



HAL
open science

**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**

Maxime Redondin

► **To cite this version:**

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. Infrastructures de transport. Université Paris-Est, 2018. Français. NNT : 2018PESC1118 . tel-02085842

HAL Id: tel-02085842

<https://theses.hal.science/tel-02085842v1>

Submitted on 31 Mar 2019

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 Paris-Est

École doctorale MSTIC

Discipline : Mathématiques

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

PAR : Maxime REDONDIN

Directeur : LAURENT BOUILLAUT, CHARGÉ DE RECHERCHE HDR (IFSTTAR)

Encadrant : DIMITRI DAUCHER, CHARGÉ DE RECHERCHE (IFSTTAR)

MEMBRES DU JURY:

Président : Arnaud DE LA FORTELLE, Professeur (Mines ParisTech)

Rapporteur : Anne GEGOUT-PETIT, Professeure (Université de Lorraine)

Rapporteur : Bruno CASTANIER, Professeur (Université d'Angers)

Examinateur : Allou SAME, Chargé de Recherche HDR (IFSTTAR)

Examinateur : Pierre CHARBONNIER, Directeur de recherche (Cerema Est)

Invité : Nadège FAUL, Chef de projet (VEDECOM)

Date de soutenance : 13 Décembre 2018

Résumé

La qualité et la fiabilité des infrastructures routières jouent un rôle majeur dans la sécurité. Cela est d'autant plus vrai lorsque l'on s'intéresse à la circulation de véhicules autonomes qui doivent être capables à terme de circuler seuls dans l'environnement routier. Les récents travaux menés au sein de VEDECOM montrent qu'une signalisation horizontale routière claire et visible est importante dans sa prise de décision. La détection des lignes de marquage est en grande partie réalisée par des caméras. Afin d'optimiser cette approche et prévenir les situations de non détection, cette thèse propose des outils d'analyse de fiabilité et d'aide à la maintenance de la signalisation horizontale.

Aujourd'hui, la visibilité des marquages est basée sur le phénomène de rétro-réflexion : un véhicule éclaire avec ses feux de croisement un marquage qui renvoie une partie de la lumière émise vers le conducteur. Pour établir son niveau de dégradation, des campagnes d'inspection sont réalisées par des rétro-réfectomètres montés sur des véhicules traceurs. La littérature des trente dernières années présente essentiellement des modèles de dégradation basés sur des méthodes de régression. Ces dernières présentent de nombreuses difficultés à être déployées dans le cadre d'un plan de maintenance. Cette thèse propose d'aborder ces questions sous l'angle de la théorie de la fiabilité et de la maintenance tout en tenant compte des pratiques actuelles. Une ligne de marquages est ici interprétée comme un système multi-composants montés en parallèle que cette thèse propose d'analyser en quatre points.

Premièrement, l'ensemble des inspections est formalisé en une base de suivi. Si des données sont manquantes et si l'historique de maintenance est indisponible, alors différentes approches basées sur une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sont proposées afin de les estimer.

Deuxièmement, l'entretien de la totalité d'une ligne est logistiquement délicat. Une CAH de la base de suivi a pour fonction d'établir les marquages suivant un même modèle de dégradation. Les clusters sont géographiquement localisés et corrélés à des situations précises comme un échangeur ou une agglomération. Pour ces raisons, ils sont interprétés comme des zones de maintenance stratégiques.

Troisièmement, une analyse de Weibull des marquages est proposée. Les instants de défaillance ne sont pas précisément indiqués par les rétro-réfectomètres. Ils sont statistiquement censurés à gauche, à droite ou par intervalle. En alternative à la méthode du Maximum de Vraisemblance, une approche basée sur un algorithme EM est proposé afin d'établir le modèle de Weibull décrivant la loi de survie des marquages et les censures estimées les plus vraisemblables.

Enfin, deux stratégies de maintenance sont proposées : systématique par rapport à l'âge et conditionnée par la dégradation courante. Ces stratégies sont adaptées de façon à être en adéquation avec les pratiques de maintenance de ce secteur industriel. La première permet une gestion passive de l'entretien tandis que la seconde permet une connaissance avancée de la ligne de marquages dans le temps.

Abstract

The quality and reliability of road infrastructure and its equipment play a major role in road safety. This is especially true if we are interested in autonomous car traffic. Recent papers from VEDECOM Institute proves that a clear and reliable road marking is important in its decision making. Marking lanes are detected by camera. These markings need an accurate maintenance strategy to guarantee that the markings remain perceptible. This report proposes different solutions based on the reliability and maintenance theory.

Today, the markings reliability is based on the retroreflective illuminance. A retroreflective marking reflects light from a vehicle headlight back in the direction of the driver. Marking retroreflectivity can be dynamically inspected using a retroreflectometer. The literature of the last thirty years proposes degradation models for retroreflective marking based on a regression model. All of them have a common weakness : they are difficult to apply directly to a given road network. This report presents maintenance models who math with current maintenance actions. A marking lane is interpreted as multi-unit system. All unit are laid in parallel. The global maintenance strategy is based on four points

First, the whole inspection data is formalized into one monitoring base. If inspection data is missing or if the maintenance historic is unavailable else an estimation process based on the Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) is proposed.

Second, to replace a whole markings lane is logistically difficult to work. Again, an AHC of the monitoring proposed several clusters. Each cluster presents its own degradation model. Clusters are geographically tracked and correlated to specific situation (interchange, urban area, bypass...). That's why a cluster is interpreted as a maintenance strategic area.

Thirdly, a Weibull analysis of each cluster is done. Current retroreflectometers cannot detects the exact failure moment. this information is statistically censored. Three cases are identified : left, right and interval censored. To parameter a Weibull model, an EM Algorithm is proposed as an alternative to the Maximum Likelihood Estimator. This algorithm is also an estimator to censored markings life time.

Finally, two classic preventive maintenance strategies are proposed : systematic according to the age and conditioned to the current degradation. Each one is credible according the current maintenance practice. The first proposed a passive management of the markings maintenance. The second ensures an advanced knowledge of the road network over the time.

Remerciement

Un marquage routier n'est pas de la peinture blanche achetée chez Bricoman. Cette petite boutade ouvre la plupart de mes interventions : Ma Thèse en 180 secondes¹, 3 minutes pour convaincre² et même ma soutenance ! Elle devait donc ouvrir ce manuscrit !

Après dix années d'études universitaire, je suis fier vous présenter ma thèse de doctorat en mathématique. L'idée de réaliser un doctorat commença par une plaisanterie lors d'une réunion avec mon professeur de mathématique de Terminal S, Marc Seray. Je souhaiterais profiter de cette anecdote pour le remercier de m'avoir donné le goût à cette discipline.

Ce manuscrit est l'aboutissement d'un long parcours intellectuel. A ce titre, je remercie l'université de Lorraine et plus particulièrement l'UFR MIM de Metz pour la qualité de son enseignement en mathématique. Je remercie en particulier Angela Pasquale et Patrick Florchinger qui ont su me montrer, à travers les groupes symplectiques et la formule d'Îto, l'élégance des mathématiques. Je remercie également Salah Mehdi pour sa gentillesse et pour m'avoir montré que je pouvais entreprendre un travail intellectuel de haut niveau. Je remercie également Philippe Bonneau et Nicolas Prudhon qui m'ont introduit aux problématiques de plus en plus croissantes des mathématiques en entreprises. Je remercie finalement Romuald Morhs de la Banque Centrale du Luxembourg qui m'a permis de développer mes premiers résultats en statistique.

Les soutiens familiaux et amicaux sont importants. Je remercie en premiers lieux mes parents, ma soeur et ma grand-mère. Je remercie également mes plus proches amis : Anna, Justine, Melissia, Simon, Christophe et Adrien. Je remercie plus particulièrement ce dernier d'avoir accepté la (pénible) tâche de relire ce manuscrit et mes articles. Je tiens à préciser que les coquilles restantes restent de mon fait. Je remercie également Allan Merino pour son amitié et nos passionnantes discussions en mathématiques.

Je remercie Laurent Bouillaut et Dimitri Daucher pour l'encadrement scientifique de ma thèse. Plus généralement, je remercie les laboratoires GRETTIA et LEPSIS de l'IFST-TAR pour m'avoir accueilli. En particulier Florence, Anna-Sarah, Latifa, Amélie, Josquin, Mohamed, Moncef, Milad, Eric et Allou.

Je remercie l'institut VEDECOM d'avoir financé ma thèse ainsi que Nadège Faul et l'équipe MOB03 pour l'encadrement de mes travaux. Je remercie mes plus proches collègues et aujourd'hui amis : Elsa, Séverine, Laurène, Katherine, Franck (et sa femme Julie), Mehdi, Jean-Louis et Nicolas. Je remercie ce dernier d'avoir réalisé les plus importants graphiques de ce manuscrit et ses précieux conseils dans la conception d'une figure.

Finalement, je remercie le CEREMA Est et la DIR Est de nous avoir transmis leurs données d'inspections de la Route Nationale 4. Je remercie également Frédéric Féré pour nos passionnantes discussions sur la signalisation horizontale. Je remercie finalement une nouvelle fois l'ensemble du jury pour avoir accepté d'analyser mes travaux et les passionnants échanges lors de la soutenance.

Il ne me reste plus qu'à vous souhaiter une bonne lecture !

1. https://www.youtube.com/watch?v=fb9u_7GqrAk

2. <https://www.youtube.com/watch?v=rBm7AZ9XquI>

Table des matières

1	Introduction	12
2	État de l’art sur les marquages rétro-réfléchissants	17
2.1	Infrastructure routière et signalisation horizontale	17
2.2	Description de la signalisation horizontale	19
2.2.1	Dimensionnements des marquages	19
2.2.2	Marquages rétro-réfléchissants	21
2.2.3	Pose d’un marquage	22
2.3	Véhicule autonome et marquage routier	23
2.4	Inspection de la signalisation horizontale	27
2.4.1	Rétro-réflexion et rétro-réfectomètre	27
2.4.2	Alternatives aux rétro-réfectomètres	29
2.5	Modèles de dégradation de la signalisation horizontale	33
2.5.1	Modèles de dégradation réalisés par des méthodes de régression	33
2.5.2	Fiabilité et maintenance des marquages	39
2.5.3	Autre	41
2.6	Questions annexes	42
2.6.1	Limites de la norme NF EN 1436	42
2.6.2	Lien avec l’accidentologie	43
2.7	Étude de cas : la Route Nationale 4	45
2.8	Synthèse et conclusions	46
3	Analyse de données de rétro-réfectométrie	49
3.1	Approche clustering pour l’estimation de données manquantes	49
3.1.1	La Classification Ascendante Hiérarchique	49
3.1.2	Reconstruction de données de rétro-réfectométrie	51
3.1.3	Comparaison avec l’interpolation linéaire	53
3.2	Exploration par une CAH pour l’identification de zones stratégiques	58
3.2.1	Analyse ponctuelle de la dégradation des marquages	58
3.2.2	Identification de zones stratégiques	58
3.2.3	Estimation de l’historique de maintenance	59
3.3	Étude de cas : la Route Nationale 4	62
3.3.1	Reconstruction des données manquantes	62
3.3.2	Analyse ponctuelle de la dégradation	63
3.3.3	Segmentation de la RN4	64
3.3.4	Estimation de l’historique de maintenance	65
3.4	Synthèse et conclusions	70

4	Analyse de Weibull de la signalisation horizontale	72
4.1	Durées de vie censurées, Maximum de Vraisemblance et algorithme EM . . .	72
4.2	Analyse de Weibull au moyen d'un algorithme EM	74
4.2.1	Gestion de durées de vie multicensurées	74
4.2.2	Itération et convergence de l'algorithme WEM	76
4.2.3	Modèle de mélange de distributions de Weibull censurées	80
4.3	Test d'adéquation en présence de données censurées	81
4.3.1	Formalisme initial	81
4.3.2	Tests graphiques	81
4.3.3	Comparaison des fonctions de répartition	82
4.3.4	Espace normalisé	82
4.4	Étude de cas : la Route Nationale 4	83
4.4.1	Modèle de Weibull simple	83
4.4.2	Comparaison des tests d'adéquation	85
4.4.3	Modèle de Weibull de mélange	86
4.5	Synthèse et conclusions	89
5	Maintenance d'une ligne de marquages	91
5.1	Modélisation de la maintenance préventive	91
5.1.1	Définition d'un plan de maintenance	91
5.1.2	Inspection et maintenance	93
5.1.3	Système multi-composants	95
5.1.4	Synthèse et conclusions	95
5.2	Répartition du budget d'entretien	96
5.3	Remplacement systématique par zone	97
5.3.1	Loi de Weibull de référence	97
5.3.2	Remplacement par rapport à l'âge	98
5.3.3	Remplacement par bloc	99
5.4	Remplacement conditionnel par zone	101
5.4.1	Formalisme général	101
5.4.2	Exemple : plan d'inspection annuel, semestriel ou mensuel	104
5.4.3	Loi gamma de référence	105
5.5	Application à la Route Nationale 4	105
5.5.1	Remplacement basé sur l'âge	105
5.5.2	Remplacement par bloc	111
5.5.3	Remplacement conditionné par la dégradation courante	115
5.5.4	Comparaison	119
5.6	Synthèse et conclusions	123
6	Conclusions et perspectives	125

A	Première généralisation à l'infrastructure routière	129
A.1	Introduction	129
A.1.1	La démarche de l'Open Data dans les infrastructures routières	129
A.1.2	Description de la base d'étude de la RN4	130
A.2	Analyse factorielle de données mixtes de la Route Nationale 4	132
A.2.1	Analyse factorielle de données mixtes	132
A.2.2	Application à la RN4	133
A.2.3	Synthèse et conclusions	138
A.3	Maximum de Vraisemblance et Algorithme EM	139
A.3.1	Maximum de Vraisemblance	139
A.3.2	Algorithme EM optimisé par Newton-Raphson	141
A.3.3	Comparaison	143
A.3.4	Synthèse et conclusions	144
A.4	Conclusion	145
B	Un réseau autoroutier	146
B.1	Présentation du réseau autoroutier	146
B.2	Analyse des données de rétro-réflexométrie	147
B.2.1	Reconstruction des données de rétro-réflexométrie	147
B.2.2	Suivi de la rétro-réflexion	147
B.2.3	Segmentation du réseau	150
B.2.4	Synthèse	150
B.3	Analyse de Weibull	151
B.4	Plan de maintenance	152
B.4.1	Stratégie préventive par rapport à l'âge	152
B.4.2	Stratégie conditionnée à la dégradation courante	154
B.4.3	Synthèse	156
B.5	Conclusion	156
C	Analyse factorielle des produits de marquages français	157
C.1	Introduction	157
C.2	Analyse factorielle des produits de marquages	159
C.3	Conclusion	161

Table des figures

2.1	Coupe transversale d'une chaussée (LORINO 2008).	17
2.2	Trois signes de chaussée dégradée : (a) une fissure longitudinale, (b) un phénomène de faïençage, (c) un nid-de-poule (BORDES et al. 1996)	18
2.3	Un cédez-le-passage fortement dégradé (photo de l'auteur)	19
2.4	Dimensionnement réglementaire des lignes longitudinales reconnu (IISR 2011)	20
2.5	Coupe d'un marquage rétro-réfléchissant à base de peinture blanche à l'eau posé (FÉRÉ 2016)	21
2.6	Visibilité de nuit en fonction du niveau de rétro-réflexion des marquages (FÉRÉ 2016)	21
2.7	Quatre machines de pose : (a) Trassar 8, (a) Trassar 131, (c) Trassar 351, (d) Trassar 16 T (FÉRÉ 2016)	22
2.8	Pose standard d'une ligne de marquages (FÉRÉ 2016)	22
2.9	Pose manuelle : (a) un cédez-le-passage, (b) une ligne de stop (FÉRÉ 2016)	23
2.10	Représentation des champs de vision des principaux capteurs de perceptions	23
2.11	Approche d'un chantier sur la voie de droite en quatre étape (DE GALIZIA et al. 2018)	24
2.12	Principe de la détection de ligne de marquages (REVILLOUD et al. 2013)	25
2.13	Exemple d'une détection d'une ligne de marquages (REVILLOUD et al. 2016a)	26
2.14	Exemple d'une détection perturbée due à une infrastructure fortement dégradée (REVILLOUD et al. 2016b)	26
2.15	Phénomènes de rétro-réflexion d'un marquage sous les conditions de la norme NF EN 1436	27
2.16	Principe d'un Ecodyn : (a) Un Ecodyn 3 embarqué, (b) Principe d'inspection (VECTRA 2017)	28
2.17	Evaluation du PMR d'un marquage : (a) présentation du masque d'évaluation, (b) approche classique, (c) application d'un seuillage (DUMONT 2001)	29
2.18	Marquages dégradés de référence : (a) excellent, (b) bon, (c) moyen, (d) faible, (e) très faible (COSTELLO et al. 2011)	30
2.19	Processus de dégradation en cinq classes proposées par (TREMBLAY 2004)	31
2.20	Détection de ligne de marquages : (a) par une caméra (XIAO et al. 2016) (b) par un LIDAR (KUMAR et al. 2014)	31
2.21	Détection de ligne de marquages : (a) en milieu urbain; (b) nombreuses lignes de marquage; (c) condition de nuit; (d) condition de pluie (LEE et al. 2017).	32
2.22	Cartographie de la signalisation horizontale proposée par HAZELHOFF et al. 2015	32
2.23	Multi-Layer Perceptron proposé par (KARWA et DONNELL 2011)	38

2.24	Système de notation de la dégradation des marquages proposé par (ASDRUBALI et al. 2013)	43
2.25	Site d'expérimentation de l'ASCQUER installé sur la Route Nationale 2 aux abords de Boissy-Fresnoy (Offert par Frédéric Féré - Directeur marketing opérationnel chez SIGNATURE)	44
2.26	Présentation du tronçon sélectionné de la Route Nationale 4	45
3.1	Représentation d'un dendrogramme	50
3.2	Reconstruction de données de rétro-réflexométrie par une approche clustering	51
3.3	Reconstruction de données de rétro-réflexométrie manquantes par l'interpolation linéaire	54
3.4	Suivi de la rétro-réflexion de la RN4 : (a) Référence après MAJ de la base avec les PR pris en compte par l'interpolation linéaire, (b) interpolation linéaire, (c) approche clustering	55
3.5	Principe de la double-coupe du dendrogramme	59
3.6	Détection de maintenance par marquage	60
3.7	Détection de maintenance par zone stratégique	61
3.8	Suivi reconstruit de la rétro-réflexion de la ligne axiale de la RN4 entre 2007 et 2016	63
3.9	Comparaison des inspections de la ligne axiale de la RN4 : (a) Septembre 2011 et (b) 2012	63
3.10	Dendrogramme associé à la segmentation en cinq clusters de la RN4	64
3.11	Profil moyen et localisation des cinq zones stratégiques de la ligne axiale	65
3.12	Suivi de la RN4 segmenté en cinq clusters	66
3.13	Dendrogramme retenu pour l'estimation de l'historique de maintenance de la RN4	66
3.14	Suivi simultané de la rétro-réflexion des 15 clusters retenus pour estimer l'historique de maintenance	68
3.15	Historique de maintenance estimé et détaillé de la ligne axiale de la RN4 (sur la période 2008 - 2016)	69
4.1	Synthèse de l'algorithme WEM	80
4.2	Retro-réflexion observée des marquages posés en mars 2008 et remplacés en mars 2012.	83
4.3	Papier Weibull.	85
4.4	Comparaison entre les fonctions de répartition théorique et empirique.	86
4.5	Rétro-réflexion observée des marquages posés en mars 2008 et remplacés en mars 2012.	87
4.6	Comparaison entre les différentes fonctions de fiabilité	88
5.1	Principaux types de maintenances et actions associées	92
5.2	Principe du remplacement basé sur l'âge.	98
5.3	Principe du remplacement par bloc.	99
5.4	Principe du remplacement conditionnel.	102

5.5	Comparaison entre les fonctions de répartition théorique et empirique associées au cluster 1.	106
5.6	Comparaison entre les fonctions coûts asymptotiques : (a) cluster 5, (b) cluster 1, (c) cluster 3.	108
5.7	Pas de maintenance en fonction du seuil de rétro-réflexion minimal L avec $r = 3$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.	109
5.8	Pas de maintenance en fonction de la pénalité de maintenance corrective r avec $L = 150 mcd/m^2/lx$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.	110
5.9	Comparaison entre les fonctions coûts : (a) cluster 1, (b) cluster 5. Pénalité de maintenance corrective à $r = 3$ et unique seuil de rétro-réflexion à $150 mcd/m^2/lx$	112
5.10	Pas de maintenance en fonction du seuil de rétro-réflexion minimal L avec $r = 3$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.	113
5.11	Pas de maintenance en fonction de la pénalité de maintenance corrective r avec $L = 150 mcd/m^2/lx$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.	114
5.12	Seuil préventif Y_p en fonction du seuil correctif Y_c : (a) cluster 1, (b) cluster 5.	117
5.13	Pas de maintenance en fonction de la pénalité de maintenance corrective r avec $L = 150 mcd/m^2/lx$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.	118
5.14	Comparaison entre la stratégie préventive par rapport à l'âge et CBM : (a) Cycle 2008-2012 du cluster 1, (b) Cycle 2008-2012 du cluster 2, (c) Cycle 2011-2014 du cluster 2.	119
5.15	Comparaison entre la stratégie préventive par rapport à l'âge et conditionnée à la dégradation courante : (a) Cycle 2008-2012, (b) Cycle 2008 - 2012 du cluster 4, (c) Cycle 2008 - 2012 du cluster 5.	121
5.16	Comparaison entre la stratégie préventive par rapport à l'âge et conditionnée à la dégradation courante : (a) Cycle 2011 - 2014, (b) Cycle 2011 - 2014 du cluster 3.	122
5.17	Comparaison entre la stratégie préventive par rapport à l'âge et conditionnée à la dégradation courante sur le Cycle 2011 - 2015 du cluster 1.	122
A.1	Types de voie de circulation sur la RN4 : (a) chaussée unique 2 voies, (b) chaussée unique 3 voies, (c) chaussée unique 4 voies, (d) chaussée séparée 2×2 voies, (e) chaussée séparée 2×1 voies (Google Maps)	130
A.2	L'analyse en composantes principales : (1) Table initiale, (2) Normalisation de la table, (3) Matrice des individus, (4) Matrice des corrélations, (5) Hyperplan des individus, (6) Hypersphère des corrélations, (7-8) Projections hilbertiennes, (9) Carte des individus, (10) Cercle des corrélations, (11) Fusion algébrique, (12) Carte des individus et des corrélations (ESCOFIER et PAGÈS 2008)	134
A.3	Confrontation des deux premières composantes principales : (a) Cercle des corrélations, (b) Carte des individus, (c) Dendrogramme de la CAH de la carte des individus	136

A.4	(a) Projection des clusters sur la RN4, (b) Profils typographique, de chaussée, d'infrastructure et de bitume, (c) suivi de la ligne axiale, (d) suivi de la bande d'arrêt d'urgence, (e) suivi de la ligne terre-plein centrale	137
B.1	Réseau autoroutier (anonymisé) composé des autoroutes <i>A</i> , <i>B</i> et <i>C</i> et leurs échangeurs <i>AB</i> et <i>BC</i>	146
B.2	Suivi de la ligne V1/V2 entre 2011 et 2016 en prenant compte les trois autoroutes <i>A</i> , <i>B</i> et <i>C</i>	148
B.3	Suivi en neuf clusters de la ligne V1/V2 entre 2011 et 2016	149
B.4	Segmentation de la ligne V1/V2 en neuf clusters projetés sur une carte anonymisée	150
B.5	Suivi de la rétro-réflexion du cycle 2012 - 2016 : (a) cluster <i>B</i> , (b) cluster <i>A5151</i>	
B.6	Maintenance par rapport à l'âge appliquée au cycle 2012 - 2016 : (a) cluster <i>B</i> , (b) cluster <i>A5</i>	153
B.7	Maintenance conditionnée par la dégradation courante appliquée au cycle 2012 - 2016 : (a) cluster <i>B</i> , (b) cluster <i>A5</i>	154
C.1	Distinction entre les phénomènes de rétro-réflexion et luminance	157
C.2	Banc d'essai de Boissy-Fresnoy sur la Route Nationale 2	158
C.3	Cercle des corrélations (a) - Carte des individus par groupes projetés sur les deux premières composantes principales - Dendrogramme associée à la CAH (c)	159
C.4	(a) Typologie et Profil qualitatif - Profil de dégradation en fonction du passage de roues : (b) Rétro-réflexion, (c) Luminance, (d) Adhérence	160

Introduction

La qualité et la fiabilité des infrastructures routières jouent un rôle majeur dans la sécurité. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'on s'intéresse à la circulation de véhicules autonomes qui doivent être capables de circuler seuls dans l'environnement routier.

Pour évoluer en parfaite sécurité, les véhicules autonomes attendent des infrastructures routières que celles-ci soient "lisibles" et possèdent des caractéristiques quantifiées dont les valeurs se situent dans des limites garanties (ERLICH 2017). Une question ouverte à ce jour est d'explicitier en détail ces caractéristiques ainsi que les valeurs admissibles associées.

Quelques situations sont d'ores et déjà connues. Par exemple, l'uni d'une chaussée dégradé peut avoir des conséquences sur la stabilité du véhicule autonome et peut engendrer des erreurs vis-à-vis des distances aux objets. Les signes de dégradation d'une chaussée sont connus et documentés. Par exemple, un gestionnaire d'infrastructure doit être attentif à l'apparition de fissures longitudinales. Non traitées, ces dernières peuvent entraîner un phénomène dit de faïençage qui conduit à la formation de nids-de-poule (BORDES et al. 1996).

L'absence de signalisation horizontale peut, quant à elle, rendre le véhicule "aveugle" : difficulté à identifier les voies de circulation ou à repérer les voies provisoires, ignorance de l'autorisation de dépassement, incapacité à anticiper une voie d'entrée/sortie... Dans ce cas précis, l'arrêt du véhicule ou une demande de reprise en main sont les décisions les plus sages.

La plupart de ces phénomènes de détérioration sont à ce jour mal maîtrisés du point de vue de la prévision de leur apparition et des dynamiques de dégradation sous-jacentes. La grande diversité des routes, de leur fréquentation en termes de trafic, des conditions climatiques rencontrées mais aussi des produits utilisés pour les réaliser compliquent considérablement la tâche de modélisation. Un autre enjeu est la réduction progressive des budgets d'entretien. Ce dernier point motiva un certain nombre d'études visant à proposer des plans de maintenance mais aussi d'inspection des chaussées.

Par exemple, les travaux de thèse de Fabien Menant proposent un véhicule traceur évaluant l'uni des chaussées ainsi qu'une méthode de fusion de données dans l'hypothèse d'une flotte de tels véhicules (MENANT 2014). Les travaux de thèse de Mariem Zouch proposent un plan de maintenance préventif des fissures longitudinales basé sur une chaîne de Markov partiellement observable (ZOUCH 2011). Les données de retour d'expérience étant la taille des fissures, il est possible de les estimer par une caméra. Modulo la question des capteurs embarqués, ces démarches sont compatibles avec un véhicule autonome. Pendant

son voyage, le véhicule peut inspecter la chaussée et les marquages puis communiquer les données d'inspection au gestionnaire d'infrastructure.

Sur la signalisation horizontale, la littérature présente, depuis les années 90, des modèles de dégradation basés sur des méthodes de régression. Plusieurs questions restent ouvertes à ce jour. Elles portent essentiellement sur le choix du modèle, les paramètres explicatifs à prendre en compte, l'application directe à l'échelle d'une chaussée et le manque de robustesse des critères de qualité. La fiabilité et l'entretien des marquages sont pleinement définis par le modèle de régression. Cependant, cette approche reste relativement naïve et difficile à appliquer face à la réalité du terrain.

Les travaux présentés dans cette thèse ont pour ambition de proposer un plan de maintenance des marquages routiers adapté au véhicule autonome. Un premier tour d'horizon des capacités du véhicule autonome proposé par VEDECOM explique le choix de privilégier l'entretien de la signalisation horizontale.

Ce véhicule comporte de très nombreux capteurs de perception. Chacun répond à une mission précise afin de garantir une circulation sûre. Le choix d'une multitude de capteurs permet de capter un maximum d'informations, s'adapter au mieux à tout environnement et de prévenir la défaillance d'un des capteurs.

Les lidars émettent des lasers pulsés afin de modéliser les objets entourant le véhicule. L'objectif premier est la détection des obstacles à anticiper. Les lidars 120° sont calibrés pour prévenir, par exemple, un cycliste caché dans les angles morts des rétroviseurs. Le lidar 360° recherche les principaux obstacles dans l'environnement où se situe le véhicule.

Contrairement à un lidar, les radars ont l'avantage de ne pas avoir de partie mobile et d'être insensibles aux conditions d'éclairement. Mais ils sont moins précis (notamment par temps de pluie) et sont moins adaptés à la détection de personnes physiques.

Le recours à des caméras dans l'automobile fut rapidement proposé car elles peuvent s'utiliser de façon indépendantes ou synchronisées et présentent des caractéristiques statiques et dynamiques. En statique, une optimisation en amont par des mires est nécessaire. En dynamique, la technologie actuelle permet de palier aux effets d'éblouissement et aux conditions de nuit.

D'autres capteurs secondaires sont également présents pour des missions très précises : un GPS pour établir le plan de voyage ou des ultrasons pour la détection d'obstacles lors de manœuvres par exemple.

Au sein de VEDECOM, les récents travaux de thèse de Marc Revilloud (REVILLOUD 2016) et du projet MOOVE montrent qu'une signalisation horizontale claire et visible est plus importante qu'une chaussée en bon état pour un véhicule autonome. La détection des lignes de marquage est en grande partie réalisée par des caméras. Une rapide revue de l'utilisation de cette technologie est proposée à la section 2.3.

Finalement, il ressort de ces études qu'une signalisation horizontale claire est nécessaire. Un plan de maintenance préventif des lignes de marquages semble être une solution raisonnable. Idéalement, un tel modèle doit être basé sur des données de retour d'expérience d'un véhicule autonome. Malheureusement, il n'existe pas encore d'infrastructure

routière régulièrement inspectée sur plusieurs cycles de vie par un véhicule autonome.

Cependant, les industriels et les pouvoirs publics ont depuis longtemps établi un savoir-faire pour la pose mais aussi l'inspection des marquages. Depuis les années 70, le rétro-réfectomètre est l'appareil d'inspection classique de la signalisation horizontale. Les versions les plus récentes, comme l'Ecodyn du MLPC, sont embarquées sur les flancs d'un véhicule qui s'insère parfaitement dans le trafic. De ce fait, l'ensemble des travaux réalisés dans cette thèse est basé sur des données de retour d'expérience issues de campagnes d'inspection réalisées par un rétro-réfectomètre.

Ces mesures sont éventuellement complétées par des observations réalisables sur Google Maps ou Open Street Map. Cette approche est en adéquation avec la littérature et les modèles de dégradation disponibles. Cette thèse propose des outils d'analyse des marquages partant des données de rétro-réfectométrie jusqu'à l'établissement d'un plan de maintenance adapté.

Pour cela, le chapitre 2 propose tout d'abord un état de l'art général sur les techniques de pose d'un marquage et l'exploitation des données de rétro-réfectométrie. La pose d'un marquage est un savoir-faire qui s'est progressivement développé depuis les premières tentatives de signalisation horizontale au début du 20ème siècle.

L'essentiel de la littérature est constitué de modèles de dégradation basés sur une méthode de régression et développés dans la seconde moitié des années 90 jusqu'au début des années 2010. Les modèles prédisent le niveau de rétro-réflexion d'une ligne de marquages donnée à un instant souhaité et sont entraînés par des données de retour d'expérience. Le plan de maintenance des marquages routiers consiste à prédire l'instant de défaillance d'une ligne de marquages par le modèle et programmer une action de maintenance à cette date. Plusieurs critiques sont connues : absence de consensus sur le type de régression et des variables explicatives à considérer, des difficultés à appliquer directement un modèle donné... Une problématique peu soulevée dans la bibliographie est la qualité des données de retour d'expérience. Cette dernière pénalise fortement l'application d'une grande partie des modèles existants. C'est pour cette raison que cette thèse propose une rupture scientifique vis-à-vis de la bibliographie. Un autre point peu discuté est l'imperfection des plans d'inspection actuels. Les principaux défauts sont la présence de données d'inspection manquantes et d'instant de défaillance censurés. Les chapitres 3 et 4 proposent des solutions pour ces deux problèmes.

Le chapitre 3 propose différents outils permettant de comprendre la dégradation de la signalisation horizontale d'une infrastructure routière. Les rétro-réfectomètres produisent généralement une mesure tous les 100 m. Par conséquent, l'inspection d'une ligne d'une centaine de kilomètres de long produit un millier de points de mesure.

Pour estimer des données d'inspection manquantes, (SATHYANARAYANAN et al. 2008) proposent une reconstruction par interpolation linéaire. La section 3.1 propose une reconstruction par campagne d'inspection basée sur la dégradation locale. La notion de localité étant définie pleinement par une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), cet algorithme est appelé "approche clustering". Une comparaison de ces deux approches est proposée à la section 3.1.3. Dans le cas d'infrastructures inspectées annuellement et faible-

ment contextualisées, l'interpolation linéaire sous-entend plusieurs hypothèses inadaptées (dégradation parfaitement linéaire sur trois ans, absence de mode de dégradation locale, absence de maintenance opportuniste...) que l'approche clustering prend davantage en compte (REDONDIN et al. 2017a).

Le suivi reconstruit, les algorithmes de classification sont en mesure de regrouper les marquages ayant tendance à suivre le même niveau de rétro-réflexion. La définition des clusters facilite l'étude de l'infrastructure tout en identifiant des zones (de maintenance) stratégiques. La segmentation du suivi de la rétro-réflexion dans le temps est réalisée par une CAH exposée à la section 3.2. Cette approche est principalement choisie car l'estimation a priori du nombre de zones à surveiller est difficile (d'autant plus en l'absence d'une description fine de l'infrastructure) mais discutable à partir du dendrogramme (permettant ainsi une exploration des données).

Le premier avantage de la CAH est de montrer que chaque cluster reflète un mode de dégradation descriptible. Le second avantage est qu'il témoigne des actions de maintenance réalisées. En effet, la rétro-réflexion étant décroissante dans le temps, une forte augmentation entre deux inspections ne peut être due qu'à une action de maintenance. Un algorithme de détection de maintenance basé sur ce principe est proposé à la section 3.2.3 et permet de combler l'indisponibilité de l'historique de maintenance (REDONDIN et al. 2017b).

Le chapitre 4 aborde la problématique des durées de vie censurées. La littérature établit que les durées de vie des marquages routiers sont distribuées selon une loi de Weibull (SATHYANARAYANAN et al. 2008). La méthode du maximum de vraisemblance est une approche classique pour estimer les paramètres de cette loi de probabilité (bien qu'une optimisation par l'algorithme de Newton-Raphson soit nécessaire dans le cas de Weibull). Dans le cas où l'échantillon est censuré, l'approche reste valide mais au prix d'une complexité calculatoire et n'apporte pas pour autant une correction des censures. Une estimation des instants de défaillance est appréciable, ne serait-ce que pour concevoir un premier plan de maintenance naïf.

Pour répondre à cette problématique, des alternatives basées sur l'utilisation d'un algorithme EM sont proposées depuis la fin des années 90. La section 4.1 propose un état de l'art sur ces algorithmes dans le contexte d'une loi de Weibull censurée. Ces dernières années, des algorithmes capables de remplacer le maximum de vraisemblance tout en proposant une estimation des durées de vie censurées sont proposés. Certains auteurs proposent même des algorithmes calibrés pour les lois de Weibull généralisées (Weibull à trois paramètres, Marshall-Olkin...)

Un premier algorithme proposé initialement pour des durées de vie censurées uniquement par intervalle est proposé par (PRADHAN et al. 2014). La section 4.2 propose une extension à la censure à gauche et à droite et adaptée à n'importe quel seuil de dégradation maximale des marquages. Sous les recommandations de (PRADHAN et al. 2014), une optimisation basée sur une approche point fixe est proposée. Dans la logique de la segmentation de l'infrastructure routière (section 3.2), la section 4.2.3 montre que l'algorithme EM est en mesure de modéliser un mélange de lois de Weibull (REDONDIN et al. 2018a).

L'état de l'art montre que l'adéquation des lois proposées par un algorithme EM aux données réelles est peu discutée. En particulier lorsque les durées de vie sont censurées. La section 4.3 propose une étude comparée des principaux tests d'adéquation adaptés à la distribution de Weibull (REDONDIN et al. 2018b). Les classiques tests graphiques sont finalement les plus adaptés lorsque les durées de vie sont censurées tandis que le test de Kolmogorov-Smirnov montre qu'un plan d'inspection semestriel serait plus rigoureux qu'un plan annuel. La question d'un test directement adapté à la censure reste, à ce jour, une question ouverte.

Le chapitre 5 propose une comparaison des stratégies de remplacement préventive systématique et conditionnelle. Ce choix est dû au fait que ce sont actuellement les plus aisées à mettre en œuvre. Trois stratégies sont discutées : préventivement par rapport à l'âge ou par bloc et conditionnellement à la dégradation courante.

La ligne axiale de la Route Nationale 4 française (RN4) est le principal cas d'étude de cette thèse. Une description est proposée à la section suivante. Les chapitres 2, 3 et 4 se concluent sur une étude de la RN4. Cette route a la particularité de présenter une infrastructure riche (sections en 2×2 ou 2×1 voies, passage en zone urbaine...) et la signalisation horizontale est inspectée chaque année en automne par le CEREMA Est.

Finalement, les principales contributions scientifiques de cette thèse sont :

1. Une rupture scientifique dans l'analyse de données de rétro-réflexométrie, la modélisation de la dégradation des marquages routiers et son entretien,
2. Une reconstruction de données de rétro-réflexométrie manquantes (Section 3.1),
3. Une identification de zone de maintenance stratégique d'une infrastructure routière (Section 3.2.2),
4. Un estimateur de l'historique de maintenance (Section 3.2.3),
5. Un algorithme EM pour l'analyse de durées de vie censurées des marquages (Section 4.2),
6. Une stratégie préventive de maintenance par rapport à l'âge (Section 5.3),
7. Une stratégie préventive de maintenance conditionnée à la dégradation courante (Section 5.4).

