopoulos. Maintenance scheduling and process optimization under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 25(2-3) :217–236, 2001.
- [159] Alexandre Voisin, Eric Levrat, Pierre Cochetoux, and Benoît Iung. Generic prognosis model for proactive maintenance decision support : application to pre-industrial e-maintenance test bed. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(2) :177–193, 2010.
- [160] Hai Canh Vu. *Stratégies de regroupement pour la maintenance des systèmes à composants multiples avec structure complexe*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, 2015.
- [161] Hai Canh Vu, Phuc Do Van, Anne Barros, and Christophe Bérenguer. Maintenance activities planning and grouping for complex structure systems. In *ESREL 2012-PSAM 2012-the Annual European Safety and Reliability Conference and 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*, page CDROM, 2012.
- [162] Feng Wang, Zhanmin Zhang, and Randy B Machemehl. Decision-making problem for managing pavement maintenance and rehabilitation projects. *Transportation Research Record*, 1853(1) :21–28, 2003.
- [163] Hongzhou Wang. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European journal of operational research*, 139(3) :469–489, 2002.
- [164] JIANG FENG WANG. *Optimisation distribuee multicritere par algorithmes genétiques et theorie des jeux et application a la simulation numerique de problemes d'hypersustentation en aerodynamique*. PhD thesis, Paris 6, 2001.
- [165] Wencai Wang and Yoram Koren. Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems. *Journal of manufacturing systems*, 31(2) :83–91, 2012.
- [166] Yuhong Wang, Kamyar C Mahboub, and Donn E Hancher. Survival analysis of fatigue cracking for flexible pavements based on long-term pavement performance data. *Journal of transportation engineering*, 131(8) :608–616, 2005.
- [167] Yukun Wang, Xiaopeng Li, Junyan Chen, and Yiliu Liu. A condition-based maintenance policy for multi-component systems subject to stochastic and economic dependencies. *Reliability Engineering & System Safety*, 219 :108174, 2022.

- [168] GA Whitmore. Estimating degradation by a wiener diffusion process subject to measurement error. *Lifetime data analysis*, 1(3) :307–319, 1995.
- [169] Ralph Edwin Wildeman, Rommert Dekker, and ACJM Smit. A dynamic policy for grouping maintenance activities. *European Journal of Operational Research*, 99(3) :530–551, 1997.
- [170] JM Worm and A Van Harten. Model based decision support for planning of road maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3) :305–316, 1996.
- [171] Tianyi Wu, Li Yang, Xiaobing Ma, Zihan Zhang, and Yu Zhao. Dynamic maintenance strategy with iteratively updated group information. *Reliability Engineering & System Safety*, 197 :106820, 2020.
- [172] Mengmeng Yang, Youchuan Wan, Xianlin Liu, Jingzhong Xu, Zhanying Wei, Maolin Chen, and Peng Sheng. Laser data based automatic recognition and maintenance of road markings from mls system. *Optics & Laser Technology*, 107 :192–203, 2018.
- [173] MA Younes, AM Khalil, and DM Hassan. Improving reliability by modifying system configuration. In *2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability*, pages 450–454. IEEE, 2011.
- [174] Youcheng Zhang, Zongqing Lu, Xuechen Zhang, Jing-Hao Xue, and Qingmin Liao. Deep learning in lane marking detection : a survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021.
- [175] Xiao-jun Zhou, Zhi-qiang Lu, Li-feng Xi, and Jay Lee. Opportunistic preventive maintenance optimization for multi-unit series systems with combing multi-preventive maintenance techniques. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 15(5) :513–518, 2010.
- [176] Yifan Zhou, Tian Ran Lin, Yong Sun, Yangqing Bian, and Lin Ma. An effective approach to reducing strategy space for maintenance optimisation of multistate series–parallel systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 138 :40–53, 2015.
- [177] Yifan Zhou, Zhisheng Zhang, Tian Ran Lin, and Lin Ma. Maintenance optimisation of a multi-state series–parallel system considering economic dependence and state-dependent inspection intervals. *Reliability Engineering & System Safety*, 111 :248–259, 2013.
- [178] Mariem Zouch. Decision dans l’incertain : Application à la gestion de l’entretien routier. *Universite de Nantes, France*, 2011.