État de l'art sur les marquages rétro-réfléchissants

Ce chapitre est un état de l'art global des recherches effectuées sur la dégradation, la fiabilité et la maintenance des marquages routiers rétro-réfléchissants mais aussi sur les techniques de pose des marquages routiers.

L'essentiel est constitué de modèles de dégradation. Ce choix est lié à la volonté de proposer directement une stratégie de remplacement préventif systématique à l'horizon de l'instant de défaillance prédit par le modèle. L'approche fiabiliste, du moins au sens de (COCOZZA-THIVENT 1997) par exemple, est quasi-absente de la littérature. Elle se résume à prédire le temps de service des marquages (par le modèle de régression). Deux questions ouvertes en lien avec l'entretien de la signalisation horizontale sont également identifiées : les limites technologiques actuelles face aux exigences de la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) et l'influence de la qualité des marquages sur l'accidentologie.

2.1 Infrastructure routière et signalisation horizontale

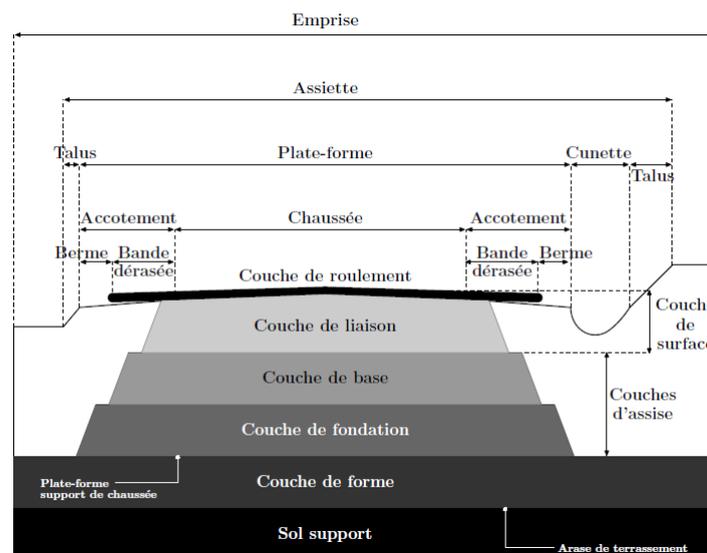


FIGURE 2.1 – Coupe transversale d'une chaussée (LORINO 2008).

La construction et l'entretien des infrastructures routières ont conduit au développement d'un savoir-faire technique qui s'est développé au fil des années et de l'émergence de nouvelles technologies (FAURE 1998) (BARILLOT et al. 2018). La figure 2.1 synthétise

la construction actuelle d'une chaussée. Elle est constituée de plusieurs couches posées sur un sol support (généralement surmonté d'une couche de forme pour le protéger du gel). Le corps de la chaussée est constitué des couches d'assise et de surface. Son assise est constituée des couches de fondation et de base (faites de matériaux liés). En surface, la chaussée est constituée de la couche de roulement qui subit directement le trafic et le climat. La couche est parfois précédée d'une autre qui assure la liaison entre le roulement et l'assise (LORINO 2008).

Les actions de maintenance courantes sont réalisées sur la couche de roulement. Les signes de dégradation sont connus et documentés. La figure 2.2 présente trois signes classiques d'une chaussée dégradée. Un gestionnaire d'infrastructure doit être attentif à l'apparition de fissures longitudinales (Fig 2.2).(a)). Non traitées, elles peuvent entraîner un phénomène dit de faïençage (Fig 2.2).(b)) qui conduit à la formation de nids-de-poule (Fig 2.2).(c)) (BORDES et al. 1996). Un état de l'art complet sur la construction d'une infrastructure routière est proposé par Michel Faure (FAURE 1998).

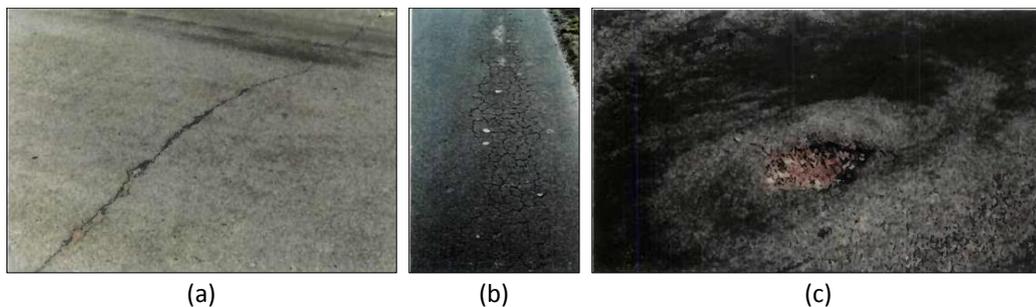


FIGURE 2.2 – Trois signes de chaussée dégradée : (a) une fissure longitudinale, (b) un phénomène de faïençage, (c) un nid-de-poule (BORDES et al. 1996)

Sur l'entretien et l'inspection des chaussées, au moins deux travaux de thèses sont proposés. Fabien Menant (MENANT 2014) propose un véhicule traceur capable d'établir le niveau de dégradation d'une chaussée au sens de la Note par Bande d'Onde (NBO) de l'uni (DUPONT et al. 2007). Mariem Zouch (ZOUCH 2011) propose un modèle de maintenance des fissures longitudinales basé sur un processus de décision markovien partiellement observable.

La chaussée seule n'est pas en mesure d'organiser le trafic routier. La signalisation horizontale routière remplit ce rôle. Cette solution a été proposée au début du 20ème siècle (DOMHAN et FREDERIC 1975). Conceptualisée comme un langage visuel, elle est le principal moyen de communication entre la route et l'utilisateur. C'est pour cette raison que ce langage s'est construit empiriquement au fur et à mesure afin qu'il soit clair, cohérent et fiable pour tous. L'une des missions d'un gestionnaire d'infrastructure routière est de rendre cette signalisation visible et sans ambiguïté pour le conducteur. Plus un marquage routier se trouve dans le champ de vision du conducteur, plus la signalisation est comprise et respectée. C'est dans ce contexte que la qualité des marquages joue un rôle important à l'égard de la sécurité routière.

La disparition d'une partie de la ligne de marquages est l'indicateur de dégradation naturel. Par exemple, la figure 2.3 est un cédez-le-passage fortement dégradé et difficile à

percevoir. L'effacement des marquages est généralement dû aux agressions directes du trafic, les conditions climatiques, un marquage non adapté à la chaussée ou tout simplement un défaut de pose (GOUBERT et al. 2007).



FIGURE 2.3 – Un cédez-le-passage fortement dégradé (photo de l'auteur)

L'entretien des marquages routiers a bénéficié d'un développement moindre en comparaison des études réalisées sur les chaussées. Son entretien dépend essentiellement de l'infrastructure routière et son gestionnaire. Le remplacement de la signalisation d'un important échangeur autoroutier peut être systématiquement réalisé tous les deux ans tandis que celle d'une route secondaire sera bien plus espacé dans le temps.

La réduction progressive des budgets d'entretien publics a motivé certains instituts à repenser les pratiques de maintenance de la signalisation horizontale. Par exemple, le Centre de Recherches Routières (Belgique) propose une formalisation des règles de pose et d'entretien (GOUBERT et al. 2007). Cette thèse propose de respecter au plus près les pratiques de maintenance actuelles. C'est pour cette raison qu'une description de la signalisation horizontale est proposée.

2.2 Description de la signalisation horizontale

La signalisation horizontale est ici décrite en quatre points : dimensionnement des lignes de marquages, composition chimique d'un marquage, les techniques de pose et une liste non exhaustive de signes de dégradation.

2.2.1 Dimensionnements des marquages

La signalisation horizontale regroupe au moins six familles de signalisations réalisées par des marquages routiers : les lignes de marquages (continues, discontinues, axiales, de rives, bandes d'arrêts d'urgences...), les flèches directionnelles, les lignes transversales (stop, cédez-le-passage...), les marquages de traversées (passages piétons, pistes cyclables...), les marquages délimitant îlots et points particuliers (virages, zébras, entrées ou sorties d'autoroutes...) et divers figures spécifiques (places de parkings, messages...) (GOUBERT et al. 2007).

Elle réalise au moins six missions : délimiter les voies de circulation, fixer les règles de

priorité, réglementer le dépassement, délimiter le stationnement, assurer les traversées de chaussée et indiquer la direction (GOUBERT et al. 2007).

Cette thèse se limite à l'étude des lignes longitudinales dont la mission principale est de définir les voies de circulation. La ligne axiale est la plus stratégique. Elle définit le sens de circulation, sépare les voies lentes et rapides (sur toute chaussées séparées), autorise ou non les dépassements... De ce fait, elle est la plus exposée au trafic.

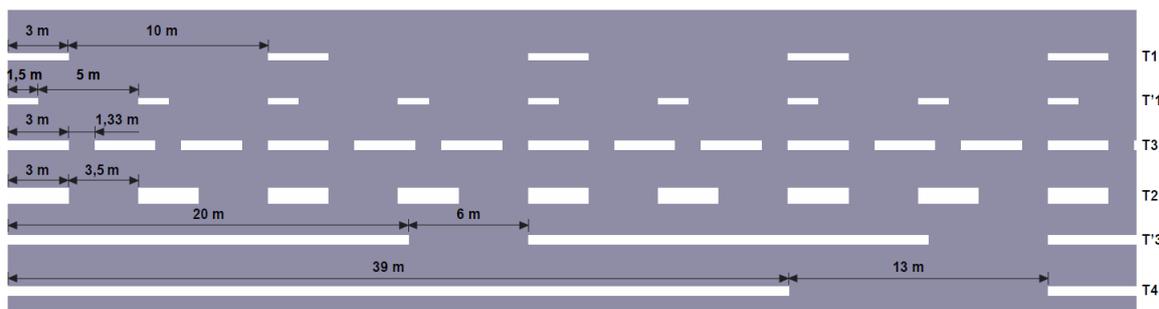


FIGURE 2.4 – Dimensionnement réglementaire des lignes longitudinales reconnues (IISR 2011)

En France, le dimensionnement de ces lignes est réglementé par l'Instruction interministérielle sur la signalisation routière (7^{ème} partie : Marquages sur chaussée) (IISR 2011). L'article 113 précise que le marquage des chaussées est obligatoire uniquement sur les routes express et autoroutes. La figure 2.4 résume les règles de dimensionnement. Les lignes T1, T'1 et T3 correspondent aux lignes axiales tandis que les lignes T2, T'3 et T4 sont des lignes de rives (essentiellement la bande d'arrêt d'urgence par exemple).

Le choix des lignes dépend de l'infrastructure et du message à adresser à l'utilisateur. Par exemple, la ligne T1 est la ligne axiale standard pour les routes en rase campagne et autorise le dépassement. La ligne T3 est une ligne axiale dissuasif des dépassements et/ou annonçant une ligne continue (dont le dépassement est interdit). La ligne T2 localise une voie d'entrée/sortie et invite l'utilisateur à redoubler de vigilance (IISR 2011).

La longueur des marquages (3 m pour une T1) et l'espacement entre deux marquages (10 m pour une T1) sont standardisés. La largeur des marquages est cependant dépendante de l'infrastructure et de la ligne. Par exemple, un marquage d'une ligne T1 est large de 10 à 12 cm sur route importante ou à grande circulation et 15 cm sur autoroute et rase campagne (IISR 2011).

Le rapport COST 331 (commandé et publié par la Commission Européenne) réalise un important état de l'art de la signalisation horizontale au sein de l'Union Européenne. Le choix d'une couleur blanche pour des marquages non temporaires et l'application d'au moins trois lignes (axiale, rive et terre-plein central) font consensus. Le dimensionnement d'une ligne de marquages est en revanche davantage un choix empirique et/ou culturel. Par exemple, la ligne axiale standard allemande est composée de marquages de 6 m de long, 15 cm de large et espacés de 12 m (EUROPEAN COMMISSION 1999). Une uniformisation des règles de dimensionnement est recommandée.



FIGURE 2.5 – Coupe d'un marquage rétro-réfléchissant à base de peinture blanche à l'eau posé (FÉRÉ 2016)

2.2.2 Marquages rétro-réfléchissants

En Europe, il existe principalement quatre chimies : la peinture, l'enduit à chaud (appelé aussi thermoplastique), l'enduit à froid et la bande préfabriquée (appelée aussi marquage préformé) (GOUBERT et al. 2007) (BABIC et al. 2015). Un marquage rétro-réfléchissant a la particularité de renvoyer la lumière émise par les phares d'un véhicule vers son conducteur. Pour un marquage à base de peinture à l'eau, ce phénomène est le plus souvent obtenu grâce à l'ajout de microbilles de verre saupoudrées lors de la pose.

La figure 2.5 est une coupe de marquage rétro-réfléchissant à base de peinture blanche à l'eau. Le marquage est posé directement sur la couche de roulement de la chaussée. Les microbilles en surface garantissent la propriété de rétro-réflexion. Au regard de la littérature, ce type de marquage est populaire sur les routes européennes. Aux États-Unis, la littérature scientifique montre que les marquages thermoplastiques ont plus de succès.

La figure 2.6 schématise la visibilité de nuit des marquages en fonction du niveau de rétro-réflexion. Un haut niveau indique un marquage blanc parfaitement visible. Ce niveau décroît dans le temps et, dans le meilleur des cas, le marquage devient gris (perte de peinture, salissure) et difficile à percevoir. L'arrêté du 10 mai 2000 indique qu'un marquage neuf non temporaire doit assurer un minimum de $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ à la certification d'un produit de marquage. Ce seuil fait généralement office de seuil de dégradation maximal mais ce paramètre est laissé à la discrétion du gestionnaire d'infrastructure. Par exemple, certains États américains se réfèrent à un seuil de $100 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ (SATHYANARAYANAN et al. 2008). Ce seuil peut être amené à être modifié afin d'optimiser la détection des marquages par le véhicule autonome. C'est pour cette raison que les travaux de thèse proposent un seuil à fixer préalablement et $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ utilisé en guise d'illustration.

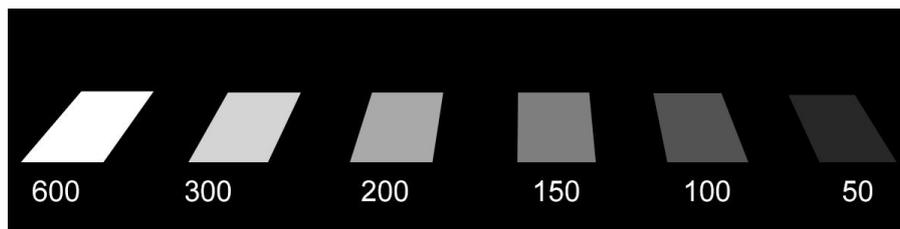


FIGURE 2.6 – Visibilité de nuit en fonction du niveau de rétro-réflexion des marquages (FÉRÉ 2016)

(IISR 2011) impose l'utilisation de marquage rétro-réfléchissant pour tout réseau hors agglomération. En agglomération, la rétro-réflexion est recommandée si l'éclairage public

est coupé la nuit.

2.2.3 Pose d'un marquage

Les techniques de pose sont très variées et le choix est fortement dépendant du chantier considéré. Ce paragraphe se limite aux techniques standards adaptées aux marquages à base de peinture. A noter que les enduits et les bandes préfabriquées disposent de leurs propres machines de pose.

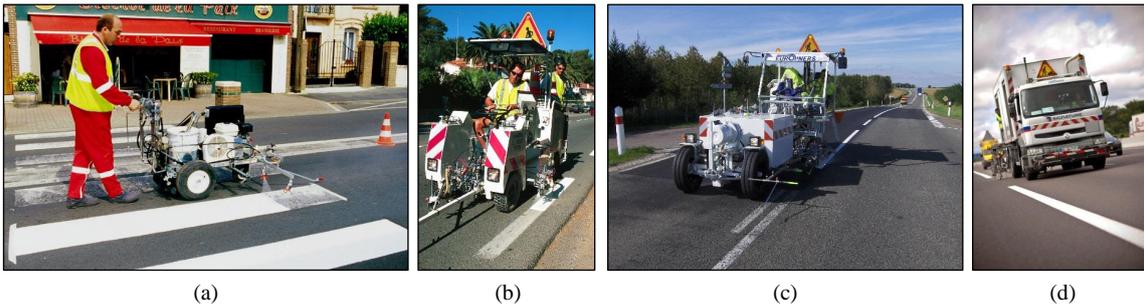


FIGURE 2.7 – Quatre machines de pose : (a) Trassar 8, (a) Trassar 131, (c) Trassar 351, (d) Trassar 16 T (FÉRE 2016)

La figure 2.7 présente quatre machines applicateurs de lignes de marquage. Pour une application à petit rendement comme les zones urbaines, les machines poussées comme le Trassar 8 sont adaptés (Fig 2.7.(a)). Pour les zones péri-urbaines, le Trassar 131 est plus adapté (Fig 2.7.(b)). Pour les chantiers linéaires importants comme les routes nationales les machines autoportées comme le Trassar 351 (Fig 2.7.(c)) sont considérées. Les camions applicateurs comme le Trassar 16 T (Fig 2.7.(d)) sont réservés aux chantiers conséquents comme les autoroutes.

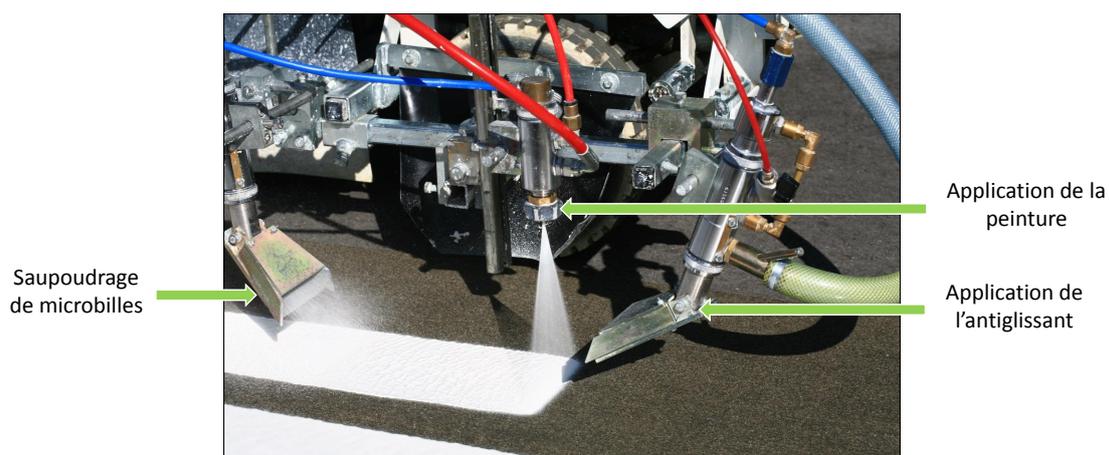


FIGURE 2.8 – Pose standard d'une ligne de marquages (FÉRE 2016)

La pose standard de marquages rétro-réfléchissants consiste à appliquer une première couche de peinture puis un saupoudrage de microbilles. Une couche d'antidérapant ou une seconde couche de microbilles et/ou agrégats de verre peuvent être appliquées afin d'augmenter l'adhérence ou la rétro-réflexion des marquages (Fig 2.8). La vitesse de pose

est comprise entre 1 et 20 km/h et la capacité de stockage de produit varie entre 30 kg et quelques tonnes.



FIGURE 2.9 – Pose manuelle : (a) un cédez-le-passage, (b) une ligne de stop (FÉRÉ 2016)

Pour des chantiers particuliers, il est parfois plus adéquat d'utiliser un pulvérisateur de peinture, pour la pose d'un cédez-le-passage par exemple (Fig 2.9.(a)), voir manuellement avec une spatule, pour la pose d'une ligne de stop par exemple (Fig 2.9.(b)).

Cette présentation des techniques de pose de marquages routiers montre qu'un chantier impose généralement au minimum la fermeture de la voie de circulation et qu'il est difficile d'envisager le remplacement d'un marquage donné. Cette première constatation motive le choix d'un plan de maintenance préventif et non correctif, ne serait-ce que pour organiser à l'avance la tenue du chantier.

2.3 Véhicule autonome et marquage routier

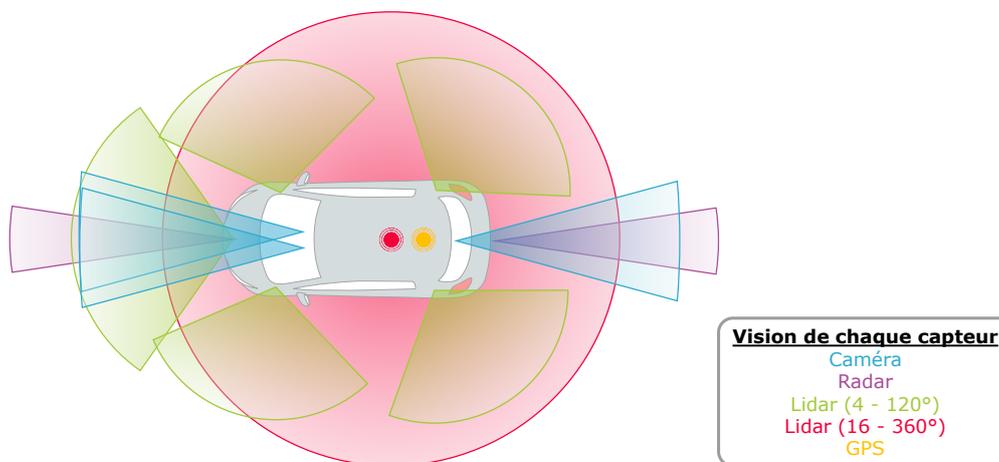


FIGURE 2.10 – Représentation des champs de vision des principaux capteurs de perceptions

Le véhicule autonome proposé par l'institut VEDECOM est embarqué de très nombreux capteurs de perception. Chacun répond à une mission précise afin de garantir une

circulation sûre. Une multitude de capteurs permettent de capter un maximum d'informations tout en s'adaptant à tout environnement et prévenir la défaillance d'un des capteurs. La figure 2.10 illustre leurs efficacités et champs de vision.

1. Les lidars émettent des lasers pulsés afin de modéliser les objets entourant le véhicule. L'objectif premier est la détection des obstacles à anticiper.
 - (a) Les lidars 120° sont calibrés pour prévenir, par exemple, un cycliste caché dans les angles morts des rétroviseurs.
 - (b) Le lidar 360° recherche les principaux obstacles dans l'environnement où se situe le véhicule.
2. Les radars sont insensibles aux conditions d'éclairage mais sont moins précis que les lidars et sont moins adaptés à la détection de personnes physiques.
3. Un GPS pour établir le plan de voyage.
4. Des ultrasons pour la détection d'obstacles lors de manœuvres.

Historiquement, les caméras furent rapidement proposées car elles peuvent s'utiliser de façon indépendantes ou synchronisées et présentent des caractéristiques statiques et dynamiques. En statique, une optimisation en amont par des mires est nécessaire. En dynamique, la technologie actuelle permet de palier les effets d'éblouissement et les conditions de nuit.

Au sein de VEDECOM, les récents travaux de thèse de Marc Revilloud (REVILLOUD 2016) et du projet MOOVE montrent qu'une signalisation horizontale claire et visible est plus importante qu'une chaussée en bon état (pour un véhicule autonome). La détection des lignes de marquage est en grande partie réalisée par des caméras. Une rapide revue de l'utilisation de cette technologie est proposée.

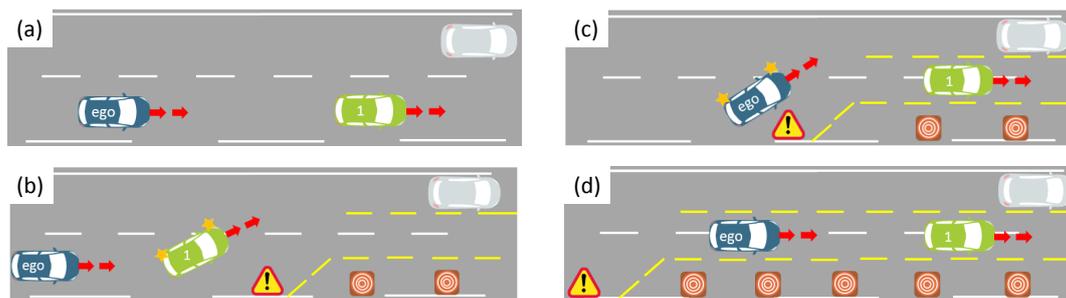


FIGURE 2.11 – Approche d'un chantier sur la voie de droite en quatre étapes (DE GALIZIA et al. 2018)

L'une des missions du projet MOOVE est de définir des scénarios à risque pour un véhicule autonome (BONIC et al. 2017). Les récents travaux d'Antonello De Galizia (DE GALIZIA et al. 2018) s'intéressent à l'approche d'un chantier en quatre étapes présentées à la figure 2.11. La signalisation horizontale prend une part importante. Initialement la ligne axiale sépare clairement les voies de circulation (Fig 2.11.(a)). La voiture verte non-autonome change de voie de circulation afin de contourner les travaux (Fig 2.11.(b)). La voiture bleue autonome change de voie de circulation car d'une part le chantier est observé et d'autre part le comportement de la voiture verte est inhabituel. La signalisation

horizontale jaune informe le véhicule autonome de la voie de circulation provisoire (Fig 2.11.(c)). Finalement, les véhicules bleu et vert se suivent dans la voie provisoire (Fig 2.11.(d)).

Sur les techniques de détection de ligne de marquages par une caméra à gain fixe, un état de l'art général est proposé par (HILLEL et al. 2014). L'idée générale est de proposer un modèle mathématique capable de segmenter une image puis localiser les dits marquages.

Les travaux de thèse de Marc Revilloud (REVILLOUD 2016) proposent une détection multi-agent. Le principe est illustré par la figure 2.12. Une caméra embarquée sur un véhicule analyse une image dans sa course (Fig 2.12.(a)). Un premier algorithme de classification (de type Otsu et basé sur le contraste de gris) repère les objets pouvant être des marquages (Fig 2.12.(b)). En fonction de la position du véhicule (Fig 2.12.(b)), un modèle gaussien (Fig 2.12.(c)) est suivi afin de prévenir les fausses alarmes (Fig 2.12.(d)). La détection réalisée, une estimation géométrique de la ligne est réalisée (Fig 2.12.(e)).

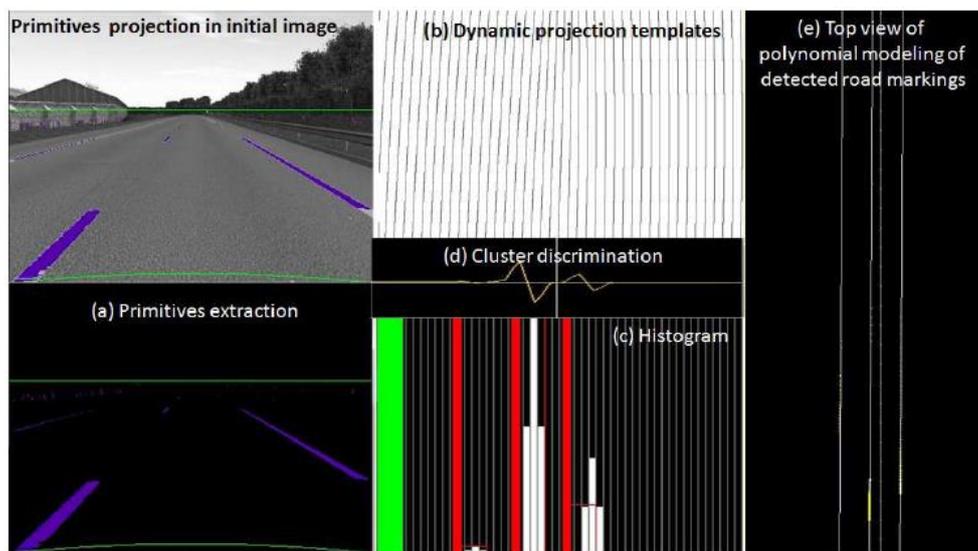


FIGURE 2.12 – Principe de la détection de ligne de marquages (REVILLOUD et al. 2013)

Sur 2500 images de référence recueillies sur le site du Livic, la performance de détection d'une ligne de marquages est de l'ordre de 95 à 98% de bonne détection pour 2 à 4% de fausses alarmes. La figure 2.13 présente un cas de bonne détection. Le haut correspond à l'image originale tandis que le bas est l'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 la direction des marquages. Et finalement, les lignes orange modélisent la ligne de marquages (REVILLOUD et al. 2016a).

La figure 2.14 présente un cas de détection perturbée à cause d'une infrastructure fortement dégradée. Sur cette image, la ligne de marquages est comprise à hauteur de 85%. Ici, la dégradation des marquages empêche la visibilité des 15 derniers pourcents (REVILLOUD et al. 2016b). Un axe de recherche envisagé actuellement est d'inclure la détection de ligne à la cartographie (BRESSON et al. 2016).

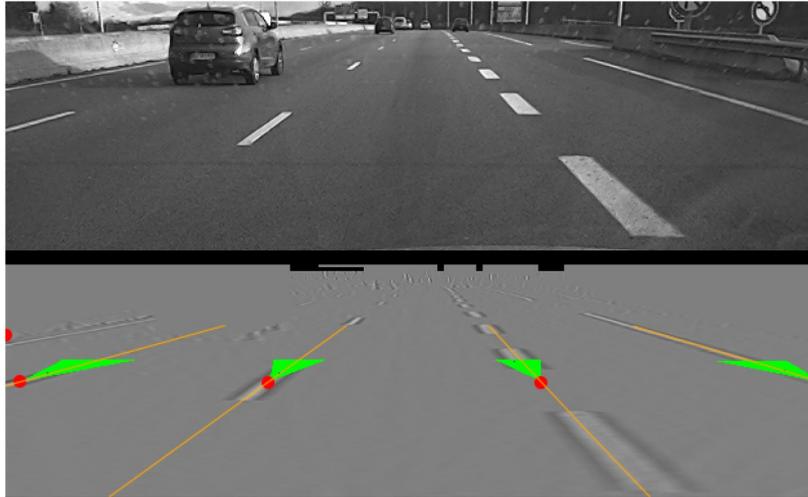


FIGURE 2.13 – Exemple d'une détection d'une ligne de marquages (REVILLOUD et al. 2016a)



FIGURE 2.14 – Exemple d'une détection perturbée due à une infrastructure fortement dégradée (REVILLOUD et al. 2016b)

2.4 Inspection de la signalisation horizontale

Les recherches bibliographiques n'ont pas mis en évidence un premier exemple d'une chaussée ou d'une ligne de marquages régulièrement inspectée par un véhicule autonome. Ce paragraphe a pour objectif de présenter les techniques d'inspections courantes. Deux techniques sont identifiées : recourir à un rétro-réfectomètre ou l'une des alternatives.

2.4.1 Rétro-réflexion et rétro-réfectomètre

La norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) reconnaît la rétro-réflexion des marquages comme l'une des trois principales mesures de dégradation. La figure 2.15 présente les conditions retenues par la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) pour définir le phénomène de rétro-réflexion d'un marquage. Un véhicule éclaire un marquage à 30 m. L'angle entre les feux de croisement et le marquage est de $1,24^\circ$. Le marquage renvoie une partie de la lumière émise vers le conducteur. L'angle entre le marquage et le conducteur est de $2,29^\circ$.

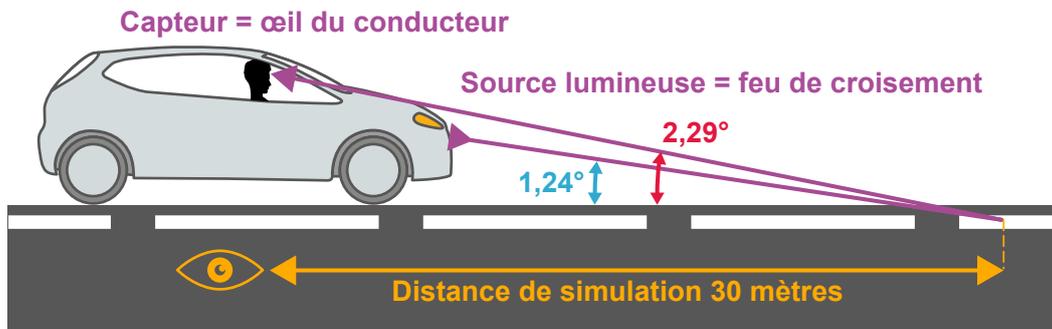


FIGURE 2.15 – Phénomènes de rétro-réflexion d'un marquage sous les conditions de la norme NF EN 1436

La quantité de lumière rétro-réfléchi est mesurée par le coefficient de luminance rétro-réfléchi définie formellement par la définition 1.

Définition 1 (Coefficient de luminance rétro-réfléchi (AFNOR 2018b))

Le coefficient de luminance rétro-réfléchi (d'une surface de marquage routier) R_L ($\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$) est le quotient de la luminance L de la surface du marquage routier dans la direction d'observation divisée par l'éclairement E_\perp au niveau de la surface mesuré perpendiculairement à la direction de la lumière incidente.

Pour simplifier l'exposé, le coefficient de luminance rétro-réfléchi est appelé la rétro-réflexion des marquages. L'unité de mesure est le millicandela par mètre carré et par lux ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$). La rétro-réflexion correspond à la visibilité de nuit.

Les marquages rétro-réfléchissants sont aujourd'hui inspectés par un appareil de mesure nommé rétro-réfectomètre. Un exemple est présenté par la figure 2.16 : l'Ecodyn du MLPC (VECTRA 2017). L'appareil est embarqué sur le flanc d'un véhicule traceur : à gauche pour inspecter les lignes axiales ou la ligne de terre-plein central et à droite pour la bande d'arrêt d'urgence ou la ligne de rive (Fig 2.16.a). Un logiciel associé enregistre en temps réel les mesures et sont identifiées par rapport à un point de repère (implémenté sur la route).

Le processus d'inspection en lui-même (Fig 2.16.b) reproduit à l'échelle le phénomène de rétro-réflexion décrit par la figure 2.15 : une lumière blanche éclaire un marquage qui la rétro-réfléchit vers le récepteur de l'Ecodyn. L'appareil produit une mesure tous les 40 cm mais fournit une moyenne sur 100 m afin de filtrer les mesures trop basses attribuées à la chaussée elle-même. Ecodyn n'est pas le seul rétro-réfectomètre disponible : le ZDR 6020 de Zehtner, le Laserlux G7 de Roadvista¹ ou le LTL-M de Delta sont les principales alternatives. La facilité de mise en œuvre des rétro-réfectomètres fait de la rétro-réflexion la mesure de dégradation naturelle des marquages.

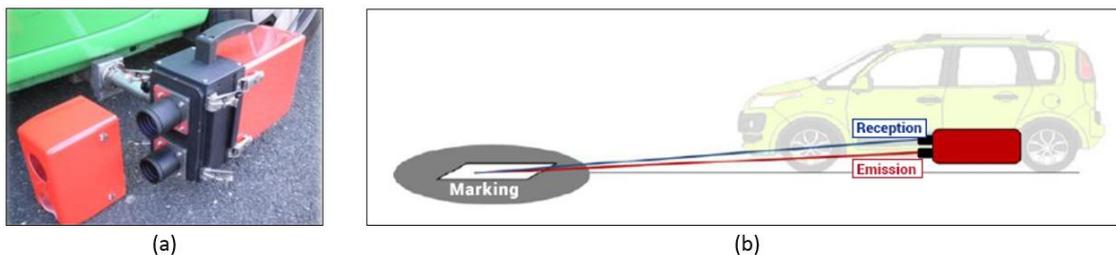


FIGURE 2.16 – Principe d'un Ecodyn : (a) Un Ecodyn 3 embarqué, (b) Principe d'inspection (VECTRA 2017)

Le véhicule s'intègre parfaitement à la circulation et n'est pas soumis à une limitation de vitesse (autre que celle prévue par la signalisation verticale et le Code de la route). Le protocole actuel est finalement assimilable à un véhicule traceur. Dans l'hypothèse d'une flotte de véhicules munie d'un rétro-réfectomètre, un premier algorithme de fusion de données similaire à celui proposé par (MENANT 2014) peut être adapté afin de faciliter la gestion des mesures d'inspection.

Actuellement, les lignes de marquages sont inspectées mensuellement dans le meilleur des cas. En France, les inspections sont commandées et planifiées par le gestionnaire d'infrastructure (privé ou public) et l'inspection peut être réalisée par un laboratoire public ou un industriel. Cette stratégie d'inspection peut engendrer un suivi incomplet du niveau de rétro-réflexion. Par exemple, l'instant où un marquage est insuffisamment rétro-réfléchissant est généralement indisponible. Cet événement est dit (statistiquement) censuré. Un gestionnaire d'infrastructure peut également commander des inspections ciblées. De fait, le suivi peut être parsemé de mesures manquantes. Afin de réduire ces deux problèmes, cette thèse propose différents outils :

- un estimateur de données manquantes basé sur la dégradation locale,
- un estimateur d'historique de maintenance basé sur la recherche d'augmentation de la rétro-réflexion,
- un algorithme EM estimant les paramètres d'une loi de Weibull et les instants de défaillance censurés et donc un modèle de durée de vie.

Deux critiques sont identifiables à ce stade.

Les véhicules autonomes ne se doteront pas d'un rétro-réfectomètre car ce ne sont pas des aides à la conduite. La transition entre les rétro-réfectomètres et les capteurs des véhicules autonomes ne sera possible qu'au travers d'un protocole expérimental adapté

1. Roadvista a fait le choix de remplacer la lumière blanche par un laser

courant sur plusieurs mois en conditions réelles. Par exemple, la société LuxInnovation va lancer fin 2018 un manège de véhicules autonomes entre les villes de Metz, Saarbrücken et Luxembourg. Le but premier est d'évaluer les difficultés de transitions entre les réseaux routiers et numériques (MORVAN 2018).

Indépendamment du véhicule autonome, la rétro-réflexion mesure uniquement la quantité de lumière renvoyée par un marquage (et plus particulièrement de nuit). Cette mesure ne renseigne donc pas "l'intégrité physique" du marquage. Ces deux points sont connus de longue date. Afin de les contrer, des techniques d'inspection alternatives ont été envisagées. Un tour d'horizon est proposé à la prochaine section.

2.4.2 Alternatives aux rétro-réfectomètres

Deux alternatives aux rétro-réfectomètres sont identifiées : mesurer la perte de produit de marquage ou exploiter la performance des caméras.

Mesurer la perte de produit

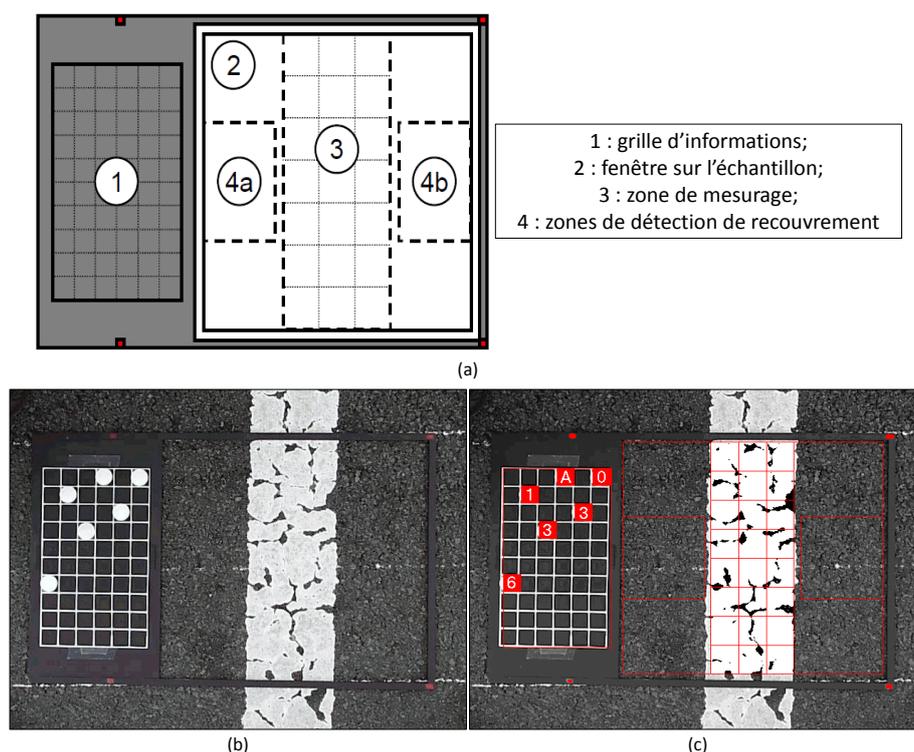


FIGURE 2.17 – Evaluation du PMR d'un marquage : (a) présentation du masque d'évaluation, (b) approche classique, (c) application d'un seuillage (DUMONT 2001)

Avant l'arrivée des rétro-réfectomètres dans les années 70, les marquages étaient inspectés visuellement. La mesure de dégradation naturelle est le Pourcentage de Marquage Restant (PMR). Initialement, le PMR correspondait à la quantité "de blanc" restant sur un marquage. (DUMONT 2001) redéfini le PMR comme la quantité de pixels blancs restant et l'évalue par un traitement d'image. La figure 2.17 synthétise cette nouvelle approche :

1. Une grille de 18×30 cm où sont codées les informations d'identification munie d'une fenêtre sur la chaussée de 40×40 cm. Cette dernière est divisée en trois zones : la zone de mesurage de 14 cm de large au centre, les parties gauche et droite du marquage. Quatre repères rouges présents sur le masque permettent de localiser chaque zone (Fig 2.17.(a)).
2. Reste à localiser les repères : l'image est découpée en quadrants et chaque partie est parcourue en listant les pixels dont la composante rouge est prépondérante. Les coordonnées des repères dans l'image sont obtenues en calculant le barycentre de chacune des quatre listes. Les six aimants blancs aident à coder la grille magnétique afin de calibrer la grille au masque d'acquisition. Classiquement, la quantité "de blanc" restant est évaluée (Fig 2.17.(b)).
3. Dernière étape proposée par (DUMONT 2001), déterminer un seuil d'intensité séparant les pixels correspondant à la chaussée et au marquage. Ce seuillage est basé sur l'analyse de l'histogramme des intensités dans la fenêtre. Reste à évaluer numériquement la perte de pixel blanc par rapport à un rectangle parfaitement blanc (Fig 2.17.(c)).

A l'échelle d'une infrastructure routière, cette méthodologie a le défaut de mobiliser une équipe d'experts et la fermeture totale de la route.

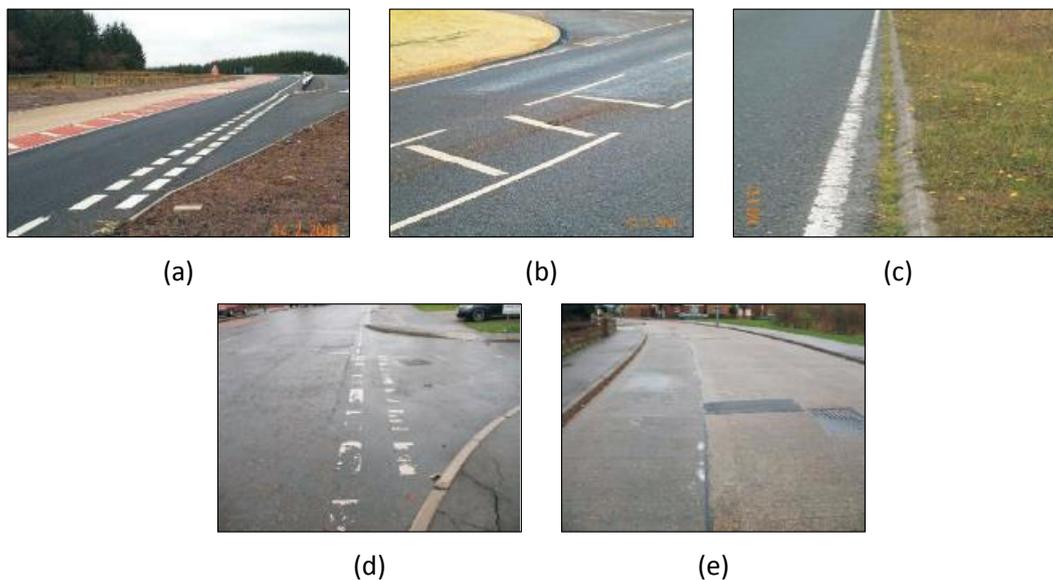


FIGURE 2.18 – Marquages dégradés de référence : (a) excellent, (b) bon, (c) moyen, (d) faible, (e) très faible (COSTELLO et al. 2011)

Dans l'hypothèse d'une évaluation réalisée par une caméra embarquée, (COSTELLO et al. 2011) proposent cinq niveaux de dégradation basés sur la disparition progressive de la signalisation horizontale. La figure 2.18 illustre ce système : excellent (ligne de marquages neuf), bon (ligne visible mais présence de faibles fissures), moyen (visible de nuit inégale le long de la ligne qui commence à disparaître), faible (faible visibilité de nuit et importante dégradation) et très faible (ligne de marquages disparue). Un premier modèle stochastique visant à évaluer la probabilité de transition d'un état à un autre est proposé.

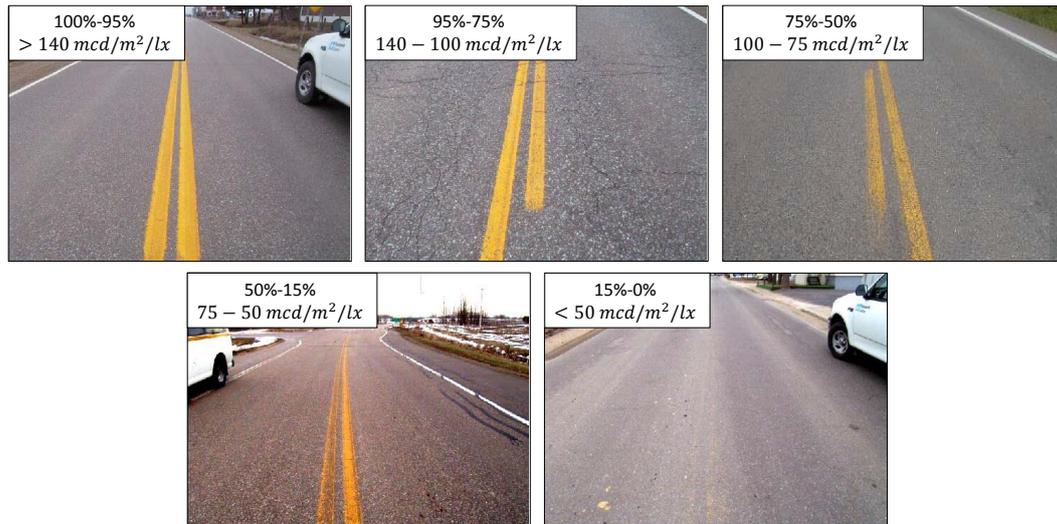


FIGURE 2.19 – Processus de dégradation en cinq classes proposées par (TREMBLAY 2004)

Depuis les années 2000, une demande de plan de maintenance des marquages routiers c'est formalisée au Québec. Dans ce contexte, Michel Tremblay propose un état de l'art sur la dégradation des marquages (TREMBLAY 2008) ainsi qu'un processus de dégradation en cinq classes illustrées par la figure 2.19 (TREMBLAY 2004). Contrairement à Costello, Tremblay propose des seuils de dégradation ainsi qu'un raccordement au phénomène de rétro-réflexion. Par exemple, un marquage est neuf si la quantité de produit restant est comprise entre 100 et 95% et que son niveau de rétro-réflexion est supérieur à $140 mcd/m^2/lx$. Les seuils et leurs équivalents en $mcd/m^2/lx$ sont établis empiriquement.

Exploiter la performance des caméras

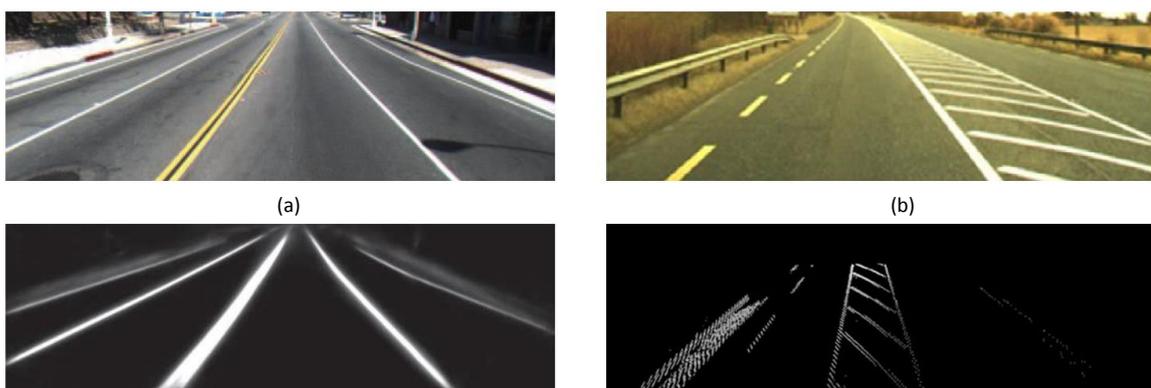


FIGURE 2.20 – Détection de ligne de marquages : (a) par une caméra (XIAO et al. 2016) (b) par un LIDAR (KUMAR et al. 2014)

Les véhicules autonomes seront munis de lidars et de caméras. La figure 2.20 illustre des détections de lignes de marquage indépendamment des travaux proposés par VEDECOM (REVILLOUD 2016). Le principe général reste la proposition d'un modèle mathématique capable de modéliser l'infrastructure routière en fonction des données de l'appareil de mesure (HILLEL et al. 2014). Avec une caméra, (XIAO et al. 2016) propose un algorithme

de traitement d'image (Fig 2.20.a). Avec un LIDAR, (KUMAR et al. 2014) propose un algorithme estimant l'infrastructure (Fig 2.20.b). Une détection par caméra capable de prendre en compte la dégradation des marquages est proposée par (NISHINO et al. 2015).

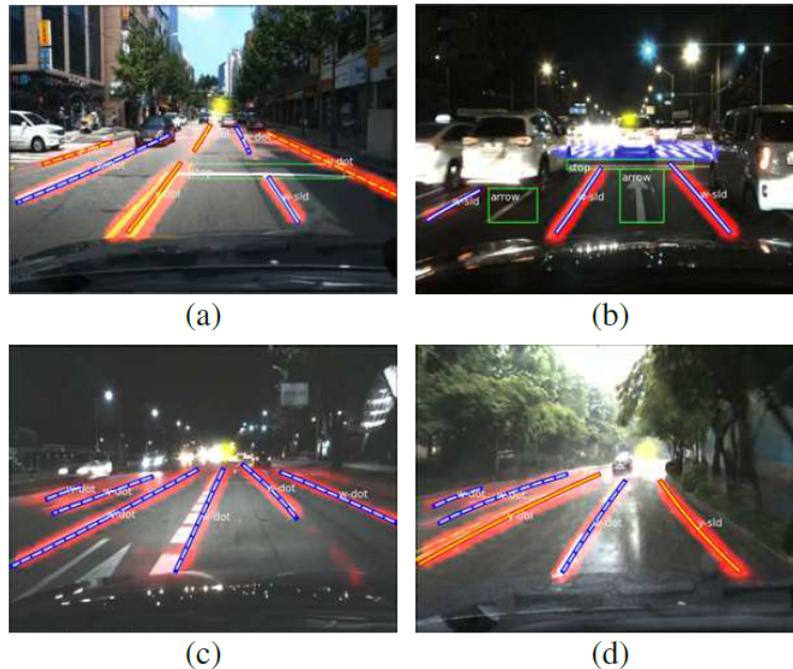


FIGURE 2.21 – Détection de ligne de marquages : (a) en milieu urbain ; (b) nombreuses lignes de marquage ; (c) condition de nuit ; (d) condition de pluie (LEE et al. 2017).

Toujours avec une caméra, un réseau de neurones peut être développé comme alternative aux techniques d'analyse d'image classiques (CHIARONI et al. 2018). Pour la détection de ligne de marquages un exemple est proposé par (LEE et al. 2017). La figure 2.21 est l'exemple de référence : le réseau de neurones est en mesure d'identifier les lignes de marquage en milieu urbain, en présence de nombreuses lignes de marquage, en condition de nuit ou en condition de pluie.

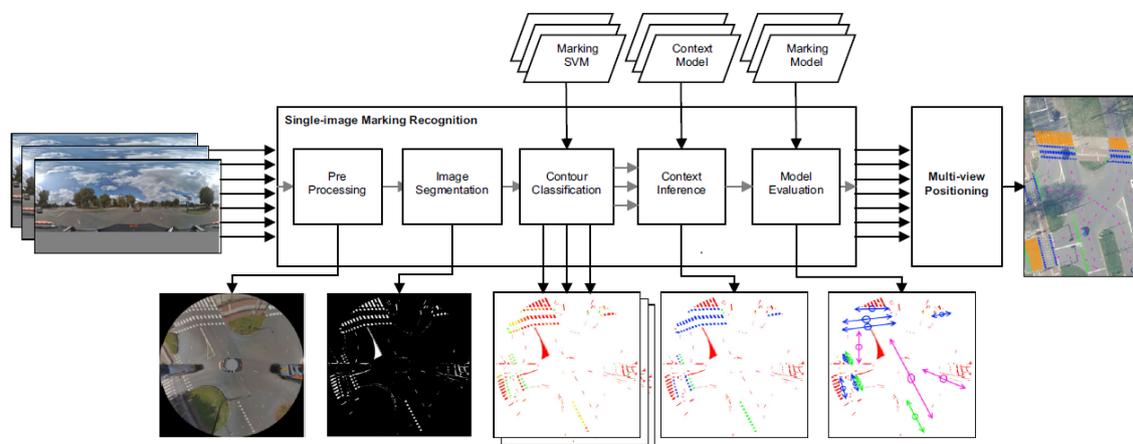


FIGURE 2.22 – Cartographie de la signalisation horizontale proposée par (HAZELHOFF et al. 2015)

Une nouvelle approche consiste à synchroniser les techniques de détection de marquage à la cartographie de la signalisation horizontale (BRESSON et al. 2016). (HAZELHOFF et al.

2015) proposent de cartographier directement la signalisation horizontale. La figure 2.22 présente leur algorithme. Un véhicule traceur muni d'une caméra panoramique à 360° transmet la totalité des images obtenues dans son voyage. Dans un premier temps, les images sont fusionnées afin d'établir une carte des environs (ici un carrefour de la ville de Eindhoven aux Pays-Bas). Un premier clustering basé sur le contraste de gris identifie la signalisation horizontale. Un second clustering permet d'identifier le carrefour. Une analyse de la signalisation permet d'identifier le rôle de chaque marquage (passage piéton, ligne axiale...). Le trafic routier et les zones piétonnes sont déduits. Finalement, une cartographie identifiant la signalisation horizontale, le trafic routier et les zones piétonnes est établie. Une approche similaire pour des zones forestières est proposée par (GOLPARVAR-FARD et al. 2012).

Synthèse

La perte de produit de marquage est la mesure de dégradation la plus intuitive et est la plus cohérente pour un véhicule autonome. Le calcul du PMR est le plus adéquate en ce sens mais est impossible à mettre en œuvre. Recourir à une caméra ou un LIDAR est l'évolution logique de cette approche. Cependant, ces nouvelles approches ne permettent pas pour l'instant d'établir un modèle de dégradation ou de maintenance aussi finement que par le biais de la rétro-réflexion. Par exemple, il n'existe pas (à notre connaissance) une définition de marquage défaillant du point de vue d'une caméra ou d'un LIDAR (en particulier pour la circulation d'un véhicule autonome). A ce stade, le plus parcimonieux est de développer un modèle de maintenance basé sur le phénomène de rétro-réflexion. Ce choix oriente cette thèse vers une littérature s'étalant sur les trente dernières années. Un état de l'art sur l'exploitation des données de rétro-réflexométrie est proposée à la section suivante.

2.5 Modèles de dégradation de la signalisation horizontale

Actuellement, la signalisation horizontale est principalement inspectée par un rétro-réflexomètre. En France, l'Ecodyn du MLPC est le plus populaire. Les mesures d'inspection sont essentiellement exploitées en vue d'un modèle de dégradation qui doit piloter un plan de maintenance préventif. Cette section présente les principaux modèles de dégradation des marquages.

2.5.1 Modèles de dégradation réalisés par des méthodes de régression

Les modèles de dégradation de la signalisation horizontale sont proposés depuis la seconde moitié des années 90. Le consensus est de prédire le coefficient de rétro-réflexion² RL de la signalisation horizontale par une méthode de régression. Au moins deux questions restent ouvertes à ce jour : le choix du type de régression (linéaire, multilinéaire, exponentielle...) et le choix des variables explicatives à prendre en compte (nombre de passages de roues, trafic, temps, chimie du marquage, position du marquage...).

2. RL est l'acronyme classique de "Coefficient of Retroreflected Luminance"

Rapide introduction aux méthodes de régression

Les méthodes de régression regroupent un ensemble de méthodes statistiques pour analyser la relation d'une variable Y par rapport à une (ou plusieurs) variable(s) X explicative(s). Les hypothèses standards sont que X et Y ne sont pas indépendantes entre elles et que la seule connaissance de X permet de prédire Y . Soit x_1, \dots, x_n des valeurs de X (prises sans erreur de mesure) et les valeurs y_1, \dots, y_n de Y correspondantes. La régression linéaire est la plus répandue et est de la forme (2.1) où $a \in \mathbb{R}$ et $b \in \mathbb{R}$ sont respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente. Par la méthode classique des moindres carrés ordinaires, $a \in \mathbb{R}$ et $b \in \mathbb{R}$ sont respectivement estimés par les relations (2.3) et (2.2) avec $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ et $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ (TUFFERY 2011). Le modèle de régression peut également être multilinéaire (TUFFERY 2011), polynomial (FAN 2018) ou encore non-linéaire (SEBER et WILD 1989).

$$Y = a + bX \quad (2.1)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2.3)$$

Dans le cas des marquages rétro-réfléchissants, le modèle qui fait le plus consensus est celui qui consiste à expliquer la rétro-réflexion par l'âge. Sous réserve d'un historique de maintenance disponible, les campagnes d'inspection réalisées par des rétro-réfectomètres sont particulièrement adaptées à cette démarche. En effet, chaque campagne apporte son lot de mesures de rétro-réflexion contextualisé par l'âge de la signalisation.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \in [0, 1] \quad (2.4)$$

Indépendamment du type de régression, différents critères de qualité existent afin d'apprécier la robustesse du modèle comme la somme des moindres carrés ou l'erreur quadratique (TUFFERY 2011). Le coefficient de détermination, ou critère R^2 , est le plus utilisé dans la littérature des marquages routiers. Le critère est défini par (2.4) où y_i est la i -ème mesure de rétro-réflexion, \hat{y}_i est le niveau de rétro-réflexion prédit (par le modèle de régression) et $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ est la rétro-réflexion moyenne. Idéalement, R^2 doit être proche de 1 (correspondant à un modèle dont les prédictions sont proches des données réelles).

Modèles de dégradation basés sur l'âge

Les modèles de dégradation ont pour but de planifier des actions de maintenance. L'âge de la signalisation est mécaniquement la variable explicative qui fait naturellement consensus. En 1995, (LU 1995) propose le premier modèle de dégradation connu. Il est adapté à l'État de l'Alaska. La rétro-réflexion RL est modélisée par une régression exponentielle (2.5) en fonction de l'âge des marquages en mois t . Les coefficients a , b , et c dépendent du type de marquage posé. Par exemple : $a = 167.5$, $b = 72.3$, et $c = -0.100$ pour un

marquage thermoplastique. Un catalogue de coefficients est proposé par Lu en fonction de la chimie du marquage. Le critère R^2 est très volatile : entre 0.20 (pour un enduit à chaud projeté) et 0.90 (pour un marquage à base de méthacrylate de méthyle avec un double billage).

$$RL = a + be^{ct} \quad (R^2 \in [0.20 \text{ } 0.90]) \quad (2.5)$$

Une approche classique est de prédire le niveau de rétro-réflexion RL par une relation linéaire en fonction de l'âge calculé en jours t (2.6). Les deux principaux modèles sont les relations proposées par (SCHEUER et al. 1997) et (LEE et al. 1999)³ (tous deux basées sur une cinquantaine de routes de l'État du Michigan) et adaptables en fonction du type de marquage. Lee et al présentent un R^2 faible mais stable (entre 0.14 pour un marquage thermoplastique et 0.18 pour un marquage quelconque) tandis que Scheuer et al obtiennent un R^2 plus robuste mais plus volatile (entre 0.02 pour les marquages thermoplastiques posés dans la ville de Jackson et 0.48 pour les marquages thermoplastiques posés dans la ville de Cadillac).

$$RL = at + b \quad (R^2 \in [0.02, 0.48]) \quad (2.6)$$

Une alternative aux modèles linéaires ou exponentiels est proposée en 2006 par (BAHAR et al. 2006). Le niveau de rétro-réflexion RL est prédit par une régression polynomiale inversée (2.7) en fonction de l'âge en mois des marquages t et pondérée par les coefficients b_0 , b_1 et b_2 dépendants de la chimie du marquage, du climat et la géométrie de la route. Exemple, pour une résine blanche posée dans une région et une infrastructure quelconque : $b_0 = 2.95 \times 10^{-03}$, $b_1 = 6.96 \times 10^{-05}$, $b_2 = -6.01 \times 10^{-07}$. Aucun critère de qualité n'est proposé.

$$RL = \frac{1}{b_0 + b_1 t + b_2 t^2} \quad (2.7)$$

Plutôt que de prédire directement le niveau de rétro-réflexion, (SARASUA et al. 2003) proposent en 2003 de prédire le différentiel absolu ΔRL ou relatif $\% \Delta RL$ de rétro-réflexion par une relation linéaire fonction du temps en jours t . Les modèles linéaires sont adaptés à des marquages thermoplastiques et sont discriminés en fonction de la couleur (blanche ou jaune). Le critère R^2 est faible mais relativement stable (entre 0.47 et 0.21). Le différentiel absolu adapté à un thermoplastique blanc est le plus fiable (2.8).

$$\Delta RL = \begin{cases} -0.06t - 6.80 & \text{White color} & (R^2 = 0.47) \\ -0.03t - 3.63 & \text{Yellow color} & (R^2 = 0.21) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\% \Delta RL = \begin{cases} -0.03t - 3.29 & \text{White color} & (R^2 = 0.39) \\ -0.02t - 2.35 & \text{Yellow color} & (R^2 = 0.24) \end{cases} \quad (2.9)$$

(THAMIZHARASAN et al. 2003) optimise les modèles de (2.8-2.9) en discriminant le

3. Lee et al souhaitaient initialement un modèle multilinéaire fonction du trafic journalier annuel moyen, la proportion de poids lourds et les limitations de vitesse mais ces variables furent statistiquement peu pertinentes

type de chaussée (bitume ou béton) et la chimie du marquage (thermoplastique, peinture ou résine). Avec un critère R^2 de 0.78, le modèle (2.9) est le plus robuste et adapté aux marquages en résine sur des chaussées en béton.

$$T_{100} = 10^{\frac{RL_0 - 100}{b}} \quad (2.10)$$

Au lieu de prédire le coefficient de rétro-réflexion, (ANDRADY 1997) propose une estimation du temps nécessaire à franchir le seuil des 100 $mcd/m^2/lx$. Cette estimation est basée sur un modèle de régression logarithmique (2.10) en fonction du niveau de rétro-réflexion à neuf (RL_0) et du gradient semi-logarithmique b . Deux problèmes se posent : le modèle est complètement indépendant de la route et son trafic, et le niveau de rétro-réflexion minimal est fixe.

Le trafic comme facteur de dégradation aggravant

La littérature propose également le trafic comme variable explicative. Le consensus consiste à modéliser en amont l'impact direct du trafic sur la signalisation horizontale. Les normes NF EN 1436 (AFNOR 2018b) et 1824 (AFNOR 2012) reconnaissent le nombre de passages de roues pour évaluer le nombre de véhicules circulant directement sur un marquage routier.

Définition 2 (Nombre de passages de roues (AFNOR 2012))

Le nombre de passages de roues doit être compris comme le nombre de roues roulant sur un segment de longueur I centré sur le point P_i d'une section de chaussée transversale (une voie) pendant une période ΔT

En France, l'Association pour la Certification et la Qualification des Equipements de la Route (ASCQUER) est chargée de la certification NF des produits de marquages sur le sol français (IISR 2011). La norme NF EN 1824 (AFNOR 2012) présente le site d'expérimentation pour l'évaluation de la dégradation de la rétro-réflexion en fonction du nombre de passages de roues et propose un premier modèle pour évaluer ce nombre à un an près. Basés sur ces données d'expérimentation, (HAUTIÈRE et al. 2008) prédisent le niveau de rétro-réflexion RL par une régression exponentielle polynomiale logarithmique fonction du nombre de passages de roues r et pondérée par le niveau de rétro-réflexion minimal RL_0 et des coefficients a , b et c dépendantes du type de marquage (2.11). L'erreur moyenne quadratique relative est de 10% en moyenne. Le nombre de passages de roues reste actuellement non mesurable sur une route donnée. Par conséquent ce modèle est non applicable en dehors du site d'expérimentation de la Route Nationale 2 (dans l'Oise) utilisé par l'ASCQUER.

$$RL = RL_0 e^{a \ln^2(r+1) + b \ln(r+1) + c} \quad (2.11)$$

L'alternative est de considérer le trafic comme un facteur de dégradation aggravant proportionnellement à l'âge du marquage. (ABBOUD et BOWMAN 2002) proposent en 2002 l'exposition au trafic⁴ VE définie comme le produit pondéré du trafic moyen journalier

4. Traduction libre de *Vehicule Exposure*

annuel⁵ $AADT$ et l'âge du marquage t en mois (2.12).

$$VE = AADT \times t \times 0.0304. \quad (2.12)$$

(LINDLY et WIJESUNDERA 2003) puis (LEE et al. 2010) proposent *l'exposition cumulée au trafic*⁶ CVE . Chacun la définit comme le ratio (2.13-2.14) entre le produit de l'âge en jours des marquages t et du trafic journalier annuel moyen $AADT$ sur le nombre pondéré de lignes de marquage (Number of lane). A un facteur multiplicatif près, les trois approches sont finalement équivalentes et semblent être proposées indépendamment.

$$CVE_{Lindly} = \frac{t \times AADT}{\text{Number of Lane} \times 10^8} \quad (2.13)$$

$$CVE_{Lee} = \frac{t \times AADT}{\text{Number of Lane} \times 10^{-5}} \quad (2.14)$$

(ABBOUD et BOWMAN 2002) et (LEE et al. 2010) prédisent le niveau de rétro-réflexion par une régression logarithmique en fonction de *l'exposition au trafic* et *l'exposition cumulée au trafic*. Abboud & Bowman proposent un modèle adapté à la peinture à l'eau (2.15) ou l'enduit à chaud (2.16) tandis que Lee et al pondèrent la régression en fonction de la couleur, de la chimie du marquage, de la quantité de trafic et du type de revêtement de la chaussée. Avec un R^2 moyen de 0.98, Lee et al proposent le modèle le plus robuste de la littérature.

$$RL = -19.457 \ln(VE) + 26.27 \quad (R^2 = 0.31) \quad (2.15)$$

$$RL = -70.806 \ln(VE) + 150.55 \quad (R^2 = 0.58) \quad (2.16)$$

$$RL = a + b \ln(CVE_{Lee}) \quad (R^2 = 0.98) \quad (2.17)$$

(LINDLY et WIJESUNDERA 2003) proposent une comparaison entre un modèle linéaire, exponentiel, polynomial et logarithmique. Le critère R^2 rejette une approche polynomiale ou logarithmique car trop faible. Le test de Fisher recommande le modèle exponentiel sous l'hypothèse que le temps est sec, et le modèle linéaire sinon. Dans les deux cas, le critère R^2 est de 0.66 ce qui est inférieur au modèle de Lee et al.

Prise en compte de l'infrastructure routière

(SITZABEE et al. 2009) proposent les modèles multilinéaires les plus exhaustifs en termes de variables explicatives. Pour les marquages thermoplastiques (2.18), le niveau de rétro-réflexion est prédit en fonction du temps t , du niveau à neuf RL_0 , du trafic journalier annuel moyen $AADT$, la position des marquages ($X_1 = 1$ si bande d'arrêt d'urgence et 0 sinon ; $X_2 = 1$ si ligne axiale et 0 sinon) et la couleur du marquage ($X_3 = 1$ si blanc et 0

5. Traduction standard de *Annual Average Daily Traffic*

6. Traduction libre de *Cumulative Vehicle Exposure*

sinon ; $X_4 = 1$ si jaune et 0 sinon) avec un critère R^2 de 0.60.

$$RL = 190 + 0.39RL_0 - 2.09t - 0.0011AADT + 20.7(X_1 - X_2) + 19(X_3 - X_4) \quad (2.18)$$

Pour les marquages à base de peinture à l'eau (2.19), le niveau de rétro-réflexion est prédit en fonction du temps, du niveau à neuf RL_0 et du trafic journalier annuel moyen $AADT$ avec un critère R^2 de 0.75.

$$RL = 55.2 + 0.77RL_0 - 4.17t \quad (R^2 = 0.75) \quad (2.19)$$

À noter, les travaux de thèse de (MULL 2011) proposent d'inclure dans (2.18) la fréquence des passages de chasse-neiges.

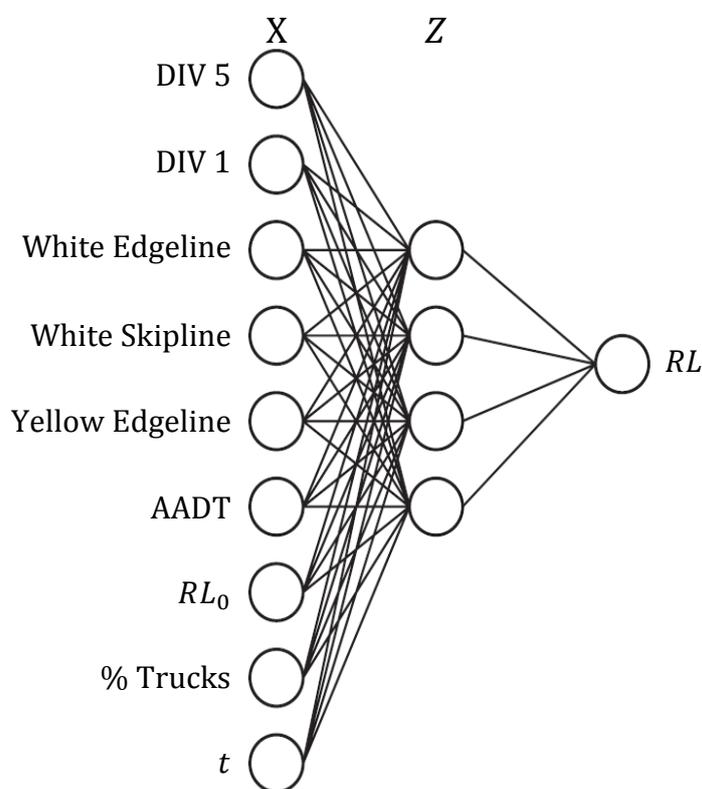


FIGURE 2.23 – Multi-Layer Perceptron proposé par (KARWA et DONNELL 2011)

(KARWA et DONNELL 2011) modélisent la dégradation de la rétro-réflexion par un réseau de neurones de type Multi-Layer Perceptron (MLP) et illustré par la figure 2.23. Les données d'entrée X sont des marquages x dont le niveau de rétro-réflexion RL évolue dans le contexte suivant : le marquage est posé dans la division 1 ou 5 (Div 1 - Div 5) de l'État de Caroline du Nord, constitue une ligne blanche ou jaune, discontinue ou continue (White Edgeline - White Skipline - Yellow Edgeline) sur une route dont le trafic journalier moyen annuel $AADT$ et la proportion de camion % Truck sont connus ainsi que son âge t et la mesure de rétro-réflexion à neuf RL_0 . Sous le formalisme standard d'un MLP, le réseau de neurones s'itère par rapport à la règle suivante :

$$\begin{aligned}
RL &= Z^t W_{Z,RL} + B_{RL} \\
Z &= \phi(X^t W_{X,Z} + B_Z)
\end{aligned}
\tag{2.20}$$

Où $\phi(\cdot) = \frac{1}{1 + e^{-\cdot}}$ est la fonction sigmoïde; B_{RL} et B_Z sont respectivement les biais d'estimation de RL et de la couche cachée Z ; $W_{Z,RL}$ et $W_{X,Z}$ sont respectivement les correspondances entre Z et RL et entre X et Z . La fonction coût associée au réseau de neurones est l'erreur quadratique entre les RL observées et les RL prédites. Cette approche est théoriquement adaptable à un réseau donné.

Principales critiques

A l'échelle de l'État de l'Alabama, (OZELIM et TUROCHY 2014) ne retiennent que deux modèles : le multilinéaire proposé par (SITZABEE et al. 2009) et la variation entre deux inspections avec variables discriminées proposée par (THAMIZHARASAN et al. 2003). Au moins deux articles remettent en question le choix d'une méthode de régression de dégradation actuelle.

Le premier est basé sur les campagnes d'inspection de 1994 à 1998 sur 85 routes sur l'ensemble des États-Unis. (MIGLETZ et al. 2001) comparent trois modèles de régression (linéaire de premier ordre, de second ordre et exponentiel) en fonction du temps et du trafic cumulé. L'objectif principal des auteurs était d'évaluer la durée de vie des trois chimies les plus répandues aux États-Unis (résine, bande préfabriquée, thermoplastique). Les différents modèles de régression indiquent de larges variations entre eux; même en restreignant l'étude à un unique État américain. Les auteurs attribuent ces variations à la géométrie des routes, la chimie des marquages, la qualité de pose et la politique de maintenance hivernale.

Le second est basé sur les autoroutes d'un même État américain enregistrant un trafic journalier annuel moyen similaire. (KOPF 2004) compare une trentaine de modèles de régression (dont ceux disponibles avant 2004) et conclut également sur de larges variations entre les modèles.

2.5.2 Fiabilité et maintenance des marquages

Les modèles de dégradation présentés orientent pleinement les études de fiabilité des marquages routiers. Pour un modèle donné, le plan de maintenance couramment admis consiste à prédire l'instant où les marquages franchissent un seuil de rétro-réflexion minimal préalablement fixé (100 ou 150 $mcd/m^2/lx$ généralement) puis de planifier une action de remplacement à cet horizon.

C'est précisément pour cette raison que l'âge de la signalisation est la seule variable explicative qui fait consensus. La fiabilité des marquages est interprétée comme le temps de service utile annoncé par le modèle de dégradation. Par exemple, la relation linéaire (2.6) de Lee et al établit que, parmi les chimies les plus répandues aux États-Unis, les

marquages à base de peinture à l'eau ont la durée de vie la plus courte et engendrent le coût de maintenance le plus élevé en raison d'une fréquence de remplacement plus élevée (LEE et al. 1999).

La durée de vie fonctionnelle proposée par la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) est ce qui définit au mieux la fiabilité des marquages. Elle englobe clairement la luminance et le SRT en plus de la rétro-réflexion (le tout en fonction de la couleur du marquage). Comme le montre la section 2.6.1, ce niveau d'exigence est respectable uniquement en milieu urbain : (ASDRUBALI et al. 2013) par exemple. Cependant, le niveau d'exigence est totalement fixé par le gestionnaire d'infrastructure. C'est pour cette raison que le niveau de rétro-réflexion minimal est considéré (dans cette thèse) comme un paramètre à fixer en amont.

Définition 3 (Durée de vie fonctionnelle (AFNOR 2018b))

Période durant laquelle le marquage routier répond à toutes les exigences de performance des classes fixées initialement par l'autorité routière responsable.

En 2008, (SATHYANARAYANAN et al. 2008) sont les premiers à considérer pleinement la dégradation des marquages sous l'angle d'une analyse de Weibull. Basé sur une route d'essai de l'État 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 présente une distribution de Weibull par combinaison. L'interpolation linéaire est proposée comme premier estimateur connu de données manquantes. Les lois de Weibull présentées sont paramétrées en suivant la méthode du maximum de vraisemblance en tenant compte des problèmes de censures directement liés à la stratégie d'inspection. Les dates de défaillance sont distribuées par une loi de Weibull : une loi classique dans les études fiabilistes en raison de sa souplesse (COCOZZA-THIVENT 1997). Ces deux derniers points seront plus longuement discutés respectivement aux sections 3.1.2-3.1.3 et 4.2.1.

(ASDRUBALI et al. 2013) proposent un plan de maintenance adapté aux marquages urbains tout en respectant la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b). Dans la forme, le plan de maintenance est similaire à une stratégie de maintenance préventive systématique basée sur l'âge et le coût d'entretien ((ARNLJOT et RAUSAND 2009) par exemple). L'instant de remplacement est celui qui maximise la dégradation et minimise la fonction coût (2.21). Cette fonction calcule le pourcentage à prélever sur le budget d'entretien alloué à la maintenance de l'infrastructure routière et correspond au ratio entre la fonction AAB indiquant le budget annuel standard (en euro) pour l'entretien de la signalisation horizontale et la fonction $ABEM$ calculant le coût d'entretien à un instant donné. Cette dernière (2.22) correspond à la somme totale des coûts d'entretien des trois lignes de marquage urbains (rive de gauche ou de droite et axe). Le coût d'une ligne (2.23) est lui-même calculé en fonction de la superficie S_i totale en m^2 , le nombre $n > 1$ de points de mesure, le pourcentage de dégradation P_{ij} observé au point de mesure $1 < j < n$ et son coût de remplacement actuel MC_{ij} (défini en $euro/m^2$) ainsi que sa durée de vie théorique SL_j en mois. A l'échelle de Pérouse (en Italie), les auteurs prédisent une diminution des coûts à long terme.

$$CIS - C[\%] = \frac{AAB[euro]}{ABEM[euro]} \times 100 \quad (2.21)$$

$$ABEM[euro] = \sum_{i=1} C_i[euro] \quad (2.22)$$

$$C_i[euro] = S_i \sum_{j=1}^n P_{ij} M C_{ij} \frac{12}{SL_j} \quad (2.23)$$

Les précédentes sections ont présenté les techniques de pose et d'entretien, les méthodes d'inspection actuelles et les principaux modèles de dégradation et de fiabilité des marquages routiers. Cette thèse s'inscrit principalement dans le contexte du véhicule autonome. Cependant, les outils développés sont également compatibles aux problématiques actuelles (en particulier la gestion de patrimoine routier). Dans cet autre contexte, deux questions sont apparues : l'accidentologie et les limites technologiques face aux exigences de la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b).

2.5.3 Autre

(RASDORF et al. 2009) questionnent plusieurs affirmations sur les marquages routiers. Le rapport est ici résumé en cinq points :

1. Établir une différence significative de rétro-réflexion entre les lignes axiale et de rive droite.
2. Vérifier le niveau de rétro-réflexion en fonction du sens de pose. Le niveau de rétro-réflexion de la ligne axiale est statistiquement plus élevé dans le sens contraire de pose.
3. Établir une corrélation entre la quantité de microbille injectée dans un marquage et son niveau de rétro-réflexion à neuf. Pas de corrélation établie autre que l'augmentation de microbilles engendre une plus grande rétro-réflexion.
4. Mesurer l'impact du climat sur la dégradation du marquage. Il est généralement admis que l'État de la Caroline du Nord est divisé en trois régions : montagneuse, maritime et rase campagne. L'hypothèse d'une différence significative en fonction du climat est rejetée mais des études supplémentaires sur ce sujet sont recommandées.
5. Proposer un modèle de dégradation des marquages thermoplastiques et à base de peinture puis déduire un plan de maintenance. Ces deux travaux correspondent aux modèles proposés par (SITZABEE et al. 2009)⁷.

Les industriels savaient déjà que le niveau de rétro-réflexion est plus élevé dans le sens contraire de pose et les gestionnaires d'infrastructures considèrent la neige comme un

7. Les travaux de thèse de William E. Sitzabbe furent dirigés par William J. Rasdorf

facteur de stress. Ce dernier point est finalement une question ouverte. Les travaux de thèse de (MULL 2011) semblent davantage mettre en cause les chasse-neiges que la neige elle-même comme facteurs de stress.

2.6 Questions annexes

Cette section propose un rapide état de l'art sur deux problématiques annexes à l'entretien des marquages routiers : les limites technologiques faces aux exigences de la norme NF EN 1436 et l'accidentologie. Toutes deux peuvent servir de base à ces travaux de thèse. La première motiva une étude de classification des produits de marquage français qui a fait l'objet d'une communication à la 50ème éditions des Journées de la Statistique (REDONDIN 2018).

2.6.1 Limites de la norme NF EN 1436

La norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) reconnaît d'autres phénomènes physiques. La rétro-réflexion est également étudiée par temps humide et par temps de pluie. La luminance (sous éclairage diffus) correspond à la réflexion moyenne de la lumière par le marquage et est interprétée comme la visibilité de jour. Des zones de chromaticité sont établies pour contrôler la couleur des marquages. Un coefficient d'adhérence est également disponible. Il est interprété comme la rugosité du marquage.

Définition 4 (Coefficient de luminance sous éclairage diffus (AFNOR 2018b))

Le coefficient de luminance sous éclairage diffus (d'une surface de marquage routier) Q_d ($\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$) est le rapport de la luminance d'une surface de marquage routier dans la direction donnée par l'éclairage de cette surface.

Définition 5 (Valeur SRT (AFNOR 2018b))

La valeur Skid Resistance Tester est la qualité d'adhérence qu'offre une surface routière humide, mesurée par le frottement à faible vitesse d'un patin en caoutchouc sur cette zone. On utilise l'abréviation SRT.

La rétro-réflexion étant la seule mesurable dynamiquement, elle fait naturellement office d'unique mesure de dégradation des lignes de marquage. Cependant, si la détection des marquages est réalisée par une caméra basée sur la différence de contraste, alors la luminance est une mesure plus adéquate. Pour combler l'absence d'appareil de mesure dynamique, une stratégie actuelle consiste à établir une corrélation entre la rétro-réflexion et la luminance. Par exemple, (LUNDKVIST et ISACSSON 2007) sont les premiers à avoir tenté, sans succès, une estimation par une régression linéaire de la luminance fonction de la rétro-réflexion. Les auteurs se sont finalement tournés vers une relation linéaire entre la rétro-réflexion par temps sec et par temps humide. Par cette même approche, (BABIC et al. 2016) ont récemment établi une faible corrélation (2.24) entre rétro-réflexion et luminance. Cette relation a l'avantage d'être directement exploitable mais nécessiterait une mise à l'épreuve afin d'établir la robustesse du modèle.

$$Q_d = \frac{RL}{1.60} \pm 20.63 \quad (R^2 = 0.40) \quad (2.24)$$

Le respect total de la norme NF EN 1436 est finalement réalisable uniquement en zone urbaine. Par exemple, (ASDRUBALI et al. 2013) ont réalisé deux campagnes d'inspection en 2010 et 2012 sur 27 sites choisis à Pérouse. Les auteurs proposent un système de notation (Fig 2.24) facile à mettre en œuvre et cohérent vis-à-vis de la norme NF EN 1436 : 0 correspond à un marquage dont la rétro-réflexion par temps sec et humide (respectivement R_{LD} , R_{LW}), la luminance (Q_d) et l'adhérence (SRT) sont catastrophiques tandis que 10 correspond aux plus hautes performances attendues pour un marquage neuf tout usage. De ce suivi, les auteurs proposent le premier plan de maintenance des marquages urbains connus.

Score	R_{LD}	R_{LW}	Q_d	SRT	Colour
0	0-19	0-3	0-39	0-29	No
1	20-29	4-6	40-59	30-32	
2	30-39	7-9	60-69	33-35	
3	40-49	10-14	70-79	36-38	
4	50-69	15-19	80-89	39-41	
5	70-99	20-24	90-99	42-44	
6	100-124	25-34	100-114	45-49	
7	125-149	35-49	115-129	50-54	
8	150-199	50-74	130-144	55-59	
9	200-299	75-149	145-159	60-64	
10	≥ 300	≥ 150	≥ 160	≥ 65	Yes

FIGURE 2.24 – Système de notation de la dégradation des marquages proposé par (ASDRUBALI et al. 2013)

En France, l'ASsociation pour la Certification et la QUalification des Equipements de la Route (ASCQUER) est chargée de la certification des produits de marquages sur le sol français (AFNOR 2012). Pour se faire, l'ASCQUER a installé un banc d'essai sur la Route Nationale 2 aux abords de Boissy-Fresnoy (Figure 2.25).

La dégradation d'un produit de marquage est étudiée pendant 2 années consécutives. Si le produit respecte l'arrêté du 10 mai 2000 au bout de cette échéance, alors le produit est certifié NF et autorisé à la commercialisation en France. L'ASCQUER publie la dégradation simultanée de la rétro-réflexion, luminance et l'adhérence ainsi qu'une description fine du produit (ASCQUER 2018a) (ASCQUER 2018b).

L'annexe C propose une analyse factorielle des données de certification et a fait l'objet d'une communication (REDONDIN 2018). L'objectif principal est l'identification de familles de marquages en vue d'une recherche de corrélation entre la rétro-réflexion et la luminance. Trois grandes familles sont identifiées : les produits blancs rétro-réfléchissants, les produits blancs non rétro-réfléchissants et les produits jaunes.

2.6.2 Lien avec l'accidentologie

Etablir une corrélation entre l'état courant de la signalisation horizontale et l'accidentologie est un axe de recherche pertinent. Par exemple, les travaux de thèse de (AL-MASAEID 1997) proposent une approche bayésienne pour établir une loi gamma modélisant la sûreté d'une infrastructure routière. Un cas d'étude montre par ailleurs une diminution significative du nombre d'accidents après restauration complète de la chaussée. Cependant, peu



FIGURE 2.25 – Site d'expérimentation de l'ASCQUER installé sur la Route Nationale 2 aux abords de Boissy-Fresnoy (Offert par Frédéric Féré - Directeur marketing opérationnel chez SIGNATURE)

d'études recherchent spécifiquement un lien entre la rétro-réflexion et l'accidentologie. Les travaux de (LEE et al. 1999), (SMADI et al. 2008) et (BAHAR et al. 2006) en sont les trois principaux exemples.

(LEE et al. 1999) proposent plusieurs relations linéaires adaptées à certains États américains entre le ratio nombre d'accidents de jour et de nuit pour un niveau de rétro-réflexion donné. Le critère R^2 est cependant extrêmement faible (< 0.05).

(SMADI et al. 2008) estiment la probabilité d'observer un accident à un instant donné ($P(\text{crash})$) par une régression logistique (2.25) fonction du niveau de rétro-réflexion globale (X_1), de la présence de certaines lignes de marquage ($X_2 = 1$ si la ligne de rive est blanche et 0 sinon ; $X_3 = 1$ si la ligne axiale est jaune et 0 sinon ; $X_4 = 1$ si la ligne de rive est jaune et 0 sinon ; $X_5 = 1$ si les lignes sont posées sur une autoroute et 0 sinon ; $X_6 = 1$ si les lignes sont continues et 0 sinon ; $X_7 = 1$ si les lignes sont discontinues et 0 sinon ; $X_8 = 1$ si les lignes axiale et de rive sont présentes et 0 sinon) et le trafic journalier (X_9). Empiriquement, les auteurs recommandent un niveau minimal de $200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Sous ce seuil, le cas d'étude illustrant l'approche montre que la probabilité d'un accident est inférieure à 20% pour une route marquée uniquement par une ligne de rive blanche, inférieure à 15% pour une route marquée uniquement par une ligne de rive jaune et inférieure à 6% pour une route marquée uniquement par une double-ligne axiale blanche.

$$\log \left(\frac{P(\text{crash})}{1 - P(\text{crash})} \right) = b_0 + \sum_{i=1}^9 b_i X_i \quad (2.25)$$

(BAHAR et al. 2006) proposent, sur une route donnée, une estimation (2.26) du nombre d'accidents sur un mois donné $\mu_{y,m,r,x}$ en fonction du nombre d'accidents moyen par an μ_y , d'un coefficient de sûreté mensuel p_m , d'un coefficient de fiabilité de la rétro-réflexion de la signalisation horizontale q_r , pondéré par une classe de rétro-réflexion ω_x . Les coefficients de sûreté et de fiabilité sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance en fonction de divers scénarios sur l'infrastructure routière (autoroute, voie rapide, présence

d'une double-ligne axiale...) et des douze mois de l'année tandis que les classes de réflexion sont construites empiriquement. Le rapport propose finalement un catalogue de coefficients et la formule (2.26) est exploitable directement.

$$\mu_{y,m,r,x} = \mu_y \times p_m \times q_r \times \omega_x \quad (2.26)$$

Les deux formules (2.25) et (2.26) sont directement exploitables. Cependant, aucun cas d'étude indépendant n'est connu afin d'établir leur robustesse. Au cours de cette thèse, les données d'accidentologie de nos deux principaux exemples n'étaient pas disponibles.

L'accidentologie est davantage traitée d'un point de vue statistique. Le point de vue le plus couramment étudié est l'impact de la pose d'une ligne de marquages ou d'un changement de pratique de pose sur la fréquence des accidents. (BALI et al. 1978) ont établi une réduction globale de 39% d'accidents sur 500 autoroutes américaines réparties sur 10 États grâce à l'ajout d'une ligne de rive en plus de la double-ligne axiale. Des expériences similaires ont été menées dans les années 60 par (MUSICK 1960) et (BASILE 1962) puis dans les années 90 par (AL-MASAEID et SINHA 1994) qui enregistrent une baisse d'accidents de l'ordre de 10 à 15%. (JOHNS et J.S. 1997) ont démontré une augmentation des accidents en Arizona après une réforme imposant une double-ligne axiale jaune (au lieu de blanche). Le dimensionnement des marquages est quant à lui discuté par (COTTRELL 1988), (LOUTZENHEISER 1996) et (CHOUEIRI et al. 1994).

2.7 Étude de cas : la Route Nationale 4

Les outils développés tout au long de cette thèse sont illustrées au travers d'un cas d'étude : la ligne axiale de la Route Nationale 4. Cette section propose une présentation générale de cette route.



FIGURE 2.26 – Présentation du tronçon sélectionné de la Route Nationale 4

La Route Nationale 4 (RN4) résulte de la fusion de la *précédente* Route Nationale 3 reliant Paris et l'*actuelle* Châlons-en-Champagne et la Route Impériale 5 reliant Châlons-en-Champagne et Strasbourg en 1824. Depuis, le tracé a connu de nombreuses modifications : ajout de contournements urbains (Sézanne, Fère-Champenoise ou Vitry-le-François), abandon du détour à Châlons-en-Champagne (transformé en l'actuelle Route Nationale 44), absorption de routes secondaires... L'actuel tracé fut décidé par la réforme des Grands itinéraires routiers français de 1949. Une volonté à très long terme est de transformer la totalité de la route en une chaussée 2 × 2 voies. Aujourd'hui, la RN4 relie Paris (Porte de Bercy) et Strasbourg (Pont de l'Europe). Actuellement, la route est co-entretenu par la

Direction Interdépartementale des Routes Île-de-France (entre Paris et Courgivaux) et la Direction Interdépartementale des Routes Est (DIR Est). La figure 2.26 présente le tronçon sélectionné pour l'ensemble de la thèse. La ligne axiale de la RN4 relie Courgivaux et Vaclerc sur 102 km dans le département de la Marne. Elle est inspectée annuellement en Septembre en collaboration avec le CEREMA Est depuis 2007. Le rétro-réfectomètre choisi est un Ecodyn 1 (VECTRA 2017). Chaque mesure est localisée par un Point de Repère (PR). La direction vers Vaclerc est sélectionnée. L'infrastructure routière est riche. Elle présente des tronçons en 2×1 ou 2×2 voies, des traversées de zones urbaines, des contournements urbains, fusion avec des routes départementales et nationales, des tronçons atypiques...

Deux versions de la base de suivi de la rétro-réflexion de la ligne axiale ont été étudiées. La première présenta une importante quantité de données manquantes : 83% des PR admettaient une inspection manquante. Ce constat motiva l'élaboration d'un algorithme de reconstruction de données présenté à la section 3.1.2. À l'occasion de l'inspection de Septembre 2016, une importante mise à jour de la base de suivi fut réalisée : 10% des PR admettaient une inspection manquante. La moitié d'entre eux sont localisée dans la ville de Vitry-le-François (dont les conditions d'inspections sont délicates). L'autre moitié des données manquantes sont attribuées ici à un bruit blanc. 95% des PR sont finalement pris en compte après reconstruction des inspections indisponibles.

En plus de la présence de données manquantes, l'historique de maintenance de la signalisation horizontale n'est pas disponible. Pour pallier cette absence et compte tenu des mesures de suivi disponibles, une estimation basée sur la recherche d'une augmentation de la rétro-réflexion est considérée.

Les mesures de rétro-réfectométrie ne sont pas contextualisées par une description fine de l'infrastructure. Tout au plus, certaines zones particulièrement atypiques (le contournement de Vitry-le-François ou l'échangeur de Sommesous par exemple) ont été identifiées via Google Maps. Depuis janvier 2018, le Ministère de la Transition écologique et solidaire a publié une importante base de données décrivant finement l'ensemble des infrastructures non concédées. Un stage de fin d'étude visant à compléter les données actuelles et rechercher une première corrélation entre l'infrastructure routière et l'état courant de la signalisation horizontale fut financé par VEDECOM et co-encadré par IFSTTAR. Un résumé est proposé à l'annexe A.

2.8 Synthèse et conclusions

Le consensus général des trente dernières années consiste à établir un modèle de dégradation des marquages routiers rétro-réfléchissants basé sur une méthode de régression prédisant la rétro-réflexion en fonction de l'âge de la signalisation (à minima). Avec un critère R^2 de 0.98, la relation logarithmique fonction de *l'exposition cumulée au trafic* proposée par (LEE et al. 2010) est la plus robuste. Un catalogue de coefficient permet une adaptation du modèle en fonction de la couleur et de la chimie du marquage, du type de bitume et du trafic journalier. Sous réserve des données de contexte disponibles, il est

possible de vérifier la robustesse de ce modèle en dehors des autoroutes sud-coréennes dont sont issues les données de rétro-réflexométrie.

Cependant, cette stratégie rencontre de nombreuses difficultés. Les principales faiblesses sont l'absence de consensus sur le type de régression et le choix des variables explicatives. Par exemple, (ABBOUD et BOWMAN 2002) et (LINDLY et WIJESUNDERA 2003) proposent également une relation logarithmique similaire mais présentent un R^2 bien moins robuste (entre 0.30 et 0.60 contre 0.98). De plus, les relations multilinéaires de (SITZABEE et al. 2009) prenant en compte la totalité de l'infrastructure routière (type de marquage, trafic, rétro-réflexion initiale et même (MULL 2011) la fréquence des campagnes de chasse-neige) est une alternative crédible malgré un R^2 moins robuste (0.60-0.75 contre 0.98). Sur la pertinence de cette approche, les travaux de (MIGLETZ et al. 2001) puis de (KOPF 2004) présentent de grandes variations dans les prédictions d'un modèle à l'autre même en restreignant l'étude sur des infrastructures similaires en termes d'exploitation.

Supposons qu'un hypothétique modèle de dégradation basé sur une méthode de régression fasse consensus. Le modèle manquera toujours de souplesse. Par exemple, les poids attribuer à variables explicatives sont généralement fixés par la régression et n'ont pas de sens physique a priori ((SITZABEE et al. 2009) par exemple). Pour gagner en flexibilité, un catalogue de poids est parfois disponible ((LEE et al. 2010) par exemple). Cependant, il doit être actualisé, en particulier face aux nouvelles technologies de marquages⁸, afin d'être pertinent.

Les alternatives sont limitées. (ANDRADY 1997) propose une estimation du temps de service mais calibrée uniquement à un seuil minimal de 100 $mcd/m^2/lx$. (KARWA et DONNELL 2011) proposent un réseau de neurones de type multi-layer perceptron mais il demande une adaptation à une infrastructure routière donnée ainsi qu'une importante quantité de données de contextualisation. L'analyse de Weibull de (SATHYANARAYANAN et al. 2008) a l'avantage de s'adapter aisément à une infrastructure donnée et est la principale entrée aux études de fiabilité et de maintenance au sens de (BARLOW et PROSCHAN 1996) ou (ARNLJOT et RAUSAND 2009)

La problématique de la qualité des données est rarement abordée. (SATHYANARAYANAN et al. 2008) sont les premiers à suggérer des solutions : l'interpolation linéaire comme estimateur de données manquantes et les durées de vie censurées (inhérentes aux techniques d'inspection actuelles) sont prises en compte dans la méthode du maximum de vraisemblance. Cependant l'étude de cas proposée est réalisée sur un seul cycle de vie sur une route choisie dont la signalisation horizontale fut remise à neuf et inspectée mensuellement. Dans la pratique, plusieurs cycles de vie peuvent se présenter sur une même route, l'historique de maintenance peut ne pas être disponible et les campagnes d'inspection sont généralement irrégulières.

Finalement, les travaux de (SATHYANARAYANAN et al. 2008) offrent la première approche fiabiliste des marquages routiers et ouvrent la voie vers les récentes recherches dans les constructions de plans de maintenance dans le sens de (BARLOW et PROSCHAN 1996) ou encore (ARNLJOT et RAUSAND 2009) tout en proposant des outils pour limiter

8. Studio Roosegaarde développe la première génération de marquage phosphorescent (Smart Highway)

les effets des données manquantes et durées de vie censurées. Cette thèse propose une extension de ces travaux afin d'établir une alternative crédible et robuste aux travaux des trente dernières années.

Les études de fiabilité et de maintenance sont largement basées sur des données de retour d'expérience. Le chapitre suivant aborde pleinement cette problématique. Plus précisément, le chapitre propose différents outils visant à concevoir un suivi de la rétro-réflexion dans le temps puis déduire une segmentation d'une ligne de marquages en zones stratégiques de maintenance.

Analyse de données de rétro-réflexométrie

Les données de rétro-réflexométrie représentent l'essentiel des mesures d'inspections de la signalisation horizontale et caractérise totalement les marquages routiers. Ce chapitre propose une formalisation de ces données afin de réaliser un suivi de la rétro-réflexion dans le temps. Une Classification Ascendante Hiérarchique est réalisée sur ce suivi afin de regrouper les marquages présentant un mode de dégradation similaire dans le temps. De cette segmentation, une estimation de l'historique de maintenance basée sur l'étude des variations entre deux inspections est présentée. Une alternative à l'interpolation linéaire est proposée afin de corriger en amont les éventuelles données d'inspections manquantes.

3.1 Approche clustering pour l'estimation de données manquantes

Les données de rétro-réflexométrie sont supposées issues d'une campagne d'inspection réalisée par un véhicule traceur embarqué d'un rétro-réflexomètre dynamique comme l'Ecodyn du MLPC (VECTRA 2017). Une mesure d'inspection est dite manquante lorsqu'un point de repère n'est pas associé à une mesure. Deux hypothèses expliquent ce phénomène : le bruit blanc associé à l'appareil de mesure (exemple de la RN4) et l'irrégularité des campagnes d'inspections (exemple proposé à l'annexe B). Cette section a fait l'objet d'une publication (REDONDIN et al. 2017a).

3.1.1 La Classification Ascendante Hiérarchique

Le principe de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) consiste à produire des suites de classes emboîtées d'hétérogénéités croissantes (TUFFERY 2011). L'idée générale est la suivante :

1. Chaque donnée d'entrée forme initialement son propre cluster.
2. La distance entre l'ensemble des clusters est évaluée.
3. Les deux plus proches clusters sont fusionnés.
4. Recommencer à l'étape 2 jusqu'à l'apparition d'un unique cluster contenant l'ensemble des données.

L'étape 2 sous-entend une notion de distance entre deux clusters. Plusieurs distances sont disponibles : distance minimale, maximale, médiane (TUFFERY 2011)... Dans cette thèse,

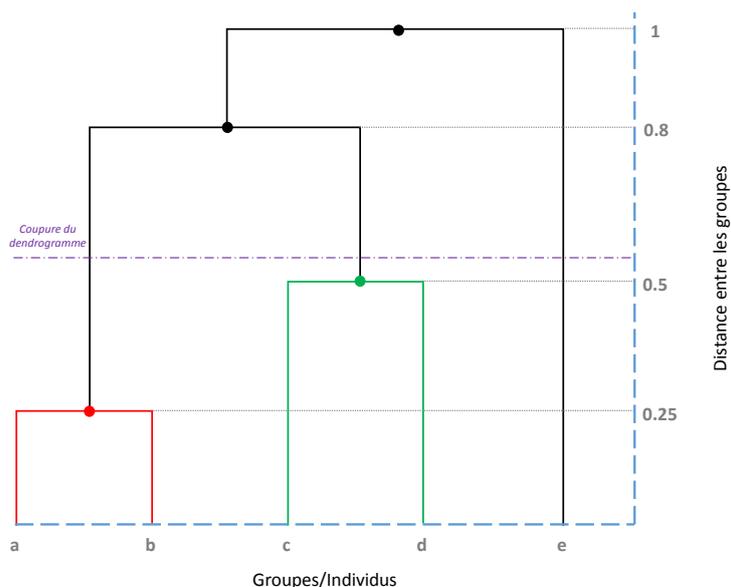


FIGURE 3.1 – Représentation d'un dendrogramme

la distance de Ward est systématiquement choisie car elle est celle qui minimise le plus la perte d'inertie interclasse. Soient d la distance euclidienne; X et Y deux clusters; x et y leurs barycentres (i.e. leurs profils moyens); n_X et n_Y leurs effectifs. La distance de Ward entre X et Y est définie par (3.1).

$$d_W(X, Y) = \frac{d(x, y)}{\frac{1}{n_X} + \frac{1}{n_Y}}. \quad (3.1)$$

Le processus de clustering de la CAH est représenté par un arbre de classification appelé dendrogramme. La figure 3.1 illustre la construction du graphique : les deux plus proches individus (au sens de la distance de Ward), par exemple a et b , forment un noeud symbolisant la formation d'un cluster. Le processus s'arrête lorsque l'ensemble des individus est regroupé en un seul cluster (regroupement de e avec $\{a, b, c, d\}$ sur la figure). Reste à construire la hauteur hiérarchique du cluster qui correspond à la distance de Ward entre les barycentres (ou profils moyens) de chaque cluster (TUFFERY 2011).

Un critère d'arrêt déterminant le nombre de clusters retenus doit être établi entre les étapes 3 et 4. Un critère classique est la "coupe du dendrogramme" qui consiste à stopper le processus de clustering juste avant une importante augmentation de la hauteur hiérarchique. Sur la figure 3.1, la classification retiendrait les clusters $\{a, b\}$, $\{c, d\}$ et $\{e\}$. Ce point est cependant dépendant de la nature des données et de l'objectif de classification souhaité.

Deux critères sont mis en œuvre dans ce chapitre. Le premier, adapté à l'algorithme de reconstruction de données présenté à la section 3.1.2, consiste à rechercher le plus grand nombre de clusters tel que chaque cluster admet au moins un marquage inspecté. Le second, adapté à l'exploration du suivi de la rétro-réflexion présentée à la section 3.2.2, correspond à la coupe du dendrogramme. Le choix de coupe est cependant dépendant selon

si on souhaite estimer un historique de maintenance ou identifier des zones de maintenance stratégiques.

3.1.2 Reconstruction de données de rétro-réflexométrie

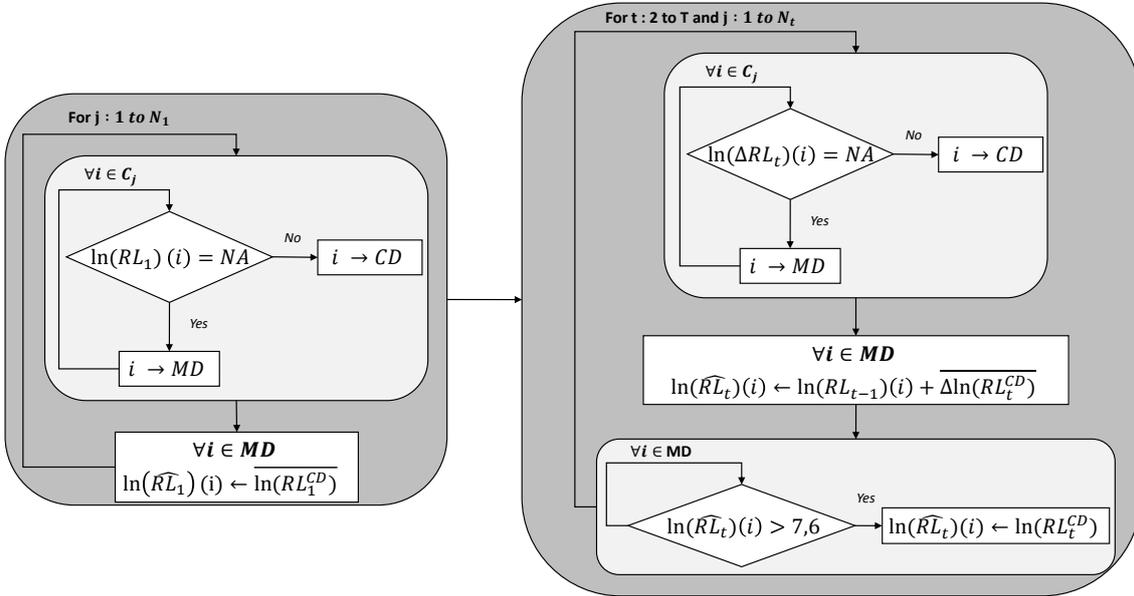


FIGURE 3.2 – Reconstruction de données de rétro-réflexométrie par une approche clustering

Soit un réseau routier dans un sens de circulation donné et une ligne de marquages composée de $n > 0$ points de mesures localisés par un Point de Repère (PR) et définis par $i = 1, \dots, n$. Pour simplifier, une mesure est interprétée comme un marquage localisé par son PR. La norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) considère que le niveau de rétro-réflexion d'un marquage est compris entre 1 et $2000 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$. Pour respecter cette restriction, la rétro-réflexion d'un marquage i à l'inspection t est ici un entier noté $RL_t(i) \in \llbracket 1 ; 2000 \rrbracket$. Le différentiel de rétro-réflexion de i entre deux inspections t et $t - 1$ est défini par

$$\Delta RL_t(i) = RL_t(i) - RL_{t-1}(i) \quad (3.2)$$

Ce réseau est inspecté $T > 1$ fois. L'ensemble des données d'inspections est à présent agrégé en fonction du PR. Si l'inspection de i à t est manquante ($RL_t(i) = NA$; Not Available) alors le niveau de rétro-réflexion estimé est noté $\widehat{RL}_t(i)$. Par cohérence avec (3.2), le différentiel estimé est noté $\widehat{\Delta RL}_t(i)$. En accord avec la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b), les seuils de 1 et $2000 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ sont les valeurs minimales et maximales des estimateurs.

$$\Delta \ln(RL_t)(i) = \ln(RL_t)(i) - \ln(RL_{t-1})(i) \quad (3.3)$$

Le processus de reconstruction de données est illustré par la figure 3.2. Pour commencer, le logarithme népérien transforme la totalité de la base de suivi. Le différentiel de rétro-réflexion est défini à ce stade par (3.3). L'algorithme est itératif dans le sens où chaque inspection bénéficie de sa propre reconstruction. Deux périodes sont considérées :

l'initialisation ($t = 1$) correspond à la première inspection et les itérations ($t > 1$) correspondent aux inspections suivantes. L'idée principale est que la première inspection est reconstruite suivant le niveau de rétro-réflexion médian local et les inspections suivantes sont reconstruites via la variation de rétro-réflexion médiane locale. La notion de localité est totalement définie en amont par la CAH : chaque cluster est une zone locale. La première inspection est classée en prenant en compte le PR associé à la mesure d'inspection et les inspections suivantes sont classées en fonction du PR associé à la variation de rétro-réflexion par rapport à la précédente inspection.

Soit N_t le nombre de clusters segmentant l'inspection t . Chaque cluster est noté C_j (où $j = 1, \dots, N_t$) et est d'effectif $\#C_j$. Le critère d'arrêt de la CAH est le plus grand nombre de clusters tel que chaque cluster admet au moins une mesure d'inspection. Dans la pratique, N_t est établi empiriquement. Définir clairement chaque cluster est généralement un non-sens ici : l'objectif est d'isoler au maximum chaque mesure manquante autour d'une région dont la dégradation est connue.

$$N_t = \begin{cases} \max\{m \in \mathbb{N}^* / \forall j \in \llbracket 1 ; m \rrbracket, \exists i \in C_j, \ln(RL_1)(i) \neq NA\} & \text{si } t = 1 \\ \max\{m \in \mathbb{N}^* / \forall j \in \llbracket 1 ; m \rrbracket, \exists i \in C_j, \Delta \ln(RL_t)(i) \neq NA\} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.4)$$

Indépendamment de la phase de reconstruction, chaque cluster C_j est divisé en deux parties : CD (Complete Data) pour les marquages inspectés et MD (Missing Data) sinon. Lors de la phase d'initialisation, le niveau médian du logarithme de la rétro-réflexion observé dans CD est l'estimateur de chaque marquage rangé dans MD :

$$\overline{\ln(RL_1^{CD})} = \frac{\ln(RL_1^{CD})(\frac{\#CD}{2}) + \ln(RL_1^{CD})(\frac{\#CD}{2} + 1)}{2} \quad (3.5)$$

Pendant la phase d'itération, la variation médiane du logarithme du niveau de rétro-réflexion observé dans CD est la principale composante de l'estimateur de $i \in MD$:

$$\forall t > 1, \overline{\Delta \ln(RL_t^{CD})} = \frac{\Delta \ln(RL_t^{CD})(\frac{\#CD}{2}) + \Delta \ln(RL_t^{CD})(\frac{\#CD}{2} + 1)}{2} \quad (3.6)$$

$\forall t \in \llbracket 1 ; T \rrbracket, \forall j \in \llbracket 1 ; N_t \rrbracket, \forall i \in C_j$, l'estimateur des mesures manquantes est :

$$\ln(\widehat{RL}_t)(i) = \begin{cases} \overline{\ln(RL_1^{CD})} & \text{si } t = 1 \\ \ln(RL_{t-1})(i) + \overline{\Delta \ln(RL_t^{CD})} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.7)$$

Une correction a posteriori est réalisée afin de respecter la norme NF EN 1436. La transformation logarithmique permet de ne pas produire d'estimateur avec un niveau de rétro-réflexion nul ou négatif. Cependant, pendant la phase itérative, si $\ln(\widehat{RL}_t)(i) > 7.6$, alors $\widehat{RL}_t(i) > 2000$. Dans ce cas-là, $\ln(\widehat{RL}_t)(i) := \ln(RL_t^{CD})$. La reconstruction terminée, une transformation de la base par l'exponentielle redonne les mesures en $mcd/m^2/lx$.

3.1.3 Comparaison avec l'interpolation linéaire

Graphiquement, l'interpolation linéaire consiste à modéliser la droite reliant deux points de référence. Appliquée à la reconstruction de données de rétro-rélectométrie, une inspection manquée est estimée en fonction des deux plus proches inspections. (SATHYANARAYANAN et al. 2008) préconisent l'interpolation linéaire dans un contexte particulier. L'étude est basée sur une route choisie dans l'État de Pennsylvanie remise à neuf en juillet 2002. La signalisation horizontale a bénéficié d'une inspection mensuelle jusqu'à son remplacement total en juillet 2005. Les données manquantes sont ici liées aux bruits blancs du rétro-rélectomètre. Dans cette situation, l'interpolation linéaire est une approche raisonnable. Reste à vérifier la pertinence d'une telle approche sur une route donnée et inspectée annuellement où l'historique de maintenance de la signalisation horizontale est indisponible.

Formalisme adapté de l'interpolation linéaire

Soit un marquage i dont l'inspection à $\tau \in \llbracket 1 ; T \rrbracket$ est manquante (c.à.d. $RL_\tau(i) = NA$) et posons $t_a \leq t_b$ les deux plus proches inspections disponibles. L'interpolation linéaire propose l'estimateur suivant :

$$\widehat{RL}_\tau(i) = \begin{cases} RL_{t_a}(i) + (RL_{t_b}(i) - RL_{t_a}(i)) \frac{\tau - t_a}{t_b - t_a} & \text{si } t_a < \tau < t_b \\ RL_{\tau-1}(i) + (RL_{t_a+1}(i) - RL_{t_a}(i)) & \text{si } \tau < t_a \\ RL_{\tau+1}(i) + (RL_{t_b}(i) - RL_{t_b-1}(i)) & \text{si } \tau > t_b \\ \emptyset & \text{sinon } (t_a = t_b) \end{cases} \quad (3.8)$$

Les paramètres t_a et t_b sont connus. Si l'inspection $t_a < \tau < t_b$ est manquante, alors l'estimateur correspond à l'interpolation standard. Les deux cas suivants correspondent à deux situations précises : si $t_a \neq 1$ est la première inspection disponible et $t_b \neq T$ est la dernière disponible. Dans le premier cas, l'instant t_a est défini par (3.9), $t_b = t_{a+1}$ et $RL_\tau(i)$ est progressivement estimé par (3.8) avec $\tau < t_a$.

$$t_a = \min \{t \in \llbracket 1, T \rrbracket / RL_t(i) \neq NA\} \quad (3.9)$$

Dans le second cas, l'instant t_b est défini par (3.10), $t_a = t_{b-1}$ et $RL_\tau(i)$ est progressivement estimé par (3.8) avec $\tau > t_b$.

$$t_b = \max \{t \in \llbracket 1, T \rrbracket / RL_t(i) \neq NA\} \quad (3.10)$$

Le dernier cas correspond à $t_a = t_b$ (éventuellement \emptyset). L'estimation est ici impossible.

A posteriori, il peut arriver que $\widehat{RL}_\tau(i) \in]-\infty; 1[\cup]2000; +\infty[$ ce qui est absurde au

regard de la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b). L'estimation est considérée comme absurde et le marquage i est retiré de l'étude.

Étude de cas : ligne axiale de la Route Nationale 4

Une première comparaison avec l'approche clustering (section 3.1.2) basée sur le suivi de la RN4 entre 2007 et 2015 a fait l'objet d'une communication à la conférence MMR 2017 (REDONDIN et al. 2017a). La première base de suivi souffrait d'un important problème de données manquantes. Une correction fut effectuée à l'occasion de l'agrégation de l'inspection de Septembre 2016. Elle a permis de développer un argument inédit : la comparaison des deux approches avec la version finale de la base. Dans un premier temps, le processus de reconstruction par les deux algorithmes sont exposés.

Le processus de reconstruction par l'interpolation linéaire est détaillé sur la figure 3.5. Sur les 1041 marquages présents dans la base de monitoring, 860 (83%) admettent une inspection manquante. Sur cet échantillon, l'interpolation linéaire détecte 106 marquages (10%) trop peu inspectés et 156 autres admettent une estimation absurde. Finalement, l'interpolation permet l'étude de 779 marquages, soit 75% de la ligne axiale de la RN4.

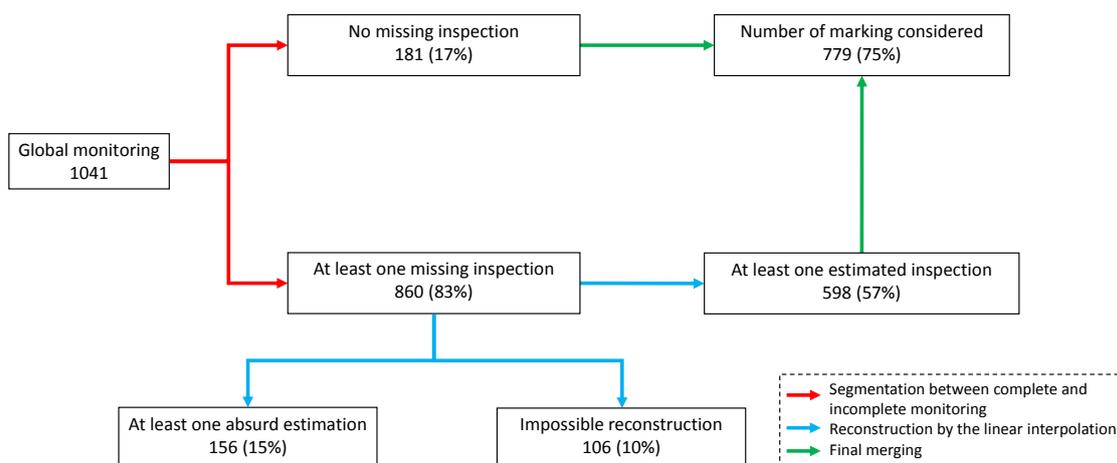


FIGURE 3.3 – Reconstruction de données de rétro-réflexométrie manquantes par l'interpolation linéaire

TABLE 3.1 – Processus de reconstruction par l'approche clustering

Yearly inspection	Number of clusters used	Number of missing data	Frequency against the NR4	Number of absurd estimator
2007	16	419	54%	0
2008	10	428	55%	15
2009	31	174	22%	0
2010	677	23	3%	0
2011	13	472	61%	7
2012	7	386	50%	0
2013	32	156	20%	0
2014	29	193	25%	1
2015	723	11	1%	0

Le processus de reconstruction par l'approche clustering est détaillé sur la table 3.1. Cette approche peut théoriquement reconstruire la totalité de la base de suivi (tant que chaque inspection produit une mesure). C'est pour cette raison que la base de suivi est restreinte à l'échantillon retenu par l'interpolation linéaire. L'ensemble des marquages a pu être reconstruit avec un nombre restreint d'estimations absurdes (corrigées a posteriori). Le nombre de clusters utilisé est de 171 ± 235 (variation expliquée par la quantité et la distribution des données manquantes).

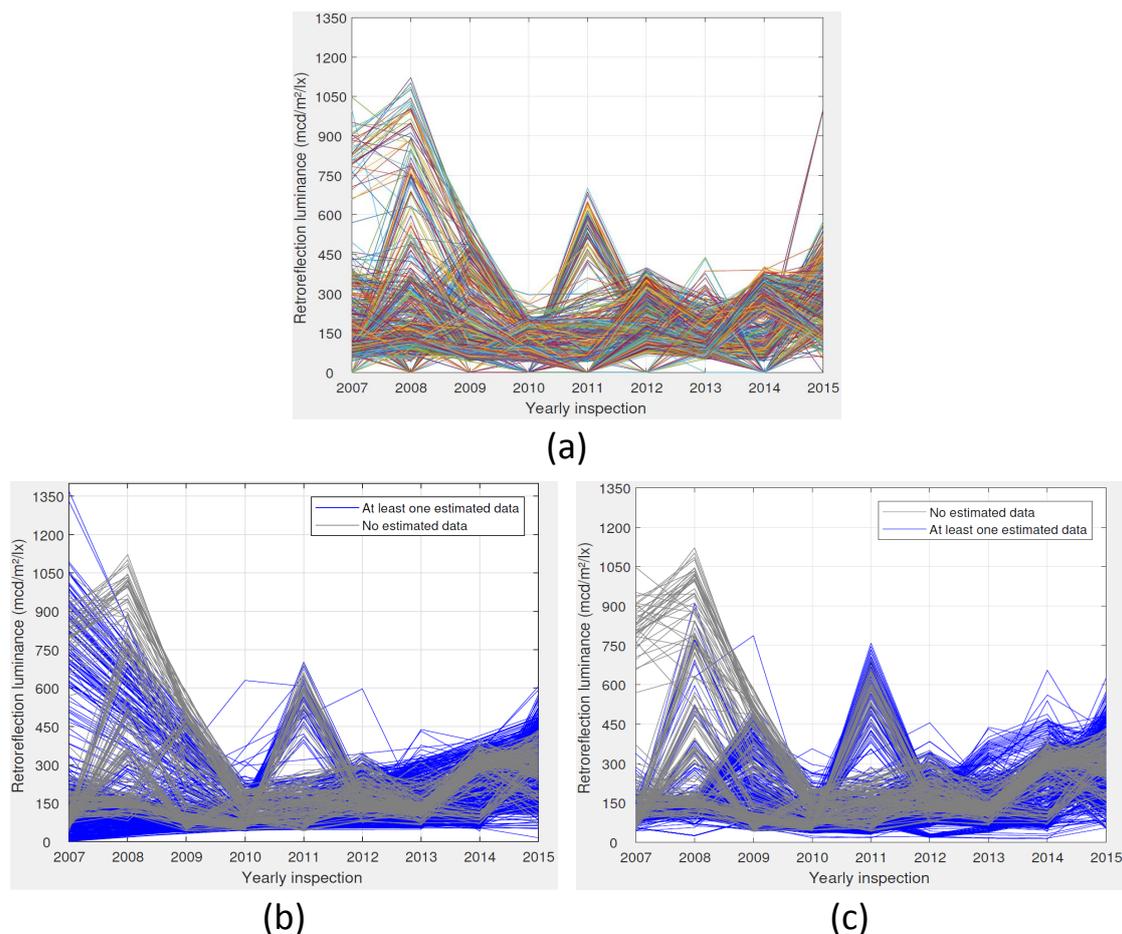


FIGURE 3.4 – Suivi de la rétro-réflexion de la RN4 : (a) Référence après MAJ de la base avec les PR pris en compte par l'interpolation linéaire, (b) interpolation linéaire, (c) approche clustering

La figure 3.4 compare les différents suivis de la rétro-réflexion de la ligne axiale de la RN4. La figure 3.4.(a) représente le suivi de référence et les figures restantes présentent respectivement la reconstruction par l'interpolation linéaire et l'approche clustering.

La figure 3.4.(b) illustre un suivi discutable : incohérent par rapport à la figure 3.4.(a) (en particulier en 2007-2010), très forte dégradation linéaire entre 2007 et 2010 et une croissance lente et linéaire depuis 2007. Une dégradation particulièrement linéaire pose au moins deux incohérences. Premièrement, le profil de dégradation moyen présenté dans la littérature est une forte dégradation (éventuellement linéaire) la première année suivie d'une dégradation quasi-stationnaire entre 1 et 3 ans puis une forte décroissance sur un an. Deuxièmement, le suivi non reconstruit présenté sur la figure 3.4.(b) montre que la

dégradation n'est pas aussi lisse. Par ailleurs, la lente augmentation de la rétro-réflexion est incohérente avec le fait que ce phénomène est décroissant. L'hypothèse d'un remplacement annuel systématique n'est pas crédible car l'augmentation de la rétro-réflexion associée est très insuffisante.

Graphiquement, l'approche clustering (Fig 3.4.(c)) suit davantage la dynamique présentée par la figure 3.4.(a) : importante augmentation en 2010 et 2013, accompagne l'augmentation de 2011. La reconstruction n'est cependant pas parfaite : le suivi de référence présente en 2007 un important groupe de marquages dont la rétro-réflexion est comprise entre 0 et 400 $mcd/m^2/lx$ tandis que l'approche clustering est comprise entre 50 et 300 $mcd/m^2/lx$. Mécaniquement, la rétro-réflexion reconstruite entre 2007 et 2009 est bien plus faible qu'il ne devrait. Ces observations sont cohérentes par rapport à l'algorithme de reconstruction : apprentissage sur les données disponibles (rétro-réflexion soit très faible soit très forte en 2007 ou comprise entre 150 et 300 $mcd/m^2/lx$ entre 2010 et 2013) puis estimation par rapport aux dynamiques locales.

Les deux approches ont une difficulté à retrouver les valeurs extrêmes ponctuelles. Par exemple, le suivi de référence (Fig 3.4.(a)) montre chaque année un groupe de marquages dont le niveau de rétro-réflexion est proche de 0 ainsi qu'un groupe inspecté à 1000 $mcd/m^2/lx$ en 2015. Seule l'approche clustering (Fig 3.4.(c)) retrouve en partie les faibles niveaux (sans pour autant présenter un aspect de groupe ponctuel). Le groupe inspecté à 1000 $mcd/m^2/lx$ est absent dans les deux approches.

TABLE 3.2 – Analyse de l'erreur d'estimation moyenne par inspection
C.A. = Clustering Approach ; L.I. = Linear Interpolation

Algorithm		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Global Mean
C.A.	Error	86	104	44	15	95	99	47	74	92	73
	Std dev	89	124	56	23	165	91	56	99	124	92
L.I.	Error	152	136	45	24	60	86	38	68	93	78
	Std dev	197	171	54	42	51	74	43	77	124	93

Pour les deux méthodes de reconstruction de données, l'erreur d'estimation d'un marquage i à l'inspection t correspond à la différence absolue entre le niveau de rétro-réflexion observé et estimé (3.11). La table 3.2 présente l'erreur moyenne et son écart-type calculés à chaque inspection ainsi que l'erreur moyenne globale. Une première observation est que l'erreur est très importante dans les deux approches : les années 2007 et 2008 ou 92 ± 124 et 93 ± 124 $mcd/m^2/lx$ en 2015. Sur l'ensemble des inspections, le niveau d'erreur est similaire : 73 ± 92 et 78 ± 93 $mcd/m^2/lx$.

$$\epsilon_t(i) = \left| RL_t(i) - \widehat{RL}_t(i) \right| \quad (3.11)$$

Le cas de l'interpolation linéaire n'est pas une surprise au vu des observations faites précédemment. La difficulté à retrouver les valeurs extrêmes ponctuelles impacte négativement la qualité des estimations de l'approche clustering. Par exemple, le groupe de marquages inspecté à 1000 $mcd/m^2/lx$ en 2015 est estimé à 225 $mcd/m^2/lx$ en moyenne

soit une erreur absolue de $775 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Si on retire ce cas, l'erreur moyenne sur 2015 décroît à 75 ± 70 . Globalement, l'approche clustering est plus fiable que l'interpolation linéaire en 2007, 2008 et 2010. C'est le contraire en 2011, 2012, 2014 et sont équivalentes sinon. De ce point de vue, les méthodes de reconstruction sont comparables.

Synthèse et conclusions

Les données de rétro-réflexométrie présentées ici ne sont pas contextualisées par l'infrastructure routière ou un historique de maintenance. L'interpolation linéaire fut proposée en premier lieu par (SATHYANARAYANAN et al. 2008) pour la correction d'un cycle de vie de marquages donné. L'hypothèse initialement retenue est qu'en absence d'historique de maintenance, cette méthode est inadaptée car elle ne parvient pas à retrouver une importante augmentation ponctuelle du niveau de rétro-réflexion et ne permet pas le respect de la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b). Les figures 3.4 et 3.5 confirment l'hypothèse : suppression de 25% de l'échantillon, observation d'une croissance lente de la rétro-réflexion et un cycle de vie présentant une décroissance rapide de la rétro-réflexion mais dont le mode de dégradation est incohérent par rapport aux zones systématiquement inspectées.

Toujours en absence d'historique de maintenance, une reconstruction basée sur une méthode de clustering permet d'identifier des modes de dégradations et des remplacements locaux. La CAH est ici sélectionnée d'une part pour la cohérence avec l'exploration de données proposée à la section suivante et d'autre part pour vérifier a posteriori la notion de localité. L'algorithme reconstruit finalement les données manquantes à chaque inspection en se basant sur la dégradation locale et, contrairement à l'interpolation linéaire, permet un respect de la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b). De plus, cet algorithme ne demande pas un nombre minimal de données de rétro-réflexométrie par inspection réalisée. L'hypothèse retenue est que le processus de reconstruction basé sur les dynamiques de dégradation locales est plus fiable que l'interpolation linéaire. La table 3.1 confirme le respect de la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) et la figure 3.4 confirme que l'approche clustering produit un suivi plus cohérent.

La table 3.2 montre cependant que l'erreur d'estimation est importante voire équivalente d'une méthode à l'autre. Une importante erreur n'est pas une surprise pour l'interpolation linéaire. Dans le cas de l'approche clustering, la table montre que l'algorithme ne parvient pas à prendre pleinement en compte les augmentations ponctuelles ou la dégradation brusque de la rétro-réflexion.

En l'absence d'historique de maintenance, l'approche clustering permet d'estimer un suivi plus cohérent par rapport à la dégradation des marquages pour un niveau d'erreur équivalent à l'interpolation linéaire. Les cas d'études présentés aux sections 3.3 et B.2.2 préciseront par ailleurs que l'approche est plus adaptée à la reconstruction du bruit blanc et atteint ses limites face à un plan d'inspection ciblé et irrégulier.

3.2 Exploration par une CAH pour l'identification de zones stratégiques

L'identification de zones stratégiques à entretenir a deux intérêts. La première consiste à segmenter un réseau routier en zones où la signalisation horizontale suit un mode de dégradation similaire. La segmentation en elle-même est réalisée par une CAH de la base de suivi (de la rétro-réflexion). Le second objectif est d'estimer un historique de maintenance par zone basée sur l'augmentation médiane entre deux inspections. Une première version de cette méthodologie fut publiée (REDONDIN et al. 2017b). Le présent rapport présente une version mature (et en cours de soumission dans un article de revue).

3.2.1 Analyse ponctuelle de la dégradation des marquages

Une campagne d'inspection est l'opportunité de réaliser un état de la dégradation des marquages sur l'ensemble d'un réseau routier donné. Quatre seuils de dégradations sont proposés afin de faciliter l'analyse de la dégradation.

1. Une analyse des données d'homologations de l'ASCQUER (Annexe C) indique que le niveau de rétro-réflexion moyen à neuf est de $400 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$.
2. (SMADI et al. 2008) recommande un seuil minimal de $200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ afin de minimiser les risques d'accidents.
3. La réglementation européenne recommande un seuil minimal de $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ (recommandé en France par (*Arrete du 10 mai 2000 relatif a la certification de conformite des produits de marquage de chaussées*)).
4. Les principales sources américaines ((SATHYANARAYANAN et al. 2008) par exemple) respectent $100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ comme seuil de dégradation maximal.

Tout marquage dont la rétro-réflexion est supérieure à $400 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ est considéré comme "aussi bon que neuf" (AGAN). Si la rétro-réflexion est comprise entre 400 et $200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, alors elle est interprétée comme les premiers signes de dégradation. Si elle est comprise entre 200 et $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, alors le seuil de sécurité routière de Smadi n'est plus respecté mais suffisante au regard de la législation européenne. Entre 150 et $100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, la législation européenne n'est plus respectée. En dessous de $100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, le marquage est considéré comme "aussi mauvais que vieux".

3.2.2 Identification de zones stratégiques

Soit une ligne de $n > 0$ marquages inspectée $T > 0$ fois. Soit \mathcal{I} le suivi de la rétro-réflexion des marquages (3.12), éventuellement complété par l'algorithme de reconstruction présenté à la section 3.1.2. Sous ce formalisme, le suivi d'un marquage i est un vecteur extrait du pavé $[1, 2000]^T$ dont chaque composante $RL_j(i)$ est le niveau de rétro-réflexion de i observé à la campagne $1 \leq j \leq T$.

$$\mathcal{I} = \left\{ (RL_1(i), \dots, RL_T(i)) \in [1, 2000]^T / i = 1, \dots, n \right\} \quad (3.12)$$

La CAH peut identifier les plus proches vecteurs de \mathcal{I} par rapport à la distance de Ward (3.1). Les marquages regroupés dans un cluster suivent un mode de dégradation de la rétro-réflexion similaire dans le temps. Chaque cluster peut être interprété comme une zone stratégique du réseau routier à entretenir. Le critère d'arrêt sélectionné est la double-coupe du dendrogramme dont le principe est illustré par la figure 3.5.

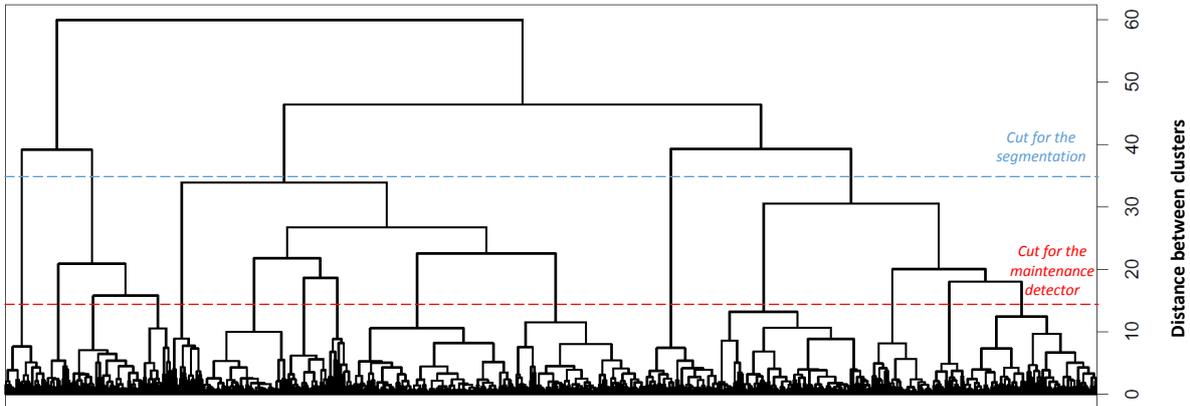


FIGURE 3.5 – Principe de la double-coupe du dendrogramme

La première coupe (illustrée en bleu sur la Fig 3.5) définit les zones stratégiques de maintenance. Les clusters sont construits en isolant en priorité les marquages ayant connu une augmentation de la rétro-réflexion à un instant donné. Ces événements correspondent aux remplacements. Compte tenu de la littérature, cette observation n'est pas surprenante : le niveau de rétro-réflexion initial est généralement très élevée puis décroît rapidement. Ainsi, pour une zone donnée, plusieurs remplacements ponctuels peuvent apparaître (avec un décalage temporel) tout en suivant un même modèle de dégradation. La coupe du dendrogramme est finalement réalisée dès que la distance entre les clusters est assez grande. Une optimisation a posteriori peut être décidée afin de mieux tenir compte de l'aspect géographique ou/et économique.

Lorsque l'historique de maintenance n'est pas disponible, il doit être estimé. En effet, cette information est capitale pour définir proprement des plans de maintenances. Une estimation par zone est raisonnable à ce stade. Le détecteur d'actions de maintenance présenté à la section 3.2.3 est essentiellement basé sur l'augmentation médiane entre deux inspections. Cependant, une zone donnée peut présenter des cas de remplacements opportunistes ou des actions particulièrement localisées. Dans les deux cas, la CAH est très sensible à ces deux situations et regroupe rapidement les marquages concernés. Une seconde coupe du dendrogramme (illustrée en rouge sur la Fig 3.5) est donc considérée afin de faciliter la détection des actions locales et d'optimiser la détection.

3.2.3 Estimation de l'historique de maintenance

L'estimation de l'historique de maintenance est basée sur trois observations : le niveau de rétro-réflexion d'un marquage est décroissant dans le temps, le remplacement d'un marquage provoque une forte augmentation de la rétro-réflexion, la CAH regroupe les marquages en isolant les fortes augmentations. L'analyse par cluster du différentiel entre

inspection du niveau de rétro-réflexion est adaptée afin de retrouver les remplacements. La norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) impose un minimum de $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ pour un marquage à neuf et est utilisée comme seuil de détection dans cette thèse.

Pour un cluster C_j , quatre actions de maintenances sont identifiées :

1. Une maintenance complète (FM) consiste à remplacer la totalité des marquages.
2. Une maintenance partielle (PM) consiste à remplacer une partie des marquages.
3. Une maintenance ponctuelle (pM) consiste à remplacer quelques marquages.
4. Aucune maintenance (\emptyset) correspond à l'absence d'action de maintenance.

Soit $A = \{FM, PM, pM, \emptyset\}$ l'ensemble des actions de maintenances possibles. L'action réalisée sur le marquage i détectée à l'inspection t est notée $A_t(i)$. Pour l'ensemble des inspections et des clusters, le nombre de marquages est comptabilisé. Les figures 3.6 et 3.7 présentent les deux étapes du détecteur de maintenance : par marquage et par cluster.

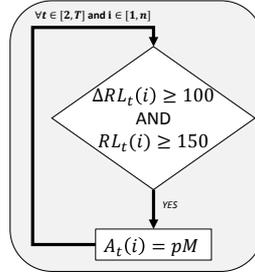


FIGURE 3.6 – Détection de maintenance par marquage

Soit un marquage i à l'inspection t . La figure 3.6 présente la détection de maintenance par marquage entre les inspections données t et $t - 1$. Si $\Delta RL_t(i) > 100$ et $RL_t(i) > 150$ alors le marquage i a bénéficié d'une maintenance ponctuelle et $A_t(i) = pM$. L'augmentation de $100 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ est choisie empiriquement et permet d'anticiper l'écart temporel séparant l'action de maintenance et la campagne d'inspection. Cette approche binaire ne permet pas de conclure si un cluster C_j a bénéficié d'une remise à neuf ou si quelques marquages choisis sont remplacés.

Soit un cluster C_j à l'inspection t . La figure 3.7 présente la détection de maintenance par cluster entre les inspections données t et $t - 1$ divisée en cinq opérations. L'une d'entre elles est basée sur le premier quartile du niveau de rétro-réflexion entre t et $t - 1$ (3.13) et le premier quartile du niveau de rétro-réflexion à t (3.14) sur C_j .

$$q_1[\Delta RL_t^{C_j}] = \Delta RL_t\left(\frac{\#C_j}{4}\right) \quad (3.13)$$

$$q_1[RL_t^{C_j}] = RL_t\left(\frac{\#C_j}{4}\right). \quad (3.14)$$

Soit $\Delta RL_t^{C_j}$ le niveau de rétro-réflexion médian de C_j entre t et $t - 1$ (3.6).

1. Si $\Delta RL_t^{C_j} \geq 150$, alors le cluster est maintenu complètement : $\forall i \in C_j, A_t(i) = FM$. Cette étape vérifie si tous les marquages ont été remplacés.

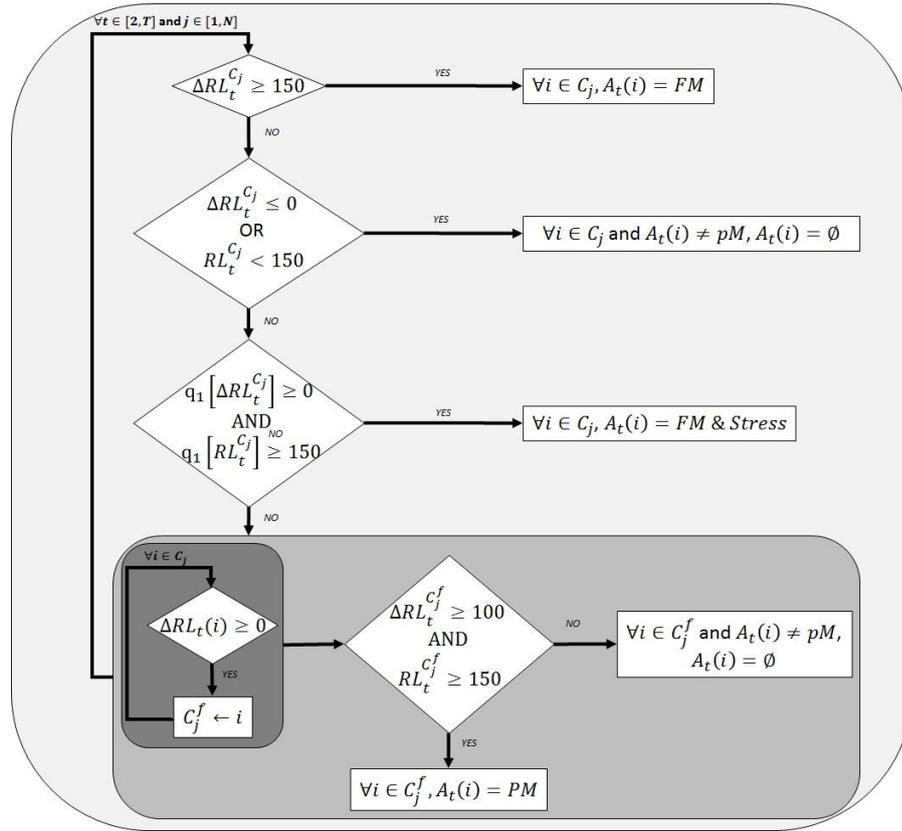


FIGURE 3.7 – Détection de maintenance par zone stratégique

2. Sinon, si $\Delta RL_t^{C_j} < 0$ ou $RL_t^{C_j} < 150$ alors le cluster n'a pas été entretenu : $\forall i \in C_j$ et $A_t(i) \neq pM$, $A_t(i) = \emptyset$. Cette étape vérifie si les objectifs d'une campagne de maintenance sont atteints : une plus grande rétro-réflexion et le respect de la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b).
3. Sinon, si $q_1[\Delta RL_t^{C_j}] > 0$ et $q_1[RL_t^{C_j}] > 150$ alors le cluster est maintenu complètement mais les marquages ont subi un phénomène de stress. Par définition du premier quartile, 75% des marquages de C_j ont connu une augmentation de la rétro-réflexion et respectent la norme NF EN 1436. En prenant compte les deux dernières opérations, ce gain est compris entre 0 et $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$.
4. Sinon, C_j est restreint aux marquages vérifiant $\Delta RL_t(i) \geq 0$ c.à.d. aux marquages ayant connu un gain de rétro-réflexion.
5. Sur ce cluster filtré C_j^f , si $\Delta RL_t^{C_j^f} > 100$ et $RL_t^{C_j^f} > 150$ alors C_j^f est maintenu partiellement : $\forall i \in C_j^f$, $A_t(i) = PM$.

L'estimation réalisée, l'historique est directement agrégé avec les zones stratégiques identifiées en amont (section précédente). Finalement, sur un réseau routier donné, il est possible de définir des zones où les marquages suivent un mode de dégradation similaire. Et à partir de sous-zones, il est possible d'estimer l'historique de maintenance.

3.3 Étude de cas : la Route Nationale 4

Chaque route est décrite par une ligne de $n > 0$ marquages inspectée par un rétro-réfectomètre dynamique en fonction d'un planning. L'analyse des données de rétro-réflexion de la ligne est réalisée en cinq temps : reconstruction du suivi de rétro-réflexion, analyse ponctuelle de la dégradation, classification du suivi, estimation de l'historique de maintenance et segmentation de la ligne.

3.3.1 Reconstruction des données manquantes

TABLE 3.3 – Suivi de reconstruction de la ligne axiale de la RN4

Yearly inspection	Number of clusters used	Number of missing data	Frequency against the NR4	Number of absurd estimator
2007	391	5	1%	0
2008	287	10	1%	0
2009	950	2	0.1%	0
2010	7	61	6%	0
2012	895	2	0.1%	0
2013	922	5	1%	0
2014	966	2	0.1%	0
2016	903	3	0.1%	0

La ligne axiale de la RN4 est restreinte aux marquages inspectés au moins 8 fois (i.e. au plus une inspection manquante), 970 marquages sont considérés ($\sim 95\%$ de la RN4). La table 3.3 présente le processus de reconstruction. En moyenne, 11 marquages ne sont pas inspectés ($\sim 1\%$ de la route) et l'algorithme base son action sur 665 clusters en moyenne. Le nombre d'estimateur aberrant est nul. Les inspections de 2011 et 2015 sont complètes.

Le nombre de cluster semble déterminé par la répartition des données manquantes. Par exemple, 2007 et 2013 enregistrent le même nombre de données manquantes mais le processus de reconstruction est respectivement basé sur 391 et 922 clusters. En 2007, l'ensemble des marquages non inspectés est localisé autour du PR 11 tandis que les marquages non inspectés en 2013 sont éparpillés aux PR 21, 33, 44, 72 et 101. L'inspection de 2010 appuie cette observation : les six premiers PR ne sont pas inspectés (57/61 des données manquantes). Le processus de reconstruction a produit un cluster regroupant cette zone.

La figure 3.8 présente le suivi de la rétro-réflexion des marquages composant la ligne axiale entre 2007 et 2016. Plusieurs observations sont réalisables à ce stade : une campagne de maintenance fut réalisée en mars 2008 ($800-1100 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$), un groupe de marquages est restauré en 2011 ($600-700 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$) et un remplacement ponctuel est observé en 2015 ($1000 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$). Des groupes de marquages admettant une très faible rétro-réflexion ($< 150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$) sont observés chaque année. Le suivi est à présent analysé par la CAH.

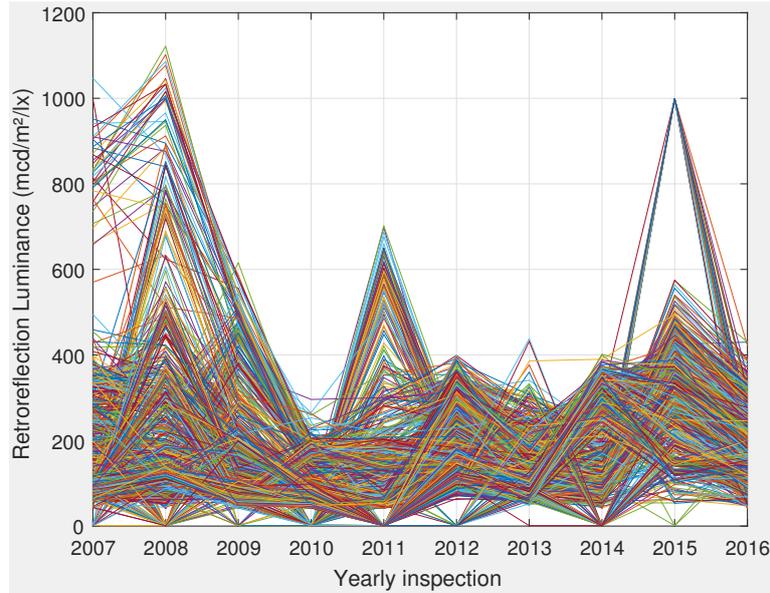


FIGURE 3.8 – Suivi reconstruit de la rétro-réflexion de la ligne axiale de la RN4 entre 2007 et 2016

3.3.2 Analyse ponctuelle de la dégradation

Le suivi de la rétro-réflexion reconstruit, chaque inspection peut être analysée individuellement. L’analyse ponctuelle de la dégradation permet d’établir un premier diagnostic ou d’analyser l’impact d’un remplacement sur la rétro-réflexion globale. Par exemple, la figure 3.9 présente les inspections de Septembre 2011 (Fig 3.9.a) et 2012 (Fig 3.9.b). Chaque point de mesure est localisé par un Point de Repère (PR) raccordé aux bornes kilométriques. La rétro-réflexion associée est classée selon les cinq seuils de dégradation retenus à la section 3.2.1.

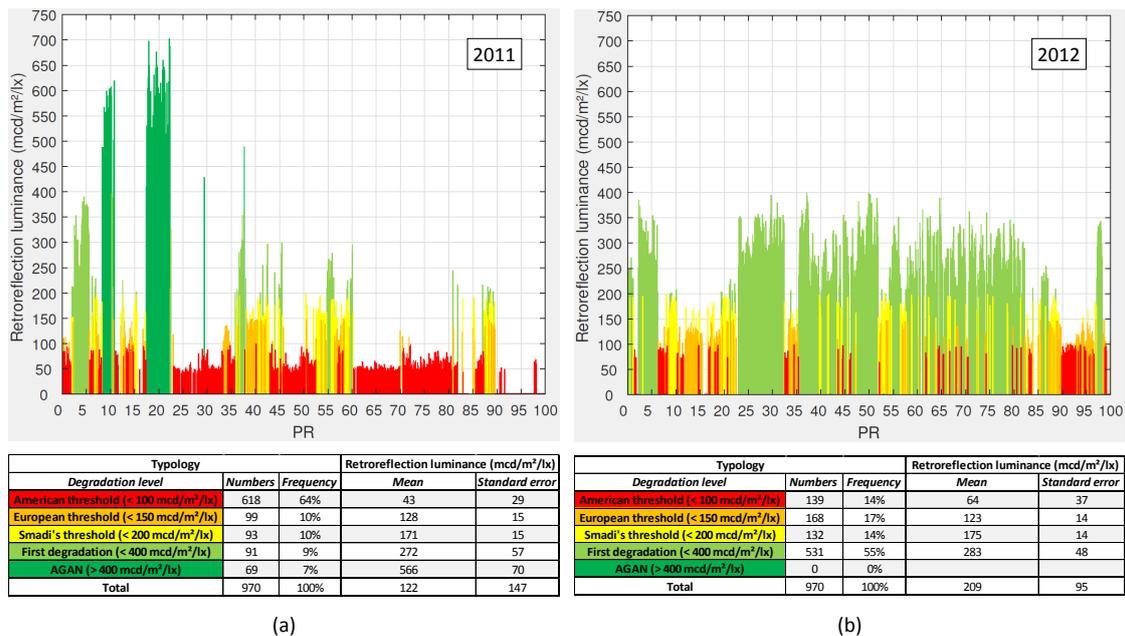


FIGURE 3.9 – Comparaison des inspections de la ligne axiale de la RN4 : (a) Septembre 2011 et (b) 2012

L'inspection de 2011 présente une très forte proportion de marquages dont la rétro-réflexion est inférieure à $100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ (64%). La répartition de ces marquages est homogène sur la RN4 (0-2.5, 12.5-17.5, 22.5-35, 42.5-52.5, 60-87.5 et 90-100 km). Trois zones admettent une rétro-réflexion supérieures à $200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ (2.5-5, 7.5-10 et 17.5-22.5 km). Les deux dernières sont même classées comme AGAN. Les dernières zones disposent d'une rétro-réflexion volatile.

L'inspection de 2012 présente une diminution de 77% de marquages dont la rétro-réflexion est inférieure à $100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ et une augmentation de 480% de marquages dont la rétro-réflexion est supérieure à $200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. La rétro-réflexion globale moyenne est passée de 122 à $209 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ respectant ainsi les recommandations de (SMADI et al. 2008). La rétro-réflexion étant décroissante dans le temps, seule une campagne de maintenance explique l'augmentation globale moyenne de la rétro-réflexion.

Cette analyse montre qu'une inspection permet de dresser un bilan du niveau de rétro-réflexion d'une ligne de marquages. Les zones fortement dégradées sont identifiées comme des opportunités de maintenance. L'évolution entre les inspections consécutives de 2011 et 2012 montre qu'une campagne de maintenance est observable sous la forme d'une importante augmentation de la rétro-réflexion. Ce fait justifie pleinement un estimateur d'historique de maintenance basé sur la variation de la rétro-réflexion.

3.3.3 Segmentation de la RN4

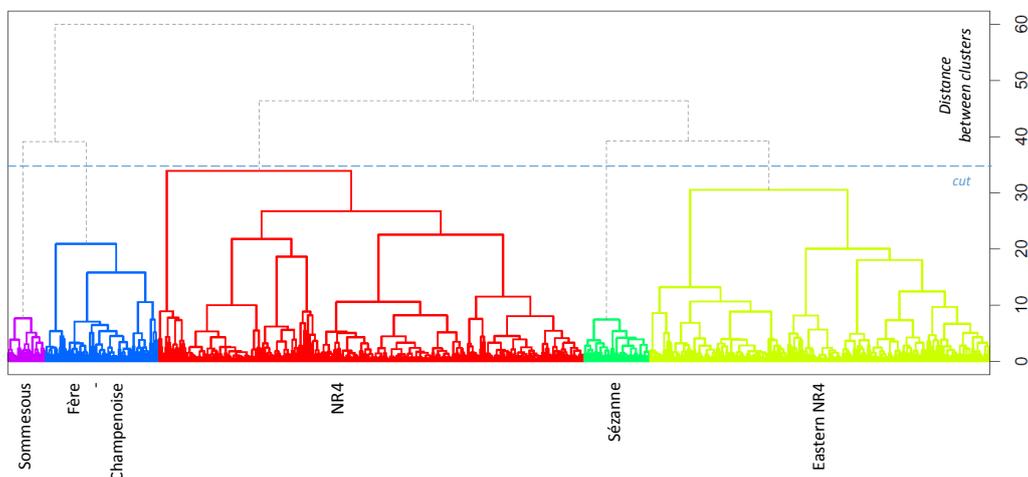


FIGURE 3.10 – Dendrogramme associé à la segmentation en cinq clusters de la RN4

Le dendrogramme associé à la classification du suivi de la ligne axiale est présenté par la figure 3.10. Une coupe à 5 clusters est retenue. Ils sont nommés ainsi : "la RN4", "l'Est de la RN4", "Sézanne", "Fère-Champenoise" et "Sommesous".

Au moins deux alternatives sont possibles. Une coupe à 3 regroupe d'une part les villes de Sommesous et Fère-Champenoise et d'autre part la ville de Sézanne à l'Est de la RN4. Cependant, le cluster de Sézanne est particulièrement bien localisé et la distance avec l'Est de la RN4 (indiquée par le dendrogramme) est très importante. Ce même argument justifie la séparation de Sommesous et Fère-Champenoise. Une autre alternative est une coupe

à 6 clusters qui isolerait un petit cluster réparti tout au long de la RN4. Il correspond à l'augmentation de $1000 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ identifiée en 2015 sur la figure 3.8. La segmentation en cinq zones réalise finalement un compromis entre les différentes observations.

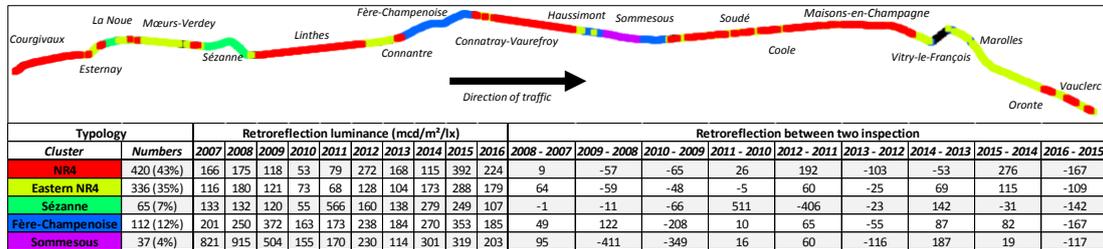


FIGURE 3.11 – Profil moyen et localisation des cinq zones stratégiques de la ligne axiale

La figure 3.11 localise les clusters sur la RN4 et présente les profils moyens. Le contournement de Fère-Champenoise et l'échangeur de Sommesous sont isolés. Le contournement de Sézanne est complété par la ville de La Noue. La carte est cohérente avec le dendrogramme : le Cluster 1 (rouge) est réparti le long de la RN4 par morceaux moyens de 5.4 km, le Cluster 2 (jaune) est principalement localisé à l'Est de la RN4 et les villes de Sézanne, Fère-Champenoise et Sommesous forment trois clusters isolés.

La segmentation n'est pas parfaite. Les rues de Vitry-le-François sont exclues par le processus de reconstruction de données. Les deux premiers clusters concentrent à eux seuls 78% de la RN4. Les "frontières" entre deux clusters sont mal classées. Par exemple, les villes de Connantre (classée dans le cluster 2) et de Fère-Champenoise (cluster 3) sont séparées d'une zone de moins d'un kilomètre rangé dans le cluster 1. Les villes de Soudé et Maison-en-Champagne sont reliées par le cluster 1. Néanmoins, des sous-zones de moins d'un kilomètre sont classées dans le cluster 2. Ces zones correspondent à des traversés de la RN4 dans des agglomérations comme Coole.

Les profils moyens complètent les observations réalisées sur la figure 3.12 : l'Est de la RN4 enregistre globalement la plus faible rétro-réflexion ($143 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ en moyenne), une forte augmentation est observée en 2011 à Sézanne ($+ 511 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$), Fère-Champenoise et Sommesous ont une rétro-réflexion équivalente à partir de 2010 ($24 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ de différence en moyenne).

La figure 3.12 représente le suivi par cluster. Chaque cluster présente son propre suivi. Par exemple, Sommesous dispose de la rétro-réflexion la plus élevée tandis que le cluster 2 est régulièrement sous le seuil des $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$. Les principaux pics de rétro-réflexion sont identifiés à Sézanne (2011), Fère-Champenoise et Sommesous (2008). Les cluster 1 et 2 présentent de nombreux pics ponctuels : respectivement en 2015 et 2008 par exemple. Ces deux clusters justifient l'extraction de sous-clusters pour retrouver au mieux les instants de remplacements.

3.3.4 Estimation de l'historique de maintenance

Pour la recherche d'actions de remplacement, une coupe du dendrogramme à 15 sous-clusters est retenue (Fig 3.13). En comparant avec le précédent dendrogramme (Fig 3.10) :

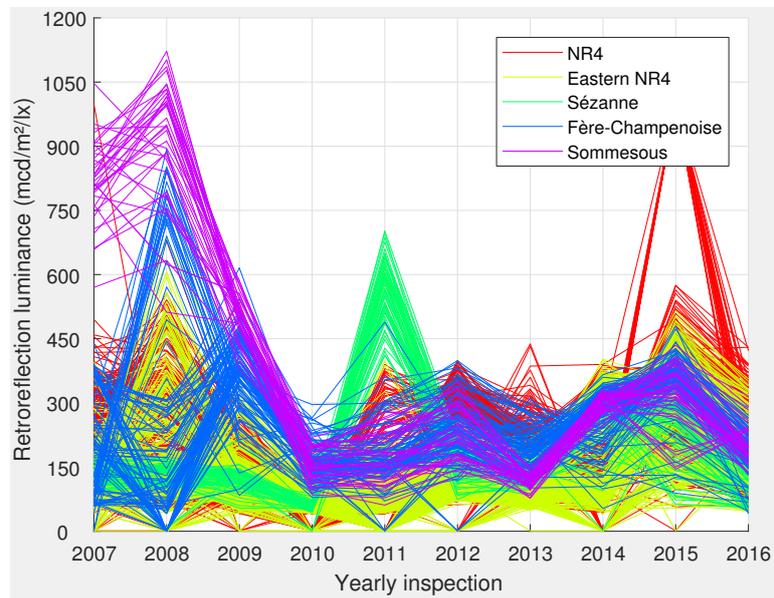


FIGURE 3.12 – Suivi de la RN4 segmenté en cinq clusters

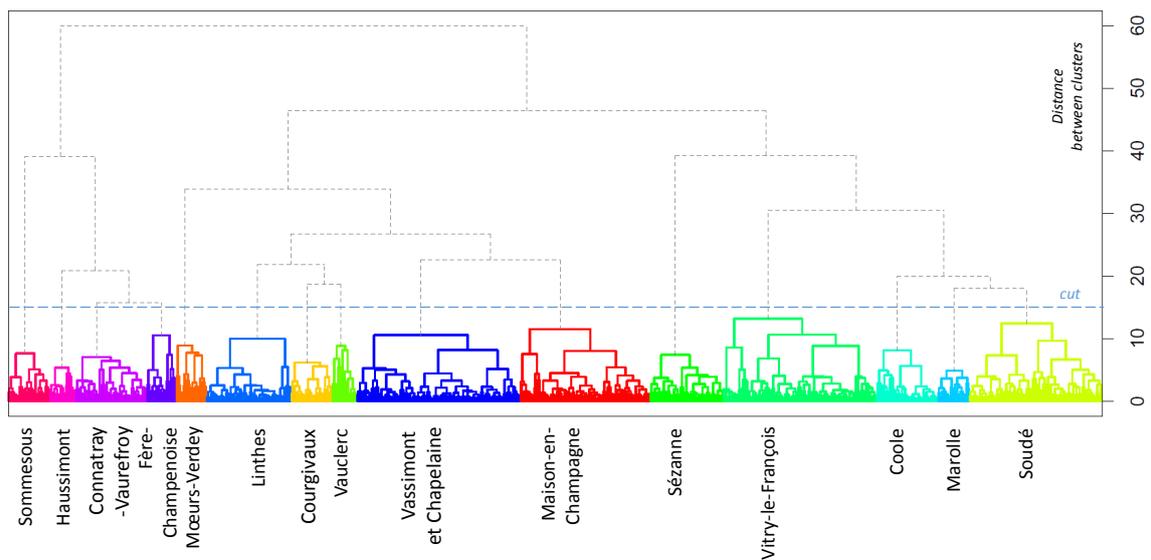


FIGURE 3.13 – Dendrogramme retenu pour l'estimation de l'historique de maintenance de la RN4

Sommesous et Sézanne forment leurs propres sous-clusters ; Fère-Champenoise est constituée de lui-même, Connantray-Vaufrey et Haussimont ; l'Est de la RN4 est constitué de Coole, Vitry-le-François, Soudé et Marolles ; la RN4 est formé par Maison-en-Champagne, Moeurs-Verdey, Courgivaux, Linthes, Vaussimont et Chapelaine puis Vauclerc.

Ce choix de coupe est orienté par l'étude simultanée des 15 suivis de rétro-réflexion illustrée par la figure 3.14. La majorité des sous-clusters présente au moins un remplacement complet évident : Sézanne en 2011, Vaussimont et Chapelaine en 2012 et 2015 ou encore Haussimont en 2008. Le regroupement par remplacement peut engendrer des suivis en partie chaotiques : Soudé est construit autour de remplacements évidents en 2013 et 2015 mais le suivi entre 2007 et 2011 est peu lisse. Enfin, Vauclerc et Fère-Champenoise sont chaotiques et se distinguent par une accumulation de remplacements ponctuels évidente (attribuée à un effet de sur-classement).

La figure 3.15 présente dans le détail l'historique de maintenance estimé par sous-cluster. Sur toute la longueur de la RN4, 25% des marquages en moyenne sont remplacés chaque année. D'importantes campagnes de maintenance sont observées en 2012 et 2015 tandis que 2010, 2013 et 2016 ont les plus faibles niveaux de remplacement (0 et 3%). Un résumé prenant en compte la segmentation en cinq clusters est proposé ci-dessous :

1. Maison-en-Champagne, Moeurs-Verdey, Courgivaux, Linthes, Vaussimont et Chapelaine puis Vauclerc sont complètement remplacées en 2015. Un second remplacement complet est observé à Maison-en-Champagne, Linthes et Vaussimont et Chapelaine en 2012, Courgivaux en 2011 et Vauclerc en 2013. Moeurs-Verdey est partiellement remplacée (56%) en 2008 et s'appuie sur des remplacements ponctuels.
2. Coole, Soudé et Marolles partagent un remplacement complet en 2015. Vitry-le-François s'appuie sur des remplacements ponctuels et est complètement remplacée en 2014. Marolles est plusieurs fois remplacées complètement (2008, 2010, 2015).
3. Sézanne est complètement remplacée en 2011 et 2015.
4. Connantray-Vaufrey et Haussimont ont bénéficié de quatre remplacements complets dont trois communs en 2012, 2014 et 2015. Fère-Champenoise est remplacée trois fois (2008, 2012 et 2015) et privilégie les actions ponctuelles. Les actions de 2012, 2014 et 2015 sont toutes stressés.
5. Sommesous est complètement remplacée en 2008, 2012 et 2014. Le remplacement de 2008 correspond à une action de sur-maintenance (en moyenne : $821 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ en 2007).

Les clusters sont bien construits autour des principales actions de maintenances communes tandis que les sous-clusters sont construits en fonctions d'actions plus ciblées.

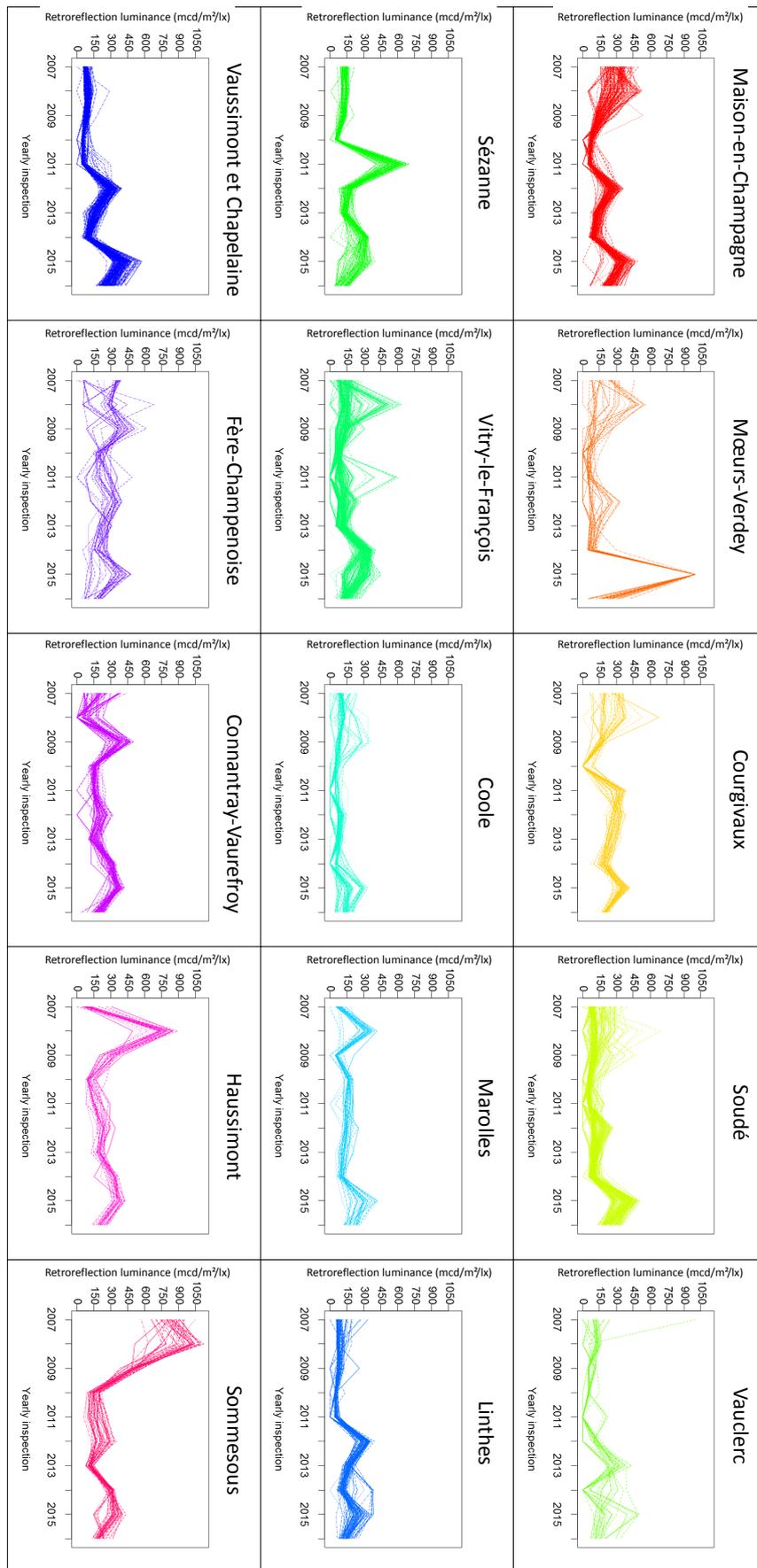


FIGURE 3.14 – Suivi simultané de la rétro-réflexion des 15 clusters retenus pour estimer l'historique de maintenance

Cluster	Remplacement	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Maison-en-Champagne	Complet					100%			100%	
	Stress									
	Partial									
	Punctual	13%	2%		3%			2%		1%
	Nothing	87%	98%	100%	97%		100%	98%		99%
Moers-Verdey	Complet								100%	
	Stress									
	Partial	56%								
	Punctual		4%			37%	4%	4%		
	Nothing	44%	96%	100%	100%	63%	96%	96%		100%
Courgivaux	Complet				100%				100%	
	Stress									
	Partial									
	Punctual	11%	6%			14%				
	Nothing	89%	94%	100%		86%	100%	100%		100%
Linthes	Complet					100%				
	Stress								100%	
	Partial									
	Punctual		1%					12%		
	Nothing	100%	99%	100%	100%		100%	88%		100%
Vaussimont et Chapelaine	Complet					100%			100%	
	Stress									
	Partial									
	Punctual	1%			3%					
	Nothing	99%	100%	100%	97%		100%	100%		100%
Vauclerc	Complet						100%		100%	
	Stress									
	Partial									
	Punctual				14%	5%		5%		
	Nothing	100%	100%	100%	86%	95%		95%		100%
Vitry-le-François	Complet							100%		
	Stress									
	Partial									
	Punctual	29%	7%		10%	15%			4%	1%
	Nothing	71%	93%	100%	90%	85%	100%		96%	99%
Soudé	Complet								100%	
	Stress									
	Partial									
	Punctual	6%	7%		6%	39%	1%	1%		
	Nothing	94%	93%	100%	94%	61%	99%	99%		100%
Coole	Complet								100%	
	Stress									
	Partial									
	Punctual	9%	11%		2%	2%		2%		2%
	Nothing	91%	89%	100%	98%	98%	100%	98%		98%
Marolle	Complet	100%							100%	
	Stress			100%						
	Partial									
	Punctual					7%				
	Nothing		100%		100%	93%	100%	100%		100%
Sézanne	Complet				100%			100%		
	Stress									
	Partial									
	Punctual								11%	
	Nothing	100%	100%	100%		100%	100%		89%	100%
Fère-Champenoise	Complet		100%							
	Stress					100%			100%	
	Partial									
	Punctual	12%		8%	23%		8%			
	Nothing	88%		92%	77%		92%	100%		100%
Connatray-Vaufroy	Complet		100%							
	Stress					100%		100%	100%	
	Partial									
	Punctual						5%			
	Nothing	100%		100%	100%		95%			100%
Haussimont	Complet	100%								
	Stress					100%		100%	100%	
	Partial									
	Punctual				13%					
	Nothing		100%	100%	87%		100%			100%
Sommesous	Complet							100%		
	Stress	100%				100%				
	Partial									
	Punctual								11%	
	Nothing		100%	100%	100%		100%		89%	100%
Global remplacement		18%	12%	3%	15%	59%	3%	35%	77%	0%

FIGURE 3.15 – Historique de maintenance estimé et détaillé de la ligne axiale de la RN4 (sur la période 2008 - 2016)

3.4 Synthèse et conclusions

Une analyse rapide par Google Maps et Open Street View montre que la RN4 entre Courgivaux et Vaclerc présente une infrastructure riche : tronçons en 2×1 et 2×2 voies, des contournements urbains, des zones urbaines, un échangeur autoroutier... Le premier objectif de cette thèse est de vérifier si ces différentes infrastructures impactent le suivi de la rétro-réflexion. En absence de données contextuelles plus précises, la ligne axiale de la RN4 n'est observable qu'au travers des inspections réalisées chaque année à l'automne par un Ecodyn.

Une approche exploratoire de l'analyse des données de rétro-réflexométrie est privilégiée afin de réduire le manque de contextualisation. La CAH est une méthode de classification répondant à cette volonté. Par exemple, les données quantitatives sont de même nature (rétro-réflexion). Le dendrogramme synthétise le processus de classification et discute le nombre de clusters optimal. Le suivi entre 2007 et 2016 est découpé en 5 clusters interprétés comme des zones (de maintenance) stratégiques. Chaque zone est caractérisée par des actions de maintenance et des modes de dégradations communes. En croisant avec Google Maps, les zones illustrent en partie la diversité de l'infrastructure routière : les contournements de Sézanne et Fère-Champenoise ainsi que l'échangeur de Sommesous sont identifiés. L'annexe A propose une première extension prenant en compte l'infrastructure elle-même. Une segmentation plus fine est proposée et ouvre la possibilité d'étendre ces travaux de thèse à l'ensemble des lignes de marquage et à l'entretien de la chaussée.

L'absence d'historique de maintenance empêche à ce stade une analyse de durée de vie d'où le besoin d'un historique estimé. Le dendrogramme retrouve des sous-zones stratégiques caractérisées par une action de maintenance ciblée sans pour autant impacter la dynamique de dégradation de la zone. L'analyse des variations entre deux inspections de chacune des sous-zones a permis d'estimer un historique de maintenance globale de la ligne axiale de la RN4. Contrôler la robustesse du détecteur de maintenance n'est malheureusement pas possible. Seule une étude spécifique basée sur une ligne de marquages régulièrement inspectée et appuyée par un historique de maintenance permettra de contrôler la robustesse de l'estimation. L'estimateur en lui-même sous-entend plusieurs hypothèses : le seuil minimal de restauration est à $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, la médiane est adaptée à la variation entre deux inspections. Cette expérience pourrait les mettre à l'épreuve. La démarche de l'Open Data permettant de contextualiser les données d'inspections, une alternative basée sur un réseau de neurones est à l'étude.

L'estimateur de données de rétro-réflexion manquantes basé sur la dégradation locale (définie automatiquement par la CAH) présente plusieurs avantages face à l'interpolation linéaire (proposée par (SATHYANARAYANAN et al. 2008)). Cette approche clustering respecte les dynamiques locales même en absence d'historique de maintenance : un marquage non inspecté proche d'une zone restaurée verra son niveau de rétro-réflexion augmenté et diminué sinon. Par ailleurs, la norme NF EN (AFNOR 2018b) est respectée : toute estimation est comprise entre 1 et $2000 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$. Plusieurs questions restent ouvertes.

Le choix de la CAH pour définir le voisinage des marquages est essentiellement motivé par la cohérence vis-à-vis de la segmentation de l'infrastructure routière et l'estimation de l'historique de maintenance. Dans la mesure où la CAH demande une analyse du nombre de clusters sans règle de décision particulière, une comparaison avec une méthode alternative comme K-means est raisonnable (SAPORTA 2006) (TUFFERY 2011). L'annexe B, et dans une moindre mesure la section 3.1.3, montre que l'approche clustering est peu fiable lorsque les données manquantes sont importantes. Une alternative envisagée est le recours à un réseau de neurones du même type que (KARWA et DONNELL 2011). Cependant, une telle approche est gourmande en données d'entraînements et de contextes est reste donc difficile à mettre en place.

L'historique de maintenance établi, des analyses de durées de vie des marquages peuvent être réalisées. Au regard de la littérature, la loi de Weibull est adaptée pour évaluer la fiabilité des marquages (SATHYANARAYANAN et al. 2008). Le cycle des marquages de la ligne axiale posés en Mars 2008 et remplacés en Mars 2012 se distingue par sa longueur (4 ans) et son effectif (92 points de mesures). En prenant $150 \text{ mcd/m}^2/lx$ comme seuil de dégradation maximal, le suivi de la rétro-réflexion indique que l'instant de défaillance est statistiquement censuré. Dans ces conditions, l'application directe de la méthode du maximum de vraisemblance est compromise. Une alternative basée sur un algorithme EM est privilégiée afin d'estimer les instants de défaillance et optimiser le maximum de vraisemblance dans le contexte des marquages routiers.

Analyse de Weibull de la signalisation horizontale

La notion de marquage défaillant n'est pas définie rigoureusement. Un marquage rétro-réfléchissant est ici défaillant dès l'instant où son niveau de rétro-réflexion est inférieur à un seuil minimal préalablement fixé. En guise d'illustration, le seuil de $L = 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ est choisi.

4.1 Durées de vie censurées, Maximum de Vraisemblance et algorithme EM

Le chapitre 2 montre que (SATHYANARAYANAN et al. 2008) sont les premiers, à notre connaissance, à considérer les marquages routiers avec une approche fiabiliste. L'article propose la méthode du Maximum de Vraisemblance (MV) à partir des durées de vie observées afin de paramétrer des lois de Weibull. Proposée par Fisher, la méthode MV est une méthode statistique classique visant à estimer les paramètres θ d'une loi de probabilité X en fonction d'un échantillon de données indépendantes complètes x_1, x_2, \dots, x_n . Les estimateurs de la méthode MV sont les valeurs θ maximisant la fonction de vraisemblance définie par $L(x_1, \dots, x_n, \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta)$. Pour rappel, la fonction de densité f d'une loi de probabilité prédit la probabilité d'observer $n > 0$ données qui suivent cette distribution. La fonction L étant elle-même une densité de probabilité, l'estimation de θ garantit que les événements x_1, x_2, \dots, x_n sont les plus probables. En général, θ est approché par la solution du système d'équations des dérivées partielles de $\ln L$ (TUFFERY 2011) (SAPORTA 2006).

Les travaux de cette thèse et de (SATHYANARAYANAN et al. 2008) s'inscrivent cependant dans le contexte d'une stratégie d'inspection discrète des marquages routiers. La première conséquence directe est que les instants de défaillances sont rarement observés. Cette information est (statistiquement) censurée. Toujours dans ce contexte, trois cas de censures sont observés : un marquage est censuré à gauche lorsqu'une défaillance est apparue avant la première inspection, par intervalle si elle apparaît entre deux inspections et à droite si le marquage est resté fiable tout au long de son cycle de vie. Une définition statistique plus globale est proposée, par exemple, dans (COCOZZA-THIVENT 1997). Pour prendre en compte la problématique des censures, le formalisme standard de la méthode MV doit être complexifié quitte à le compléter par une approche numérique. Par ailleurs, dans le cas particulier d'une distribution de Weibull, la méthode MV est optimisée par l'algorithme de Newton-Raphson (BAIN et ENGLEHARDT 2017). Dans le cadre d'une étude

de survie face au cancer du sein censurée par intervalle, (PRADHAN et al. 2014) ont montré que cette approche n'est pas garantie (Newton-Raphson pouvant diverger) et proposent un algorithme EM en guise d'alternative.

Initialement proposé par Dempster, Laird & Rubin (DEMPSTER et al. 1977), les algorithmes d'Espérance-Maximisée¹ (EM) se présentent comme une alternative la méthode MV ; en particulier lorsque les données sont incomplètes (càd manquantes, tronquées ou censurées en général). L'idée fondamentale d'une approche EM est de transformer des données imparfaites en durées de vie parfaites et analysables par la classique méthode MV. Pour cela, un algorithme EM propose un formalisme le plus proche possible de la méthode MV. Classiquement, il se présente comme une méthode itérative en deux étapes : d'Espérance dite E et de Maximisation dite M. L'étape E propose d'analyser les données incomplètes comme manquantes et les prédire par une loi de probabilité initiale. L'étape M peut être interprétée comme la méthode MV conditionnée par l'étape E et actualise la loi initiale. Ce processus est itéré jusqu'à la convergence d'une seule loi de probabilité et des estimations des données imparfaites. En général, les étapes E et M nécessitent deux études à part entière. Un état de l'art classique est proposé par (MCLACHLAN et KRISHNAN 2008).

Dans le contexte de durées de vie censurées, l'étape E interprète les instants de défaillances censurés comme des données manquantes à estimer et l'étape M correspond à la méthode MV (d'une loi de Weibull par exemple). Cette approche n'est pas nouvelle : (CHAUVEAU 1995) propose un premier algorithme EM pour la modélisation de modèle de mélange gaussien et plus récemment dans un contexte de durées de vie censurées à droite, (BORDES et CHAUVEAU 2016) proposent un algorithme EM stochastique pour la modélisation de modèle de mélange paramétrique ou semi-paramétrique gaussien. En se restreignant à la distribution de Weibull, en plus de l'algorithme de Pradhan & Kundu, (ELMAHDY 2015) propose un algorithme pour la modélisation d'un mélange de Weibull (mais basé exclusivement sur des dates de défaillances exactes) et (BALAKRISHNAN et MITRA 2012) en proposent un pour la loi de Weibull à valeurs extrêmes censurées à gauche ou à droite. Plusieurs algorithmes adaptés aux lois de Weibull généralisées sont disponibles : (BAGHERI et al. 2016) ou encore (KUNDU et KUMAR DREY 2009) pour la loi de Marshall-Olkin.

Indépendamment du choix entre la méthode MV ou l'algorithme EM, il reste à vérifier l'adéquation des lois proposées aux données. Classiquement, cette vérification est faite par des outils élémentaires comme le "papier Weibull". Les tests d'adéquation regroupent des techniques plus sophistiquées qui ont pour objectif de vérifier si le modèle de Weibull est adapté aux durées de vie observées. Ce point est délicat lorsque les durées de vie sont censurées : la méthode MV ne renseigne pas la censure et l'algorithme EM est entièrement basé sur l'estimation des censures. À l'exception de (ELMAHDY 2015), les algorithmes EM cités précédemment ne proposent pas de tests adaptés à la censure. Un état de l'art récent des tests d'adéquation est proposé par (KRIT et al. 2014). La section 4.3 propose une étude comparative des tests proposés afin d'établir le test le plus adapté à la censure.

1. Parfois appelés algorithmes de Dempster-Laird-Rubin (DLR)

La section 4.2 propose une généralisation aux censures à gauche et à droite de l'algorithme de Pradhan & Kundu aux marquages routiers en guise d'alternative à la méthode préconisée par (SATHYANARAYANAN et al. 2008). L'annexe A propose une comparaison entre l'algorithme EM et la méthode MV ainsi qu'une discussion autour de l'étape M proposée par Pradhan & Kundu.

4.2 Analyse de Weibull au moyen d'un algorithme EM

L'algorithme EM développé dans cette thèse est appelé algorithme WEM. Il a fait l'objet d'une communication en conférence (REDONDIN et al. 2018a).

4.2.1 Gestion de durées de vie multicensurées

Cette thèse suit par défaut le formalisme proposé par (COCOZZA-THIVENT 1997). Une durée de vie W suit une loi de Weibull $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$ si sa fonction de densité de probabilité est de la forme (4.1).

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} & \text{si } t > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.1)$$

Les paramètres $\alpha > 0$ et $\beta > 0$ sont respectivement appelés les paramètres d'échelle et de forme. α s'exprime dans la même unité que W (heures, jours, mois...) et est lié à la durée de vie médiane du système. β est sans dimension, influe sur la dissymétrie de la densité de probabilité et est lié au vieillissement du système (SAPORTA 2006).

- Si $\beta < 1$, alors le niveau de fonctionnement du système s'améliore (par le rodage d'un moteur ou le chauffage d'un lubrifiant par exemple).
- Si $\beta = 1$, alors le système ne subit ni usure et ni fatigue (et correspond à une loi exponentielle de paramètre α).
- Si $\beta > 1$, alors le système subit une fatigue ou/et de l'usure. Trois situations sont listées :
 - 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.

Pour simplifier le formalisme EM, (PRADHAN et al. 2014) proposent le changement de variable standard $\alpha \leftarrow 1/\alpha^\beta$. La fonction de densité d'une loi de Weibull $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$ devient :

$$f(t) = \begin{cases} \alpha \beta t^{\beta-1} e^{-\alpha t^\beta} & \text{si } t > 0 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.2)$$

Sous ce formalisme, la fonction de fiabilité $R(t)$ associée à $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$ est donnée par (4.3). Pour rappel, la fonction de fiabilité est la probabilité que l'instant de défaillance est supérieur à un instant $t > 0$ donné. La fonction de répartition est donnée par $F(t) = 1 - R(t)$.

$$R(t) = e^{-\alpha t^\beta} \quad (4.3)$$

Soit une ligne de marquages composée de $n > 0$ marquage et $W = (t_1, \dots, t_n)$ leurs durées de vie supposées indépendamment et identiquement distribuées (i.d.d). En général, le vecteur W présente des instants de défaillances exacts i.e. $\forall i, t_i$ est l'instant exact où le marquage est insuffisamment rétro-réfléchissant. Les marquages routiers étant inspectés suivant un plan d'inspection, W présente en réalité le premier instant de défaillance observé de chaque marquage. Les instants exacts sont dits censurés. Trois cas de censures sont identifiés :

- Si la défaillance est observée à la première inspection, alors le marquage est censuré à gauche.
- Si la défaillance a eu lieu entre deux inspections, alors le marquage est censuré par intervalle.
- Si la défaillance n'a jamais été observée au cours de son cycle de maintenance, alors le marquage est censuré à droite.

Un indicateur de censure est associé à W afin d'identifier clairement chaque censure :

$$\forall i = 1, \dots, n \quad \delta_i = \begin{cases} 0 & \text{si } t_i \text{ est exacte} \\ 1 & \text{si } t_i \text{ est censuré à gauche} \\ 2 & \text{si } t_i \text{ est censuré par intervalle} \\ 3 & \text{si } t_i \text{ est censuré à droite} \end{cases} \quad (4.4)$$

Si t_i est censuré par intervalle, alors son intervalle de censure associé est $[l_i, r_i]$. En général, $r_i = t_i$ mais l_i est clairement définie en fonction du plan d'inspection. À partir de maintenant, W est subdivisé en fonction de l'indicateur de censure.

$$\mathcal{T} = \left\{ t \in ((t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)) \mid \delta_i = 0 \right\} \quad (4.5)$$

$$\mathcal{X} = \left\{ x \in ((t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)) \mid \delta_i = 1 \right\} \quad (4.6)$$

$$\mathcal{Y} = \left\{ y \in ((t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)) \mid \delta_i = 2 \right\} \quad (4.7)$$

$$\mathcal{Z} = \left\{ z \in ((t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)) \mid \delta_i = 3 \right\} \quad (4.8)$$

Dans le cas d'une loi de Weibull non censurée, la méthode MV consiste à estimer le couple (α, β) par le maximum de la fonction de vraisemblance (4.9). Ce couple est généralement approché par les zéros des dérivées partielles en α et β de la fonction log-vraisemblance (SAPORTA 2006). Dans le cas particulier d'une distribution de Weibull, cela revient à résoudre un système d'équations non linéaires, généralement résolu par la méthode de Newton-Raphson (BAIN et ENGLEHARDT 2017).

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n f(t_i) \quad (4.9)$$

Afin de prendre en compte l'ensemble des censures, la fonction de vraisemblance associée à une loi de Weibull doit être complexifiée (4.10) : la fonction de répartition F prend en compte la censure à gauche et la fonction de fiabilité R prend en compte les censures par intervalle et à droite.

$$\mathcal{L}(\alpha, \beta) = \prod_{t \in \mathcal{T}} f(t) \prod_{x \in \mathcal{X}} F(x) \prod_{y \in \mathcal{Y}} R(l_i) - R(r_i) \prod_{z \in \mathcal{Z}} R(z) \quad (4.10)$$

Dans le cas des marquages routiers, (SATHYANARAYANAN et al. 2008) proposent de calculer le MV sans clairement préciser le recours à une méthode numérique comme Newton-Raphson. Dans le cadre d'une étude de survie au cancer du sein censurée par intervalle uniquement, (PRADHAN et al. 2014) ont montré des exemples où Newton-Raphson diverge. À la suite de ces observations, ils ont alors proposé une approche alternative basée sur un algorithme EM.

L'algorithme \mathcal{WEM} interprète les données censurées comme des données manquantes à estimer et est itératif en deux temps :

1. La phase d'Espérance estime les données censurées en fonction d'une loi de Weibull donnée $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$.
2. La phase de Maximisation paramètre une loi de Weibull $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$ par la méthode du MV en fonction des défaillances exactes et estimées.

L'algorithme est itéré jusqu'à la convergence d'une unique loi de Weibull. Ce point est détaillé plus en avant. Dans un premier temps, les phases d'espérance et de maximisation sont présentées dans le détail au travers d'une itération donnée.

4.2.2 Itération et convergence de l'algorithme \mathcal{WEM}

La loi initiale $\mathcal{W}(\alpha_0, \beta_0)$ est arbitraire sous le formalisme proposé par (MCLACHLAN et KRISHNAN 2008). Dans cette thèse, la loi initiale est donnée par le MV où la problématique des censures est totalement ignorée. Par ce choix, l'algorithme \mathcal{WEM} peut être vu comme une optimisation de la méthode MV d'une distribution de Weibull censurée.

Étape d'Espérance

L'objectif de l'étape E est de construire la fonction de vraisemblance complétée (4.11) définie comme l'espérance de la fonction de vraisemblance (4.9) conditionnée par les défaillances exactes.

$$L_c(\alpha_k, \beta_k) = E[L(\alpha_k, \beta_k) | \mathcal{T}] \quad (4.11)$$

Cette espérance conditionnelle produit trois estimateurs adaptés à chaque censure : (4.12) et (4.14) estiment respectivement les données censurées à gauche et à droite, (4.13) est l'estimateur des censures par intervalle proposé par (PRADHAN et al. 2014).

$$\forall x \in \mathcal{X}, \hat{x}_k = E[W|W < x] = \frac{\alpha_{k-1}\beta_{k-1} \int_0^x t^{\beta_{k-1}} e^{-\alpha_{k-1}t^{\beta_{k-1}}} dt}{1 - e^{-\alpha_{k-1}x^{\beta_{k-1}}}} \quad (4.12)$$

$$\forall y \in \mathcal{Y}, \hat{y}_k = E[W|l < W < r] = \frac{\alpha_{k-1}\beta_{k-1} \int_l^r t^{\beta_{k-1}} e^{-\alpha_{k-1}t^{\beta_{k-1}}} dt}{e^{-\alpha_{k-1}l^{\beta_{k-1}}} - e^{-\alpha_{k-1}r^{\beta_{k-1}}}} \quad (4.13)$$

$$\forall z \in \mathcal{Z}, \hat{z}_k = E[W|W > z] = \frac{\alpha_{k-1}\beta_{k-1} \int_z^{+\infty} t^{\beta_{k-1}} e^{-\alpha_{k-1}t^{\beta_{k-1}}} dt}{e^{-\alpha_{k-1}z^{\beta_{k-1}}}} \quad (4.14)$$

Les estimateurs étant eux-mêmes dépendants de la fonction gamma, ils sont bien définis et parfaitement implémentables sous Matlab (par exemple). Finalement, la fonction de vraisemblance complétée associée à une loi de Weibull censurée est définie par (4.15).

$$L_c(\alpha_k, \beta_k) = \prod_{t \in \mathcal{T}} f(t) \prod_{x \in \mathcal{X}} f(\hat{x}_k) \prod_{y \in \mathcal{Y}} f(\hat{y}_k) \prod_{z \in \mathcal{Z}} f(\hat{z}_k) \quad (4.15)$$

Étape de Maximisation

Par abus de notation, le formalisme est simplifié comme suit : $\hat{x} = \hat{x}_k$, $\hat{y} = \hat{y}_k$ et $\hat{z} = \hat{z}_k$. L'étape M correspond à la méthode MV d'une loi de Weibull multi-censurée. Les paramètres de la loi (α_k, β_k) sont estimés par les zéros des dérivées partielles de la fonction de log-vraisemblance complétée. Cette dernière est définie par :

$$\begin{aligned} \ln L_c(\alpha_k, \beta_k) = & n(\ln \alpha_k + \ln \beta_k) + (\beta_k - 1) \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} \ln \hat{t} + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z} \right] \\ & - \alpha_k \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} \hat{t}^{\beta_k} + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \right] \end{aligned} \quad (4.16)$$

Les deux dérivées partielles en α_k et β_k sont respectivement :

$$\frac{\partial \ln L_c}{\partial \alpha_k} = \frac{n}{\alpha_k} - \sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} - \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} - \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} - \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln L_c}{\partial \beta_k} = & \frac{n}{\beta_k} + \sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z} \\ & - \alpha_k \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \ln \hat{z} \right] \end{aligned} \quad (4.18)$$

Le système d'équations $\left\{ \frac{\partial \ln L_c}{\partial \alpha_k} = 0 ; \frac{\partial \ln L_c}{\partial \beta_k} = 0 \right\}$ est non linéaire et n'admet pas de

solution triviale. Restreint à des données censurées uniquement par intervalle, (PRADHAN et al. 2014) proposent une approche numérique basée sur la méthode du point fixe. Ce choix est motivé par la construction d'un estimateur de α_k déduit directement de l'équation $\frac{\partial \ln L_c}{\partial \alpha_k} = 0$. Étendu aux censures à gauche et à droite, cet estimateur est défini par :

$$\alpha_k = \frac{n}{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k}} \quad (4.19)$$

L'estimateur (4.19) est complètement dépendant de β_k . Par conséquent, un estimateur optimal de β_k est suffisant. Si α_k est remplacé par (4.19) dans (4.18), alors une fonction $g(\beta_k)$ telle que $\frac{\partial \ln L_c}{\partial \beta_k} = g(\beta_k) - \beta_k$ est extraite de l'équation $\frac{\partial \ln L_c}{\partial \beta_k} = 0$. En effet :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln L_c}{\partial \beta_k} &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{n}{\beta_k} + \sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z} - \alpha_k \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \ln \hat{z} \right] &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{n}{\beta_k} &= \alpha_k \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \ln \hat{z} \right] - \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z} \right] \\ \Leftrightarrow \frac{\beta_k}{n} &= \frac{1}{\alpha_k \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \ln \hat{z} \right] - \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z} \right]} \\ \Leftrightarrow \beta_k &= \frac{n}{\alpha_k \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \ln \hat{z} \right] - \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z} \right]} \\ \Leftrightarrow \beta_k &= \frac{n \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \ln \hat{z} \right]}{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k}} - \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z} \right] \\ \Leftrightarrow \beta_k &= \frac{1}{\frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \ln \hat{z}}{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k}} - \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z}}{n}} \end{aligned}$$

Ainsi, une fonction g telle que $\frac{\partial \ln L_c}{\partial \beta_k} = g(\beta_k) - \beta_k$ est bien définie (4.20).

$$g(\beta_k) = \frac{1}{\frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k} \ln \hat{z}}{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k}} - \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln \hat{x} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln \hat{y} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \ln \hat{z}}{n}} \quad (4.20)$$

Un point fixe de g est une valeur de β_k vérifiant $g(\beta_k) = \beta_k$ estimée par le point de convergence de la suite (4.21) initiée par la précédente estimation β_{k-1} . Le point β_k estimé, α_k est directement déduit par (4.19) et la loi de Weibull proposée est $\mathcal{W}(\alpha_k, \beta_k)$.

$$(b_n)_{n \geq 0} = \begin{cases} b_0 = \beta_{k-1} & \text{si } n = 0 \\ b_n = g(b_{n-1}) & n > 0 \end{cases} \quad (4.21)$$

Arrêt de l'algorithme

Reste à définir le critère d'arrêt de l'algorithme WEM. Une itération $k > 0$ consiste à estimer β_k puis déduire directement α_k . La suite itérative $(\beta_k)_{k \geq 0}$ ci-dessous est donc bien définie et correspond à la convergence du paramètre β . Dans la pratique, $|b_n - b_{n-1}| < 10^{-4}$ est le critère d'arrêt de l'itération k .

$$(\beta_k)_{k \geq 0} = \begin{cases} \beta_0 > 0 \\ \beta_k = \lim_{n \rightarrow +\infty} \begin{cases} b_0 = \beta_{k-1} \\ b_n = g(b_{n-1}) \end{cases} \end{cases} \quad (4.22)$$

Finalement, le critère d'arrêt de l'algorithme WEM est défini par (4.23). Dans la pratique, l'arrêt est réalisé si $|\beta_k - \beta_{k-1}| < 10^{-4}$. Pour revenir à la définition standard d'une loi de Weibull (4.1), il suffit d'appliquer le changement $\alpha \leftarrow 1/\sqrt[\beta]{\alpha}$.

$$\begin{cases} \beta = \lim_{k \rightarrow +\infty} (\beta_k)_{k \geq 0} \\ \alpha = \frac{n}{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^\beta + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^\beta + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^\beta} \end{cases} \quad (4.23)$$

Synthèse et conclusions

La figure 4.1 synthétise la procédure de paramétrisation d'une loi de Weibull multicensurée par l'algorithme WEM. Une première loi de Weibull $\mathcal{W}(\alpha_0, \beta_0)$ est proposée par la méthode MV à partir des défaillances observées (t_1, \dots, t_n) où le phénomène de censure est ignoré. Les observations sont ensuite analysées par le détecteur de censure (4.4) et segmentée en fonction de l'absence de censure \mathcal{T} (4.5) ou du type de censure \mathcal{X} - \mathcal{Z} (4.6-4.8). L'algorithme WEM est à présent initié à $k = 1$ et est itéré en deux étapes. L'étape E estime les censures par des espérances conditionnées (4.12-4.14) et définit la fonction de vraisemblance complétée (4.15). L'étape M correspond principalement à l'estimation de β_k définie comme le point fixe d'une fonction g conditionnée par les censures estimées (4.20). Ce point défini par la convergence de la suite (4.21), α_k est directement défini par β_k et (4.19). Reste à vérifier le critère d'arrêt $|\beta_k - \beta_{k-1}| < 10^{-4}$: si oui l'algorithme WEM propose la loi de Weibull $\mathcal{W}(\alpha_k, \beta_k)$ associée aux censures estimées, et sinon l'algorithme WEM reboucle à l'étape E.

Deux points non abordés ici sont la justification d'une loi de Weibull et l'unicité de la loi produite. La section suivante aborde le premier point. (PRADHAN et al. 2014) justifie le second point par le fait que la fonction technique g est unimodale garantissant ainsi l'existence et l'unicité du point fixe. Cependant, trois cas de divergence sont identifiés. Le premier correspond à la situation où l'ensemble des défaillances est observé à la même inspection : $\forall i \neq j \in [1, n], t_i = t_j$. Du point de vue de la méthode MV, ce cas est équivalent à la situation où il n'y a qu'une seule date de défaillance. Le second cas est une variante : une défaillance censurée est prédominante (par exemple, 90% des défaillances observées à la même inspection). Toujours par rapport à la méthode MV, ce cas correspond à la situation où l'échantillon est très faible (inférieur à 5 individus par exemple) et la convergence n'est

pas garantie. Le troisième cas est donné à l'annexe A : le cycle de vie 2008-2012 de la bande d'arrêt d'urgence est un candidat contre-exemple à la convergence et unicité du point fixe. Ce dernier a justifié une alternative basée sur la méthode de Newton-Raphson.

L'algorithme WEM proposé dans ces travaux de thèse est en mesure de paramétrer une distribution de Weibull dans un contexte de défaillances fortement censurées. Son intérêt est double : proposer simultanément l'estimation des censures et la paramétrisation de la loi de Weibull les plus vraisemblables au sens de la méthode MV.

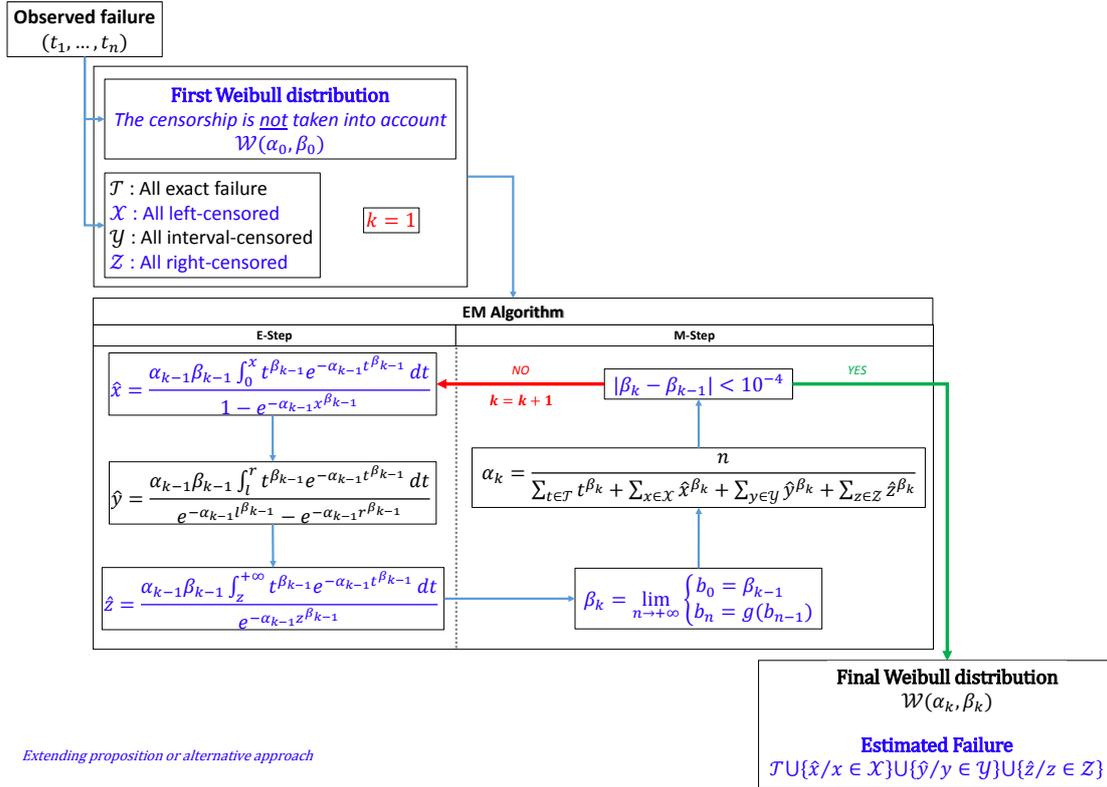


FIGURE 4.1 – Synthèse de l'algorithme WEM

4.2.3 Modèle de mélange de distributions de Weibull censurées

La proposition d'un modèle de mélange a fait l'objet d'un article de revue en cours de soumission. Une problématique classique dans la modélisation de mélange de Weibull est le choix du nombre de lois constituant le mélange. Dans cette thèse, ce choix est guidé par l'approche clustering présentée à la section 3.2.2 mais restreinte au cycle de vie considéré. L'analyse du dendrogramme donne le nombre de clusters qui correspond au nombre de lois de Weibull à mélanger. Cette approche présente plusieurs avantages. Pour les mêmes raisons décrites à la section 3.2.2, La CAH restreinte à un cycle de vie est en mesure de détecter les modes de dégradation atypiques (défaillances prématurées, fiabilité exceptionnelle...). De ce fait, le gestionnaire d'infrastructure gagne une connaissance plus fine de la fiabilité des marquages. En supposant qu'il est impossible de réaliser une campagne d'inspection par zone, la création d'un modèle de mélange peut servir de base à un plan de maintenance

unique prenant compte les différentes dynamiques de dégradation.

Soit un cycle de vie d'une ligne de marquages donnée dont la CAH identifie N clusters dénotés I_1, \dots, I_N . Soit le cluster I_j dont $W_j = (t_1, \dots, t_{\#I_j})$ est le vecteur de défaillance où $\#I_j$ est le cardinal du cluster. La loi de Weibull proposée par l'algorithme WEM est $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$ dont la pertinence est contrôlée par les tests d'adéquation graphiques (section 4.3.2).

$$R_{mixed}(t) = \sum_{j=1}^N \frac{\#I_j}{n} R_{\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)}(t) = \sum_{j=1}^N \frac{\#I_j}{n} e^{-\alpha_j t^{\beta_j}} \quad (4.24)$$

Finalement, le modèle de mélange proposé par (4.24) où $\sum_{j=1}^N \frac{\#I_j}{n} = 1$ est bien-défini. Cependant, la CAH a tendance à isoler rapidement les zones par censures. Le paragraphe 4.4 présente un cluster totalement censuré à droite où l'algorithme WEM diverge. Un modèle de mélange n'est cependant pas systématiquement pertinent.

4.3 Test d'adéquation en présence de données censurées

À ce stade, le choix d'un modèle de Weibull pour analyser la durée de vie des marquages n'est pas justifié. Ce paragraphe propose une comparaison de tests d'adéquation sous l'utilisation de l'algorithme WEM. Elle a fait l'objet d'une communication en conférence (REDONDIN et al. 2018b).

4.3.1 Formalisme initial

L'algorithme WEM propose une estimation des durées de vie censurées et la loi de Weibull la plus vraisemblable par rapport aux données disponibles. Cependant, le choix d'une loi de Weibull n'est pas justifié. Le principal biais dans la modélisation est l'impact des censures estimées. Cette section présente six tests d'adéquation classiques retenus pour une communication à la conférence Lambda Mu 2018 à Reims (France). À ce stade, l'ensemble des censures est estimé par l'algorithme WEM. De ce fait, les instants de défaillances exacts et estimés sont regroupés en une seule base \mathcal{S} directement exploitable par les tests d'adéquation classiques retenus :

$$\mathcal{S} = \mathcal{T} \cup \{\hat{x}/x \in \mathcal{X}\} \cup \{\hat{y}/y \in \mathcal{Y}\} \cup \{\hat{z}/z \in \mathcal{Z}\} = \{s_i / s_1 \leq \dots \leq s_n\} \quad (4.25)$$

Trois familles de tests sont identifiées : les graphiques, comparaisons des fonctions de répartitions théorique et empirique, sur l'espace normalisé.

4.3.2 Tests graphiques

Le test graphique classique, appelé également « papier Weibull », correspond au critère R^2 de la régression linéaire du jeu de données (4.26) qui doit être proche de 1.

$$\left\{ \left(\ln s_i; \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{i}{n} \right) \right) \right) / i = 1 : n \right\} \quad (4.26)$$

Le test d'Evans, Johnson & Green est une variante plus sévère du R^2 (4.27) avec $\overline{\ln s} = \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n \ln s_i]$, $M_i = \frac{1}{\beta} \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i-0.3175}{n+0.3665} \right) \right]$ et $\overline{M}_n = \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n M_i]$. La valeur R_{EJG}^2 doit être proche de 1 (EVANS et al. 1989).

$$R_{EJG}^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\ln s_i - \overline{\ln s}) M_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (\ln s_i - \overline{\ln s})^2 \right] \sum_{i=1}^n (M_i - \overline{M}_n)} \quad (4.27)$$

4.3.3 Comparaison des fonctions de répartition

Les tests de Kolmogorov-Smirnov et Anderson-Darling sont tous deux basés sur les différences entre la fonction de répartition empirique G_n (4.28) et la fonction de répartition théorique G (4.29) proposée par l'algorithme WEM du jeu de données $\ln \mathcal{S}$. L'hypothèse nulle, distribution par la loi $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$, est rejetée si la différence est trop grande.

$$G_n(x) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n 1_{\{\ln s_i \leq x\}} \right] \quad (4.28)$$

$$G(x) = 1 - e^{-e^{-\beta(x+\ln \alpha)}} \quad (4.29)$$

La statistique de Kolmogorov-Smirnov est la différence absolue entre les fonctions de répartition (D'AGOSTINO 2017) :

$$\begin{aligned} KS &= \sqrt{n} \sup_{y \in \mathbb{R}} |G_n(y) - G(y)| \\ &= \sqrt{n} \max \left[\max_{i=1:n} \left\{ \frac{i}{n} - G(\ln s_i) \right\}; \max_{i=1:n} \left\{ G(\ln s_i) - \frac{i-1}{n} \right\} \right] \end{aligned} \quad (4.30)$$

La statistique de Anderson-Darling est une combinaison entre la différence et le ratio des deux fonctions de répartition (D'AGOSTINO 2017) :

$$\begin{aligned} AD &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[G_n(y) - G(y)]^2}{G(y)(1-G(y))} dG(y) \\ &= -n + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1-2n) \ln(1-G(\ln s_i)) - (2i-1) \ln(G(\ln s_i)) \end{aligned} \quad (4.31)$$

4.3.4 Espace normalisé

Cette famille de tests est basée sur l'espace normalisé défini $\forall i = 1 : n-1$ par :

$$E_i = \frac{\ln s_{i+1} - \ln s_i}{\beta [\ln s_{i+1} - \ln s_i]} \quad (4.32)$$

Adapté à la loi $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$, le test de Mann, Scheuer & Fertig vérifie si le jeu $(\beta E_i)_{i=1:n-1}$ est i.i.d par la loi exponentielle de paramètre α . La statistique est définie par (4.33), où $[x]$

est la partie entière de x , et doit être ni trop petite, ni trop grande (MANN et al. 1973).

$$MSF = \frac{\sum_{i=\lfloor \frac{n}{2} + 1 \rfloor}^{n-1} E_i}{\sum_{i=1}^{n-1} E_i} \quad (4.33)$$

Le test de Tiku & Singh rejette l'hypothèse que \mathcal{S} est distribué par la loi $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$ s'il est trop petit ou trop grand (TIKU et SINGH 1981).

$$TK = \frac{2 \sum_{i=1}^{n-2} E_i}{(n-2) \sum_{i=1}^{n-1} E_i} \quad (4.34)$$

Une comparaison des tests à l'échelle de la RN4 est proposée à la section 4.4.2 et a fait l'objet d'une communication à la conférence Lambda Mu 2018 (Reims - France).

4.4 Étude de cas : la Route Nationale 4

Le cycle des marquages (de la ligne axiale de la RN4) posés en mars 2008 et remplacés en mars 2012 illustre l'application de l'algorithme WEM. Les marquages sont géographiquement placés autour de Courgivaux, Sommesous et Vitry-le-François. Le cycle est identifié par 92 points de mesures interprétés comme des marquages. La direction vers Vitry-le-François est considérée. Quatre mesures d'inspections sont réalisées à 6, 18, 30 et 42 mois.

4.4.1 Modèle de Weibull simple

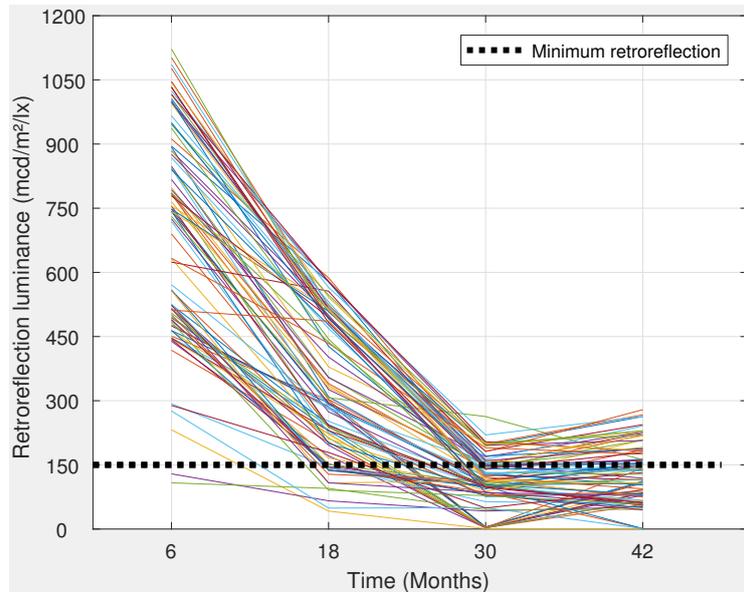


FIGURE 4.2 – Retro-réflexion observée des marquages posés en mars 2008 et remplacés en mars 2012.

Le suivi de la rétro-réflexion en fonction des campagnes d'inspections est présenté sur la figure 4.2. Visuellement, les censures sont toutes présentes : deux censures à gauche sont observables à 6 mois (Septembre 2008), des censures à droite à 42 mois (Septembre 2011)

et la majorité des défaillances a lieu entre 18 et 30 mois.

$$\tau = \min \{t_i \in \{6, 18, 30, 42\} / RL_t(i) \leq 150\} \quad (4.35)$$

En considérant le niveau de rétro-réflexion à 150 $mcd/m^2/lx$, τ est le premier instant de défaillance observé de chaque marquage. Si $t_i = \emptyset$, alors le marquage i est censuré à droite et est temporairement identifié par $t_i = 42+$.

$$t_i = \begin{cases} \min \tau & \text{if } \tau \neq \emptyset \\ 42+ & \text{else} \end{cases} \quad (4.36)$$

L'indicateur de censure est finalement adapté et associé à chaque instant de défaillance observé (4.37). À présent, si $t_i = 42+$, alors $t_i = 42$. Cinq instants sont observables : (6, 1) ([6, 18], 2), ([18, 30], 2), ([30, 42], 2) et (42, 3). Certains auteurs comme (SATHYANARAYANAN et al. 2008) considèrent que si $RL_t(i) = 150$ alors le marquage i est défaillant depuis l'instant t (produisant ainsi une défaillance exacte). Cette hypothèse sous-entend que les rétro-réfectomètres actuels sont en mesure de garantir cette précision. Or ce n'est pas le cas. Ce rapport de thèse ne prend donc pas en compte cette hypothèse : il n'y a donc pas d'instant de défaillance exact.

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{si } t_i = 6. \\ 2 & \text{si } t_i = 18, 30, 42. \\ 3 & \text{si } t_i = 42+. \end{cases} \quad (4.37)$$

TABLE 4.1 – Analyse de Weibull du cycle de maintenance 2008-2012

Observed failure	Numbers	Estimated failure $\mathcal{W}(31.65, 2.20)$
(6, 1)	2 (2%)	4.23 (July 2008)
([6, 18], 2)	13 (14%)	13.15 (April 2009)
([18, 30], 2)	54 (59%)	24.08 (March 2010)
([30, 42], 2)	3 (3%)	35.38 (February 2011)
(42, 3)	20 (22%)	49.13 (April 2012)

L'algorithme WEM est initiée par la loi de Weibull $\mathcal{W}(33.70, 4.30)$ et propose en 11 itérations la loi $\mathcal{W}(31.65, 2.20)$. Les tests d'adéquation graphiques ne rejettent pas l'hypothèse d'une distribution de Weibull : $R^2 = 0.97$ et $R_{EJG}^2 = 0.76$. Le détail de la modélisation est présenté sur la table 4.1. La première colonne indique le premier instant de défaillance observé associé au type de censure, la seconde indique le nombre de marquages concernés (et sa proportion dans l'échantillon) et la dernière colonne indique la date de défaillance estimée par l'algorithme WEM. Par exemple, deux marquages censurés à gauche sont observés à 6 mois (Septembre 2008) et la date de défaillance estimée, en fonction de la loi $\mathcal{W}(31.65, 2.20)$, est 4.23 mois (juillet 2008). Plus généralement, la table confirme les observations faites sur la figure 4.2 : les censures par intervalle forment l'essentiel des censures (en particulier entre 18 et 30 mois), la censure à droite est le second cas le plus important. Au regard de la date de défaillance estimée pour la censure à droite (49.13 mois -

avril 2012), la campagne de maintenance de mars 2012 était justifiée. Un remplacement systématique à 24 mois est une stratégie de maintenance naïve acceptable.

4.4.2 Comparaison des tests d'adéquation

La figure 4.3 présente la régression linéaire de l'ensemble (4.25) réalisée par la fonction $f(x) = 1.96x - 6.3$. Les tests $R^2 = 0.97$ et $R_{EJG}^2 = 0.77$ ne réfutent pas l'hypothèse d'une distribution par la loi de Weibull. La régression linéaire relie bien les points. Cependant, la stratégie d'inspection annuelle réduit mécaniquement la proportion de points modélisant la régression. Cette observation explique le très haut niveau du test R^2

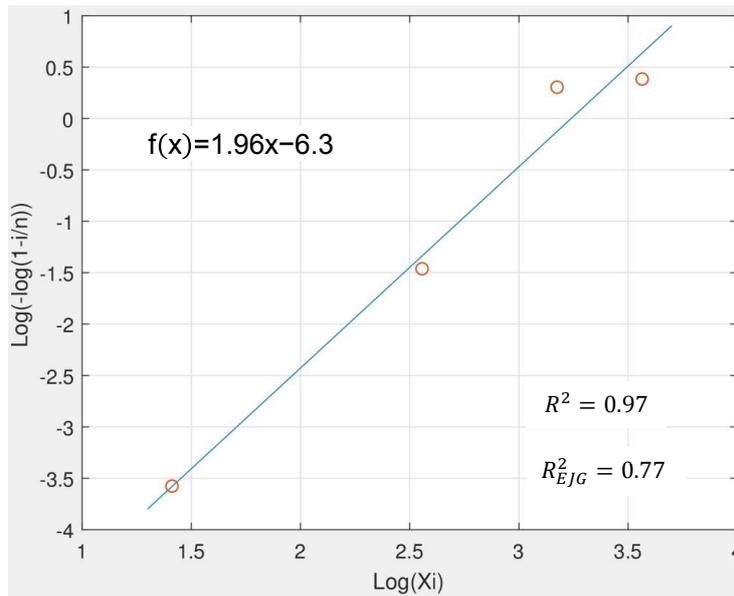


FIGURE 4.3 – Papier Weibull.

Le test de Kolmogorov-Smirnov ($KS = 0.74$) et Anderson-Darling ($AD = 4.07$) rejettent l'hypothèse d'une distribution de Weibull. La figure 4.4 compare les fonctions de répartition théorique et empirique. La fonction empirique réalise un important saut à 24 mois (0.16 à 0.75) que la fonction théorique ne parvient pas à prendre complètement en compte. Cet instant correspond au plus important cas de censures par intervalle estimées à 24 mois mais détectées à 30 mois (Septembre 2010). Malgré la transformation logarithmique en amont des fonctions (4.28 - 4.29), ce saut biaise mécaniquement les tests expliquant ainsi le rejet de l'hypothèse nulle. Une inspection à 24 mois aurait pu réduire d'une part l'écart entre les fonctions et la quantité de nouvelles défaillances à 30 mois d'autre part.

Les tests de Mann-Sheuer-Frietig et de Tiku & Singh rejette également l'hypothèse nulle ($MSF = 0.56$ et $TS = 0.78$). Cette observation s'explique par la construction des tests. Ils peuvent être vu comme un ratio entre la différence temporelle moyenne des dernières défaillances sur la différence temporelle moyenne de l'ensemble des défaillances. Cette construction pose deux problèmes dans le cas de données particulièrement censurées. Premièrement, même si l'algorithme WEM attribue la date de défaillance la plus cohérente de chaque censure (vis-à-vis de la méthode MV), une seule estimation peut être attribuée

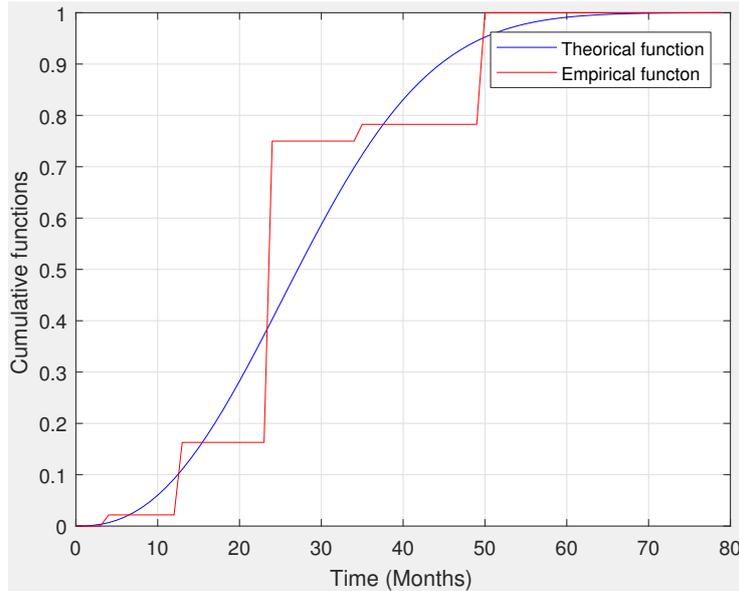


FIGURE 4.4 – Comparaison entre les fonctions de répartition théorique et empirique.

à un grand nombre de censures (53% des censures sont estimées à 24 mois par exemple). Par conséquent l'écart temporel moyen entre les défaillances tend vers 0. La table 4.1 montre que 74% des défaillances ont lieu avant 24 mois (dont 53% à cette date) qui sont très largement ignorées par le test MSF. Le test est construit autour des défaillances observées à 42 mois et les censures à droites. Le test TS étant également basé sur les différences temporelles entre les défaillances, il partage le premier défaut du test MSF (expliquant ainsi la faible valeur du test). Cependant, le test prend en compte l'ensemble des défaillances valorisant ainsi chaque inspection.

TABLE 4.2 – Synthèse des tests d'adéquation

Test	Graphique		Fonction de répartition		Espace normalisé	
	R^2	R_{EJG}^2	KS	AD	MSF	TK
Valeur	0.97	0.77	0.74	4.07	0.56	0.78

La table 4.2 synthétise les valeurs statistiques des six tests d'adéquation présentés dans la section 3. Les tests graphiques sont finalement les plus adaptés à l'entretien des marquages routiers inspectés annuellement. Cependant, chaque test présente des difficultés de mise en œuvre. La comparaison entre les fonctions de répartition montre qu'une inspection semestrielle serait statistiquement plus pertinente. Les tests basés sur l'espace normalisé sont en revanche très instables en présence de durées de vie censurées couplées à un nombre limité d'inspections.

4.4.3 Modèle de Weibull de mélange

La CAH propose, après lecture du dendrogramme, une segmentation en deux clusters présentés sur la figure 4.5. Le premier cluster (rouge) est géographiquement localisé à Sommesous. Il regroupe les censures à droite et des défaillances à 30 mois (Septembre

2010). Le second cluster (bleu) regroupe Courgivaux et Vitry-le-François et présente les censures à gauche et des défaillances à horizon 18 et 30 mois. La loi de Sommesous est initiée à $\mathcal{W}(37.37, 6.51)$ et l'algorithme WEM propose après 16 itérations la loi Weibull $\mathcal{W}(38.08, 3.22)$. Le papier Weibull ne rejette pas l'hypothèse de Weibull ($R^2 = 0.99$) mais Evans-Johnson-Green oui ($R_{EJG}^2 = 0.73$). Pour Courgivaux & Vitry, l'algorithme WEM est initié à $\mathcal{W}(27.44, 3.77)$ et propose après 32 itérations la loi $\mathcal{W}(20.56, 4.001)$. Les tests ne rejettent pas l'hypothèse de Weibull ($R^2 = 0.97$ et $R_{EJG}^2 = 0.87$).

La table 4.3 présente l'analyse de Weibull par clusters. Les marquages de Sommesous défont soit à 24.72 mois (mars 2010), soit à 49.04 mois (avril 2012). Les marquages restants défont à 14.07 ou 22.23 mois (mai 2009 et janvier 2010 respectivement). Les deux clusters ont finalement un nombre plus restreint de dates de défaillance. Le cas Sommesous est très proche d'une distribution avec seulement deux dates de défaillance. Cette observation explique que le "papier Weibull" dispose d'un R^2 extrêmement proche de 1 et le rejet d'Evans-Johnson-Green. À l'inverse, les marquages de Courgivaux & Vitry observent une plus grande diversité dans les dates de défaillance. Finalement sous ce modèle de mélange, la campagne de maintenance de mars 2012 est justifiée dans la région de Sommesous mais un remplacement complet début 2010 aurait été plus adéquat à Courgivaux et Vitry-le-François. La fonction de fiabilité associée au modèle de mélange est donnée par :

$$R_{Mixed}(t) = \frac{55}{92}e^{-(t/38.08)^{3.22}} + \frac{37}{92}e^{-(t/20.56)^4} \quad (4.38)$$

La figure 4.6 présente les quatre fonctions de fiabilité associées aux deux clusters (table 4.3), au modèle simple (table 4.1) et le modèle de mélange (4.38).

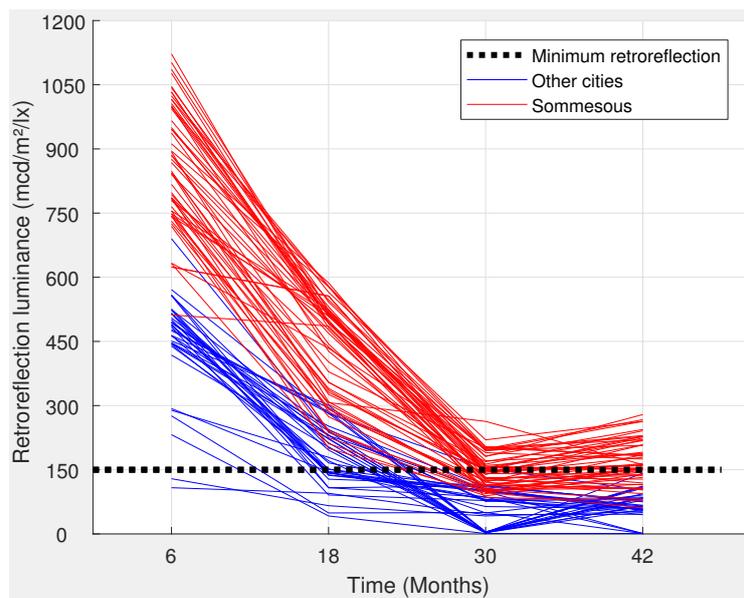


FIGURE 4.5 – Rétro-réflexion observée des marquages posés en mars 2008 et remplacés en mars 2012.

TABLE 4.3 – Analyse de Weibull par clusters du cycle de maintenance cycle 2008-2012.

Cluster	Observed failure	Numbers	Estimated failure
Sommesous $\mathcal{W}(38.08, 3.22)$	$([18, 30], 2)$	33 (36%)	24.72 (March 2010)
	$([30, 42], 2)$	2 (2%)	35.85 (February 2011)
	$(42, 3)$	20 (22%)	49.04 (April 2012)
Courgivaux & Vitry $\mathcal{W}(20.56, 4.001)$	$(6, 1)$	2 (2%)	4.80 (Jully 2008)
	$([6, 18], 2)$	14 (18%)	14.07 (May 2009)
	$([18, 30], 2)$	21 (23%)	22.23 (January 2010)
	$([30, 42], 2)$	1 (1%)	31.45 (October 2010)

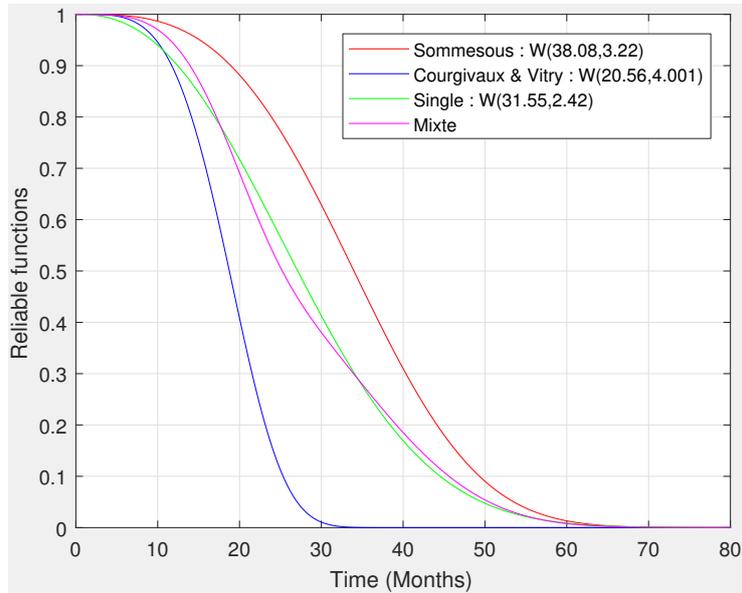


FIGURE 4.6 – Comparaison entre les différentes fonctions de fiabilité

4.5 Synthèse et conclusions

Le chapitre 3 montre que le suivi d'une ligne de marquages peut être entaché de données manquantes à compléter. Ce chapitre 4 montre que les inspections basées sur un rétro-réfectomètre dynamique comme Ecodyn ont le défaut de (statistiquement) censurer la durée de vie des marquages indépendamment du niveau de rétro-réflexion minimal souhaité. En accord avec le formalisme proposé par (SATHYANARAYANAN et al. 2008), trois types de censures sont identifiés : à gauche pour un marquage défaillant dès la première inspection, par intervalle si la défaillance intervient entre deux inspections et à droite si aucune défaillance est observée. Cependant, les travaux de cette thèse réfutent la possibilité d'observer une défaillance exacte avec les rétro-réfectomètres actuels.

La loi de Weibull est adaptée à l'analyse de la fiabilité des marquages. (SATHYANARAYANAN et al. 2008) propose de complexifier la classique méthode du maximum de vraisemblance sans pour autant préciser comment les maximums de la fonction de vraisemblance sont calculés. L'approche standard est de calculer les zéros des dérivées partielles par la méthode de Newton-Raphson (BAIN et ENGLEHARDT 2017). Cette méthode est déconseillée par (PRADHAN et al. 2014) en se basant sur des exemples où Newton-Raphson diverge. Un premier algorithme EM adapté à une loi de Weibull censurée par intervalle est proposé en guise d'alternative. Ces travaux de thèse proposent une extension aux censures à droite et gauche, appliquée dans le contexte des marquages routiers dont les instants de défaillance exacts ne sont pas disponibles.

L'exemple de la ligne axiale de la RN4 montre la robustesse de l'algorithme (section 4.4.1). Le cycle 2008-2012 présente les trois types de censures retenus et au moins deux modes de dégradations localisables. L'algorithme \mathcal{WEM} propose une loi de Weibull adaptée et des dates de défaillance crédibles. De plus, les tests d'adéquation graphiques valident le modèle de durée de vie et le test de Kolmogorov-Smirnov recommande une stratégie d'inspection semestrielle et non annuelle. Finalement, l'algorithme \mathcal{WEM} proposé est une alternative crédible à la méthode du maximum de vraisemblance d'une loi de Weibull multi-censurée.

Trois limites techniques sont identifiées. Premièrement, si un cycle de vie est exclusivement censuré à droite, à gauche ou par un intervalle, alors l'algorithme \mathcal{WEM} diverge. Concrètement, les défaillances $W = (t_1, \dots, t_n)$ sont de la forme $t_1 = \dots = t_n$. Ce cas est équivalent à la méthode MV entraînée par une seule donnée. Deuxièmement, si un cycle de vie est particulièrement censuré à droite, à gauche ou par un intervalle, alors l'algorithme \mathcal{WEM} diverge. Par exemple, si les durées de vie sont censurées à 90% à droite. Ce cas est équivalent à la méthode MV entraînée par un très faible nombre de données. Ces deux situations sont entièrement dues à la stratégie d'inspection. Cependant, l'annexe A présente un candidat contre-exemple à l'existence et unicité du point fixe à l'étape M de l'algorithme \mathcal{WEM} . Ce dernier a justifié une alternative basée sur la méthode de Newton-Raphson.

La comparaison de tests d'adéquation classiques (section 4.4.2) montre que les tests graphiques du type "papier Weibull" sont les plus robustes face à la censure. Les travaux

de thèse de Meryam Krit (KRIT 2014) proposent plusieurs pistes d'amélioration. Un état de l'art (KRIT et al. 2014) présente un premier test adapté à la censure et basé sur la fonction de vraisemblance censurée (ANTLE et BAIN 1969) mais conduit à l'abandon de l'hypothèse classique d'une distribution indépendante des dates de défaillance. Un test d'adéquation directement adapté au maximum de vraisemblance d'une loi de Weibull est proposé (KRIT et al. 2016). Une analyse de sa robustesse face aux dates de défaillance estimées par l'algorithme WEM est à l'étude. Si le test est adaptable à l'algorithme WEM, alors il constituera une alternative crédible à Antle & Bain.

L'algorithme WEM peut proposer un mélange de Weibull sous la condition de préciser les différents groupes de marquages. L'exemple de la RN4 (section 4.4.3) montre que le cycle 2008-2012 admet deux groupes de marquages dont les durées de vie sont différentes. Cette approche peut conduire à un plan de maintenance plus fin capable de prendre en compte les différents modes de dégradations. Cependant, le nombre de lois dans le modèle de mélange n'est pas justifié. Dans l'exemple du cycle 2008-2012, une classification en trois clusters est possible. Les marquages défaillant à horizon 30 mois du cluster de Sommesous sont regroupés. Sommesous est finalement composé de marquages très largement censurés à droite et l'algorithme WEM diverge.

Au moins deux alternatives basées sur une approche bayésienne sont très récemment proposées (DUCROS et PAMPHILE 2018) (MARSILI et al. 2018). Ces approches semblent montrer une supériorité sur l'approche EM. Une proposition alternative basées sur ces récents résultats est envisagée.

À ce stade, une ligne de marquages d'une infrastructure routière donnée est segmentable en zones stratégiques. Si besoin, un algorithme de reconstruction de données et un détecteur de maintenance sont disponibles afin d'améliorer le suivi de la rétro-réflexion et identifier les cycles de vie. L'algorithme WEM réalise des analyses de Weibull tout en proposant des dates de défaillance crédibles par rapport aux inspections. À ce stade, tous les éléments sont réunis pour la conception d'un plan de maintenance.

Maintenance d'une ligne de marquages

À ce stade, tous les éléments sont réunis pour établir un plan de maintenance. Le chapitre 3 identifie les zones de maintenance stratégiques et l'algorithme WEM apporte des modèles de durée de vie. Ce chapitre propose l'étude de trois modèles de maintenance préventive classiques : systématiques par rapport à l'âge ou par bloc et conditionné à la dégradation courante. Cette approche est motivée d'une part par les modèles disponibles dans la littérature et d'autre part par la qualité des données d'inspection.

5.1 Modélisation de la maintenance préventive

Cette section a deux objectifs. Le premier est de réaliser un tour d'horizon des différents plans de maintenance disponibles. Le second est de justifier le choix d'une stratégie de maintenance préventive. Au sens de (RAUSAND et HOYLAND 2004) par exemple, le chapitre 2 ne met pas en évidence un plan de maintenance des marquages. Ce fait orienta cette thèse vers une étude comparée entre une stratégie systématique et conditionnelle sous l'hypothèse d'un plan d'inspection périodique.

5.1.1 Définition d'un plan de maintenance

La norme NF EN 13306 (AFNOR 2018a) définit la maintenance comme l'ensemble des techniques applicables sur un système afin de le maintenir ou de le rétablir dans un état de bon fonctionnement. Cette même norme définit le plan de maintenance comme l'ensemble de l'organisation visant à la maintenance d'un système. Dans le cas des marquages routiers, la section 2.2 montre que le remplacement est la seule action de maintenance possible pour rétablir un niveau de rétro-réflexion suffisant. Actuellement, un plan de maintenance de la signalisation horizontale crédible implique une définition de zones de maintenance et une planification des remplacements. La CAH proposée au chapitre 3 permet d'identifier sur un réseau donné les marquages suivant un mode de dégradation similaire.

La figure 5.1 présente une classification classique des types de maintenances ((CASTANIER 2001) ou (RAUSAND et HOYLAND 2004)). Deux grandes familles de maintenances existent : correctives et préventives.

1. La maintenance corrective consiste à appliquer une action de maintenance après la détection d'une panne. Ce type de stratégie est à privilégier lorsqu'une panne n'engendre pas de conséquence majeure. Les deux principales actions de maintenance

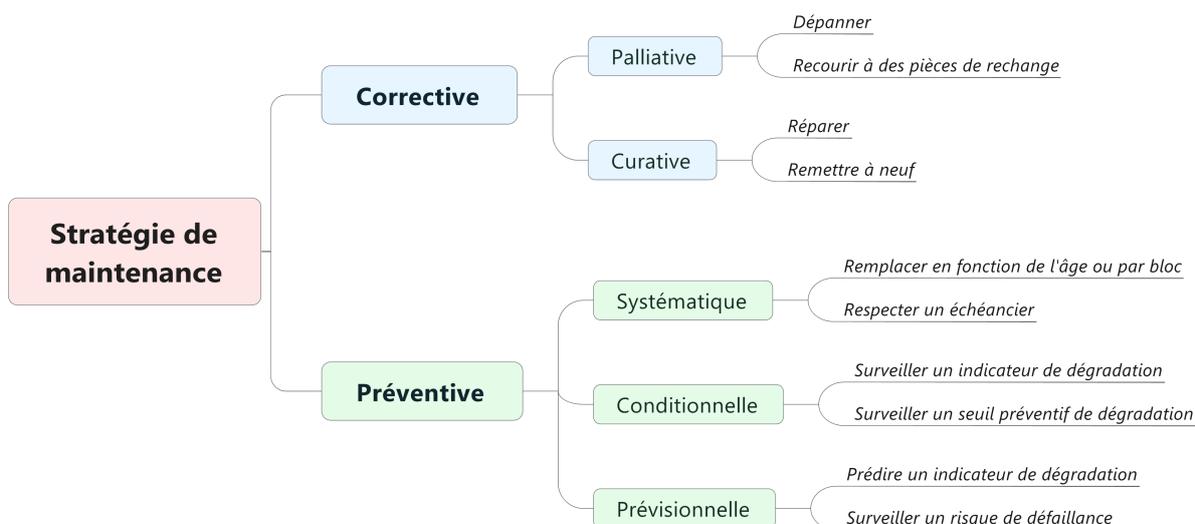


FIGURE 5.1 – Principaux types de maintenances et actions associées

sont palliative et curative. La première consiste des actions de dépannage tandis que la seconde applique une remise à neuf du système.

2. La maintenance préventive consiste à appliquer une action de maintenance avant l'apparition d'une panne. Ce type de stratégie est à privilégier lorsqu'une panne engendre des conséquences majeures ou si les stratégies de maintenance corrective engendrent un coût d'entretien très élevé. Les trois principales actions de maintenance sont systématique, conditionnelle et prévisionnelle. La première consiste à établir un échéancier minimisant les risques de panne et les coûts d'entretien à long terme. La seconde consiste à étudier l'évolution d'une mesure de dégradation et enclencher une action préventive lorsque la mesure atteint un seuil de dégradation préventif. La dernière est similaire à l'exception qu'une mesure de risque de panne est considérée.

Les stratégies préventives offrent plusieurs avantages pour l'entretien d'une ligne de marquages : la signalisation doit être claire et intuitive pour les conducteurs, la disparition de la ligne perturbe la circulation d'un véhicule autonome et la prévision des actions à mener assure une gestion optimale du budget d'entretien.

Pour apprécier et comparer la performance des différents plans de maintenance, la littérature identifie généralement trois critères : sécurité, disponibilité et économie (HUYNH 2011). Le premier est privilégié dans des industries à risque ou si une défaillance engendre des blessures ou des pertes humaines. Le second est généralement déployé lorsque les coûts de maintenance sont difficiles (voire impossibles) à quantifier (LIAO et al. 2006). Le dernier fait le plus consensus ((KHOURY 2012) ou (BOUVARD et al. 2011)) et consiste à établir un compromis entre la maintenance préventive et corrective. Plus précisément, l'objectif est de maximiser les effets d'une action de maintenance tout en minimisant à long terme le coût de maintenance global (inspections, remplacements, logistique, sur-maintenance,

indisponibilité...).

En absence d'un lien clair entre l'accidentologie et la dégradation de l'infrastructure routière (Section 2.6.2), les conséquences directes (au sens large) d'un marquage défaillant sont difficiles à établir. Cependant, l'absence de signalisation horizontale peut provoquer l'arrêt d'un véhicule autonome engendrant potentiellement une pénalité de transport (compensation de l'arrêt d'une file de camions de transport autonomes par exemple) en plus des pénalités budgétaires liées au remplacement d'urgence. Par conséquent, le critère économique est privilégié dans cette thèse. La sûreté des transports est abordée au regard du seuil de dégradation maximal.

L'horizon d'optimisation des coûts de maintenance est supposé infini. Le coût moyen asymptotique est défini comme l'espérance du coût de maintenance par unité de temps (5.1). Il mesure la performance des stratégies de maintenance avec $C(t)$ le coût global à t , $E[C(T)]$ et $E[T]$ sont respectivement le coût de maintenance moyen et la longueur moyenne d'un cycle T .

$$C_{\infty} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{E[C(T)]}{E[T]} \quad (5.1)$$

La fonction coût est liée à la stratégie de maintenance souhaitée et les contraintes budgétaires. Par exemple, le gestionnaire d'infrastructure doit-il constituer à terme un budget d'inspection afin de surveiller la dégradation des marquages ou doit-il investir à court terme sur de nombreuses campagnes d'inspection afin de connaître la durée de vie globale des marquages "une bonne fois pour toute"? Dans le premier cas, la fonction de coût devra prendre pleinement en compte cette contrainte budgétaire alors que le second peut considérer l'investissement comme négligeable sur le long terme.

Finalement, une stratégie préventive de la maintenance de la signalisation horizontale présente de nombreux avantages. Pour le gestionnaire d'infrastructure, un plan de maintenance peut être établi à l'avance en fonction des réalités budgétaires et de ses propres exigences de qualités. Pour l'introduction d'un véhicule autonome, le choix de limiter l'apparition de marquages défaillants est un gage de qualité supplémentaire. Reste à choisir en amont l'une des stratégies préventives. Ce choix est ici orienté par deux paramètres : les opportunités d'inspection et la faisabilité logistique de la maintenance.

5.1.2 Inspection et maintenance

Une inspection peut être interprétée comme une opportunité de maintenance ou une occasion de mettre à jour l'état du système. Ces deux pratiques sont observées pour l'entretien des marquages. Dans tous les cas, la précision d'un plan de maintenance préventif est corrélée à la disponibilité des informations sur l'état courant. La littérature présente quatre approches de l'inspection : périodique, séquentielle, continue et autre.

1. Une inspection périodique est la plus courante et intuitive. Les plans de maintenance qui en découlent consistent en général à identifier le pas ou seuil de maintenance préventif le plus adapté (PARK 1988a) ou la loi de durée de vie (PARK 1988b).

2. Une inspection séquentielle consiste à planifier des inspections en fonction du niveau de dégradation. La fréquence des inspections augmente généralement avec la dégradation. Ce type d'approche est bien adaptée lorsque le taux de défaillance est croissant (LAM et YEH 1994) ou si la dégradation est modélisée par un processus markovien ou semi-markovienne discret (TIJMS et DUYN SCHOUTEN 1985).
3. Une inspection continue revient à étudier un système à tout instant. Une approche conditionnelle de la maintenance est recommandée par la littérature. Le principe général reste le même : la décision est prise dès l'instant où la dégradation a atteint pour la première fois un seuil de maintenance préventif (WANG 2000).
4. Une inspection autre est réservée à des cas très particuliers ; difficiles à aborder. Par exemple, un système inspecté en temps continu avec une dégradation modélisée par un processus non-markovien (YEH 1997).

Pour l'entretien des lignes de marquage, le consensus est une inspection périodique. En France, elle a généralement lieu une fois par an (en Septembre pour la RN4 par exemple).

Une question sous-entendue par ce rapide état de l'art est la modélisation de la dégradation. L'algorithme WEM est opérationnel pour établir un modèle de durée de vie des marquages d'une portion de ligne de marquages. Ce fait encourage le développement d'un plan de maintenance basé sur cette loi. Sur la question d'un modèle de dégradation markovien, un plan d'inspection annuel couplé à une durée de vie relativement courte ne permet pas de vérifier rigoureusement un comportement markovien. La principale difficulté réside dans la définition des états de dégradation et leurs temps de séjour. Ce constat ne démontre pas également un comportement semi-markovien ou non-markovien. Le principe de parcimonie oriente vers un modèle binaire : la ligne est soit défaillante, soit fiable. Deux approches classiques de la maintenance préventive sont finalement retenues : statique et dynamique (GERTSBAKH 2013).

Les approches statiques consistent à définir le comportement a priori des marquages d'une zone donnée par une loi de durée de vie définie par l'algorithme WEM. Les deux principaux modèles sont le remplacement systématique par rapport à l'âge ou par bloc. Les deux consistent à établir un échancier de maintenance réalisant un compromis entre une dégradation maximale et un coût de maintenance minimal. La principale différence est que la stratégie en fonction de l'âge réinitialise l'échancier après un remplacement correctif (ARNLJOT et RAUSAND 2009).

Les approches dynamiques sont basées sur le suivi de la dégradation. Ce dernier est généralement appuyé par un modèle de dégradation éventuellement complété par un plan d'inspection adapté (CASTANIER 2001) (GRALL et al. 2002) (CASTANIER 2012). Dans cette thèse, une stratégie de maintenance conditionnée à la dégradation courante est proposée. Le principe est de définir un seuil de maintenance préventif appelant à un remplacement de la ligne de marquages entre deux inspections. (CASTANIER 2001) proposent également la prise en compte de différents stades de dégradation admettant leurs propres seuils préventifs de réparation/remplacement. Cette approche n'est également pas raisonnable dans le contexte actuel des pratiques d'inspection.

5.1.3 Système multi-composants

Un dernier aspect peu abordé jusqu'à présent est la formalisation du système "portion de ligne de marquages" à entretenir. Sous le formalisme classique proposé par (BARLOW et PROSCHAN 1996), il s'agit d'un système multi-composants monté en parallèle où chaque composant est non réparable. Concrètement les marquages d'une même ligne ne s'influencent pas mutuellement mais partagent le même modèle de dégradation. Ce partage est expliqué ici par l'infrastructure (échangeur, contournement, rase campagne...).

Les travaux de thèse d'Anne Barros montrent que les décisions de maintenance prises séparément pour chaque composant ne sont pas nécessairement les plus optimales (BARROS 2003). Ce fait évacue la demande d'un plan de maintenance visant à remplacer individuellement chaque marquage de la ligne. Un tel plan serait par ailleurs logistiquement irréalisable.

Un système multi-composants peut induire des dépendances (THOMAS 1986). Les trois plus courants sont économiques (DEKKER et WILDEMAN 1997), opportuniste (CHO et PARLAR 1991) et stochastique (ROSS 1984). Pour l'entretien des marquages, les dépendances sont d'ordre économique et logistique : remplacer une portion de ligne bien définie est à la fois plus simple et plus économique que le remplacement individuel de marquages précis.

Dans les approches statiques proposées ici, une loi de Weibull est attribuée par l'algorithme WEM pour l'ensemble de la portion. Cette propriété induit mécaniquement le même instant de remplacement préventif des marquages de la portion de ligne et donc de la ligne elle-même.

Pour les approches dynamiques comme le remplacement conditionnelle, la littérature propose des hypothèses particulières. Par exemple, (CASTANIER et al. 2005) se placent dans un plan d'inspection aperiodique et chaque composant admet son propre seuil de maintenance préventif. Le cas d'un horizon roulant, résolu par un algorithme de planification dynamique et initialement abordé par (WILDEMAN et al. 1997), a connu un développement accru ces dernières années (BOUVARD et al. 2011) (DO VAN et al. 2012) (VU et al. 2014).

Dans cette thèse, le plan d'inspection est supposé τ -périodique, l'horizon de maintenance est infini et la dégradation moyenne d'une portion de ligne de marquages est un indicateur suffisamment robuste pour l'ensemble de la portion. Par conséquent, le remplacement conditionnel se base sur la surveillance de la dégradation moyenne en fonction des seuils de maintenance correctif et préventif. Finalement, une portion de ligne de marquages est défaillante si le niveau de réflexion moyen est inférieur à un seuil minimal $L \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$.

5.1.4 Synthèse et conclusions

La section 2.8 montre qu'il est difficilement envisageable d'appliquer un plan de maintenance d'une ligne de marquages incluant le remplacement individuel de chaque marquage de la composant. Les marquages sont supposés posés en parallèle car la défaillance d'un marquage n'entraîne pas la défaillance totale de la ligne ou la défaillance d'autres marquages.

Au pire, une partie de la ligne peut partager une même source de dégradation complémentaire (entrée/sortie de voie, zone urbaine...).

Un remplacement préventif et systématique a l'avantage de proposer une stratégie de maintenance relativement passive. Un échéancier propose l'instant de maintenance réalisant un compromis entre maintenance préventive et corrective tout en minimisant les coûts de maintenance à long terme. Le gestionnaire doit assurer le financement et la logistique à cette échéance.

Un remplacement préventif et conditionné est une alternative crédible à condition que le gestionnaire soit en mesure de financer (si besoin) une campagne de maintenance avant la prochaine inspection.

Dans cette thèse, trois stratégies préventives classiques sont étudiées et comparées : systématique par rapport à l'âge, systématique par bloc et conditionnée à la dégradation courante. Une dernière question à traiter en amont est la formalisation du budget d'entretien. L'hypothèse d'un budget d'entretien global réparti équitablement parmi les clusters est retenue. Une formalisation plus rigoureuse est proposée à la prochaine section.

5.2 Répartition du budget d'entretien

Ce paragraphe propose une formalisation du budget d'entretien global et par cluster ainsi que des coûts de maintenance et d'inspection.

Généralement, le coût total d'une restauration de ligne de marquages est établi de gré à gré entre le gestionnaire d'infrastructure et un industriel en fonction du budget d'entretien. Cette thèse propose une estimation des coûts de maintenance préventifs en fonction du budget d'entretien total réparti sur les zones de maintenance stratégiques.

Les stratégies de maintenance proposées consistent à remplacer préventivement la totalité ou une partie d'une ligne de marquages (plusieurs kilomètres). Dans le cas d'un remplacement total, son coût de remplacement correspond au budget d'entretien total noté $B > 0$. La section 3.2.2 propose une segmentation de la ligne en zones stratégiques (de maintenance) basée sur une CAH recherchant les différents modes de dégradation. La stratégie consiste à remplacer chaque zone.

Une répartition équitable de budget en fonction de la taille des clusters est considérée. Soit une ligne de marquages segmentée en $J \geq 1$ clusters. Pour un cluster C_j donné, le budget de remplacement préventif de la portion de ligne associée est (5.2) avec $\#C_j$ le cardinal du cluster. Exemple : si $B = 10000$ est le budget d'entretien total de la ligne axiale de la RN4, alors le budget alloué au cluster 1 (420 points de mesures sur 968) est $c_{pre}^1 = 4339$.

$$c_{pre}^j = B \times \frac{\#C_j}{\sum_{k=1}^J \#C_k} \quad (5.2)$$

Une répartition inéquitable du budget est également envisageable et ne modifie pas les stratégies de maintenance. Ces questions restent à la discrétion des gestionnaires des

infrastructures.

Le coût de la maintenance corrective de la portion de ligne associé à C_j est $c_{cor}^j > c_{pre}^j$. Ce coût reste délicat à estimer et est interprété ici comme le coût engendré par l'urgence d'une demande de maintenance. À terme, ce coût peut inclure le coût d'immobilisation d'un véhicule autonome dû à une ligne de marquages non-délectable. Dans cette thèse, le coût correctif est estimé par le produit (5.3) d'une pénalité $r > 1$ avec le coût préventif c_{pre}^j . En guise d'illustration sur la RN4, une pénalité d'ordre $r = 3$ est proposée et une sensibilité à ce paramètre est proposée.

$$c_{cor}^j = r \times c_{pre}^j \quad (5.3)$$

Certaines stratégies de maintenance comprennent le coût d'inspection. Ce coût est proportionnel au nombre de points de mesure d'un cluster (5.4) avec c_i le coût unitaire d'inspection. Exemple, sur une base de $c_i = 5$, le coût d'inspection du cluster 1 (420 points de mesures) de la RN4 est $c_{ins}^j = 2100$.

$$c_{ins}^j = c_i \times \#C_j \quad (5.4)$$

5.3 Remplacement systématique par zone

Cette section propose de traiter une ligne de marquages comme un seul composant dont la durée de vie est distribuée par une loi de Weibull à deux paramètres $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$. Deux stratégies de remplacement préventif et systématique classiques sont envisagées : par rapport à l'âge et par bloc (ARNLJOT et RAUSAND 2009).

5.3.1 Loi de Weibull de référence

Le remplacement basé sur l'âge et par bloc sont tous les deux basés sur la loi de durée de vie. Le chapitre 4 montre que l'algorithme WEM développé dans cette thèse est en mesure de proposer une loi de Weibull pour un cycle de vie donné. Le nombre de cycles disponibles ne permet pas de vérifier rigoureusement la stabilité de la loi par cycle. Une loi de Weibull de référence par cluster basée sur l'ensemble des cycles de vie est dans ce cas proposée.

Soit un cluster C_j proposé par la segmentation d'une ligne de marquages établie par une CAH du suivi de la rétro-réflexion (section 3.2.2) et composé de $n > 1$ marquages. Supposons que $M \geq 1$ cycles de vie observés sur le cluster (éventuellement établis par le détecteur de maintenance proposé à la section 3.2.3). La durée de vie observée sur le marquage $i \in \llbracket 1 ; n \rrbracket$ au cours du cycle $m \in \llbracket 1 ; M \rrbracket$ est notée t_i^m . Son niveau de censure (gauche, intervalle ou droite) est $\delta_{t_i^m}$. Par généralisation, \mathfrak{C}_j correspond à l'ensemble des durées de vie observées (et associées à une censure) au cours des $M \geq 1$ cycles de vie.

$$\mathfrak{C}_j = \left\{ (t_i^m, \delta_{t_i^m}) / i \in \llbracket 1 ; \#C_j \rrbracket ; m \in \llbracket 1 ; M \rrbracket \right\} \quad (5.5)$$

Les durées de vie présentées sur \mathfrak{C}_j sont supposées i.d.d. L'algorithme WEM présenté

au chapitre 4 est donc en mesure d'établir une analyse de Weibull et d'estimer les censures inhérentes aux techniques d'inspection actuelles. Finalement, la loi de Weibull de référence du cluster C_j établie par l'algorithme EM est notée $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$.

5.3.2 Remplacement par rapport à l'âge

Soit la portion de ligne de marquages associée au cluster C_j et de loi de durée de vie $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$. L'âge de la ligne est défini par le temps écoulé depuis le dernier remplacement. Une stratégie de remplacement préventive et systématique par rapport à l'âge consiste à remplacer la portion de ligne à l'âge T^* . Le pas de maintenance évite au maximum la défaillance et minimise le coût de maintenance par unité de temps sur un horizon infini.

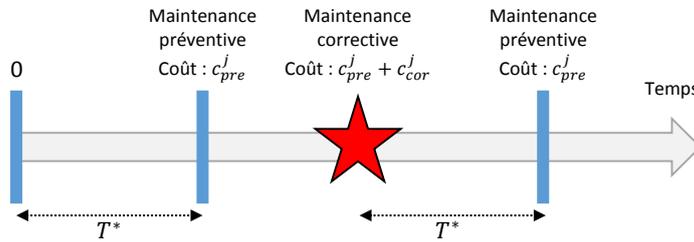


FIGURE 5.2 – Principe du remplacement basé sur l'âge.

La figure 5.2 illustre les enjeux de cette stratégie. Un remplacement préventif et systématique est planifié à l'âge T^* . Si une défaillance apparaît entre deux remplacements, un coût de remplacement correctif entraîne un coût additionnel k . Dans cette situation, l'échéancier est remis à 0. L'intervalle de temps T^* ne doit être ni trop faible ni trop élevé afin d'éviter la sur-maintenance ou un temps d'indisponibilité élevé (ARNLJOT et RAUSAND 2009).

$$C(t) = \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j F_j(t)}{\int_0^t R_j(x) dx} = \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j (1 - e^{-(t/\alpha_j)^{\beta_j}})}{\alpha_j \Gamma(1 + \frac{1}{\beta_j})} \quad (5.6)$$

Le remplacement d'une ligne est supposé parfait et garantit un retour à l'état "aussi bon que neuf". Le théorème du renouvellement identifie la fonction (5.6) comme le coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini (ARNLJOT et RAUSAND 2009) avec F_j et R_j les fonctions de répartition et de fiabilité associées à $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$. Finalement, le pas de maintenance optimum est le minimum de la fonction $C(t)$:

$$T^* = \{T / C(T) = \min_{t>0} C(t)\} \quad (5.7)$$

Le coût asymptotique à long terme correspond également au coût par unité de temps d'un remplacement exclusivement correctif et est donné par la fonction (5.8). Ce coût dépend de la durée moyenne entre deux remplacements¹ ($MTBR$). Cette durée associée à

1. Mean Time Before Replacement ($MTBR$)

la loi $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$ est $\alpha_j \Gamma(1 + 1/\beta_j)$ avec $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$ la fonction gamma.

$$C(\infty) = \lim_{t \rightarrow +\infty} C(t) = \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j}{\int_0^{+\infty} R_j(x) dx} = \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j}{MTBR} = \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j}{\alpha_j \Gamma(1 + 1/\beta_j)} \quad (5.8)$$

Soit $r = \frac{c_{cor}^j}{c_{pre}^j} > 1$ la pénalité financière associée à une maintenance corrective. Le ratio $\frac{C(t)}{C(\infty)}$ mesure le bénéfice financier d'une maintenance préventive à $t > 0$ par rapport au tout correctif. Si $\frac{C(t)}{C(\infty)} \geq 1$, alors un remplacement correctif à $t > 0$ est économiquement plus intéressant. Dans le cas contraire, un remplacement préventif est plus adéquat. Le ratio minimal est atteint à $\frac{C(T^*)}{C(\infty)}$; le pas de maintenance préventif le plus intéressant.

$$\frac{C(t)}{C(\infty)} = \frac{1 + r(1 - e^{-(t/\alpha_j)^{\beta_j}})}{\int_0^t e^{-(x/\alpha_j)^{\beta_j}} dx} \times \frac{\alpha_j \Gamma(1 + 1/\beta_j)}{1 + r} \quad (5.9)$$

5.3.3 Remplacement par bloc

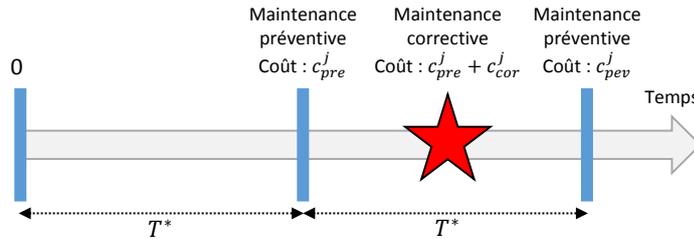


FIGURE 5.3 – Principe du remplacement par bloc.

Soit la portion de ligne de marquages associée au cluster C_j de loi de durée de vie $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$. Une stratégie de remplacement préventive et systématique par bloc consiste à remplacer la portion de ligne à l'horizon T^* , $2T^*$, $3T^*$, Le pas de maintenance évite au maximum la défaillance et minimise le coût de maintenance par unité de temps sur un horizon infini.

La figure 5.3 illustre les enjeux de cette stratégie. Comme pour le remplacement par rapport à l'âge, un pas de maintenance préventif T^* est mis en place. Si une défaillance apparaît entre deux remplacements, un remplacement correctif entraîne un coût additionnel c_{cor}^j . Cependant, contrairement au remplacement par rapport à l'âge, l'échéancier est inchangé (ARNLJOT et RAUSAND 2009).

$$C(t) = \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j W_j(t)}{t} \quad (5.10)$$

Le remplacement d'une ligne est également supposé parfait et garantit un retour à l'état "aussi bon que neuf". Le théorème du renouvellement identifie la fonction (5.10) comme le coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini (ARNLJOT et RAUSAND 2009) où W_j est le nombre de défaillances moyen sur l'intervalle $[0, t]$. Ce dernier est formellement défini par le processus de renouvellement (5.11) où F_j est la

fonction de répartition associée à $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$ (BARLOW et PROSCHAN 1996).

$$W_j(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} F_j^{(n)}(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} \int_0^t F_j^{(n-1)}(t-x) dF(x) \quad (5.11)$$

Une importante variante complète cette stratégie. Si une panne apparaît entre deux échéances de remplacement, (BARLOW et HUNTER 1961) proposent de réaliser une réparation minimale au lieu d'un remplacement complet. Deux cas particuliers sont le recours à des pièces de rechange et accepter l'hypothèse d'une réparation imparfaite. Sous l'hypothèse du recours à $k > 0$ pièces de rechange, la fonction coût (5.10) se dote (5.12) d'un coût de réparation c_{rep} et d'un processus de durée de vie $\tilde{T}_k(t) = t - \sum_{i=1}^{k+1} T_i$ avec T_i la durée de vie de la pièce de rechange i i.d.d par sa loi de durée de vie.

$$C(t) = \frac{c_{pre} + c_{cor}W_j(t) + c_{rep}E[\tilde{T}_k(t)]}{t} \quad (5.12)$$

L'hypothèse d'une réparation imparfaite conduit à une redéfinition du processus W_j . Il est suffisant de se ramener au processus de renouvellement proposé par l'un des modèles classiques de réparation imparfaite : modèle de Brown et Porschan (BROWN et PROSCHAN 1983) (BLOCK et al. 1985) (LIM 1998), modèle de réduction du taux de défaillance (CHAN et SHAW 1993) (DOYEN et GAUDOIN 2002) ou le modèle de réduction de l'âge (MALIK 1979) (DOYEN et GAUDOIN 2002). Comme le montre la section 2.2, le remplacement de marquage est l'unique action de maintenance possible. Par ailleurs, la technologie actuelle ne propose pas de "marquage de rechange". Dans le cas contraire, cela impliquerait de toute façon une stratégie de remplacement "au marquage près" qui est impossible d'un point de vue logistique.

Dans le cas d'une distribution de Weibull $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$, (SMITH et LEADBETTER 1963) ont démontré que le processus W_j peut être interprété comme une série alternée absolument convergente (5.13). Les auteurs recommandent une étude à part entière pour chaque couple (α_j, β_j) car des simplifications peuvent apparaître. Exemple : $W_j(t) = t/\alpha_j$ si $\beta_j = 1$.

$$W_j(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n-1} \times A_n \times (\frac{t}{\alpha_j})^{n\beta_j}}{\Gamma(n\alpha_j + 1)} \quad (5.13)$$

$$A_n = \gamma_n - \sum_{k=1}^{n-1} \gamma_k A_{n-k} \quad (5.14)$$

$$\gamma_k = \frac{\Gamma(k\beta_j + 1)}{k!} \quad (5.15)$$

Cette approche reste très complexe à mettre en oeuvre. C'est pour cette raison que différents estimateurs de W_j sont proposés. Un état de l'art est réalisé dans (ARNLJOT et RAUSAND 2009). Le plus courant est la fonction F_j de répartition associée à $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$ mais il sous-entend que la durée de vie du système est courte (ARNLJOT et RAUSAND 2009). Cette particularité est en adéquation avec les marquages routiers. Finalement, le

coût moyen de maintenance par unité de temps est défini par :

$$C(t) = \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j W_j(t)}{t} \simeq \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j F_j(t)}{t} = \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j (1 - e^{-(t/\alpha_j)^{\beta_j}})}{t} \quad (5.16)$$

La fonction n'a de sens que sur un intervalle $[0, x]$ vérifiant $F_j(t) < 1 \forall t \in [0, x]$. S'il existe, le pas de maintenance optimum correspond à son minimum (5.17). Dans le cas contraire, un remplacement correctif est économiquement plus intéressant.

$$T^* = \inf\{T / C(T) = \min_{t>0} C(t)\} \quad (5.17)$$

Le coût asymptotique à long terme est le même que dans le cadre d'une stratégie par rapport à l'âge (5.8). Également, le ratio $\frac{C(t)}{C(\infty)}$ mesure le bénéfice financier d'une maintenance préventive à $t > 0$ par rapport au tout correctif. Si $\frac{C(t)}{C(\infty)} \geq 1$, alors un remplacement correctif à $t > 0$ est économiquement plus intéressant. Sinon, un remplacement préventif est plus adéquat.

$$\frac{C(t)}{C(\infty)} = \frac{\alpha_j \Gamma(1 + 1/\beta_j)}{c_{pre}^j + c_{cor}^j} \times \frac{c_{pre}^j + c_{cor}^j (1 - e^{-(t/\alpha_j)^{\beta_j}})}{t} \quad (5.18)$$

Soit $r = \frac{c_{cor}^j}{c_{pre}^j} > 1$ la pénalité financière associée à une maintenance corrective. Par résolution de l'équation $\frac{dC(t)}{dt} = 0$, (ARNLJOT et RAUSAND 2009) proposent une estimation directe de T^* en fonction de la loi $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$ et des coûts préventifs et correctifs :

$$\left(\frac{T^*}{\alpha_j}\right)^{\beta_j} = \frac{\beta_j}{1 + \frac{1}{r}} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\beta_j}{1 + \frac{1}{r}} - 1\right)^2 - 2\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{r}}\right)} \quad (5.19)$$

La règle de décision considérée à l'échelle d'un cluster C_j associé à la durée de vie $\mathcal{W}(\alpha_j, \beta_j)$ est la formule de Rausand ou le *MTBR* si le minimum global n'est pas défini :

$$T^* = \begin{cases} \alpha_j^{\beta_j} \sqrt{\frac{\beta_j}{1 + \frac{1}{r}} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\beta_j}{1 + \frac{1}{r}} - 1\right)^2 - 2\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{r}}\right)}} & \text{Formule de Rausand} \\ \alpha_j \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_j}\right) & \text{Le MTBR sinon.} \end{cases} \quad (5.20)$$

5.4 Remplacement conditionnel par zone

5.4.1 Formalisme général

Soit la portion de ligne de marquages associée au cluster C_j dont le niveau de réflexion minimal à respecter est $L \text{ mcd}/m^2/lx$. Soit Y un processus croissant (5.21) modélisant la perte moyenne de réflexion de la ligne avec RL_0 le niveau de réflexion à neuf et $RL(t)$ le niveau moyen établi à l'inspection $t \geq 0$. En fonction du niveau

de rétro-réflexion minimal L , la perte maximale autorisée est $Y_c = RL_0 - L$.

$$Y(t) = RL_0 - RL(t) \quad (5.21)$$

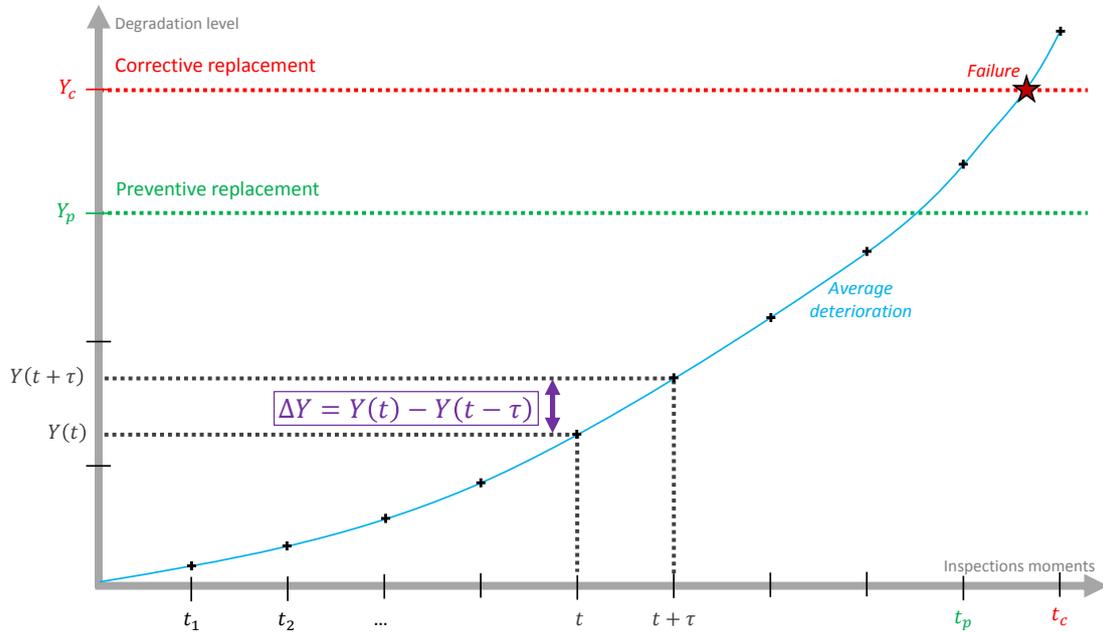


FIGURE 5.4 – Principe du remplacement conditionnel.

La figure 5.4 présente les enjeux d'une stratégie de maintenance conditionnelle par la dégradation courante (CBM)². La ligne est supposée inspectée périodiquement à un pas constant $\tau > 0$. Le processus Y est partiellement connu à travers les inspections et indique la dégradation courante moyenne de la portion de ligne. Si une inspection montre que la dégradation atteint le seuil Y_c , alors la ligne est insuffisamment rétro-réfléchissante et un remplacement correctif doit être organisé d'urgence. Pour éviter cette situation, un seuil préventif Y_p est mis en place. Si une inspection montre que la dégradation atteint Y_p , alors la ligne est suffisamment rétro-réfléchissante mais un remplacement préventif est organisé avant la prochaine inspection.

Contrairement au niveau de dégradation qui est toujours établi par les inspections, la variation ΔY entre deux inspections est un processus stochastique à modéliser. Les deux objectifs à réaliser ici : modéliser le processus stochastique ΔY et établir le seuil préventif Y_p . Les principales caractéristiques du processus Y sont :

1. $Y(0) = 0$.
2. Le processus $\{Y(t) / t \geq 0\}$ possède des accroissements indépendants.

Les accroissements $\Delta Y = Y(t) - Y(t - \tau)$ suivent une loi gamma de paramètres d'échelle $\alpha_j \tau > 0$ et de forme $\beta_j > 0$, notée $\gamma(\alpha_j \tau, \beta_j)$. Ce type de processus gamma est notamment proposé par (GRALL et al. 2002). Cette loi est ici pleinement définie par sa fonction de

2. Abréviation classique de "Condition-Based Maintenance"

densité (5.22) avec $\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ la fonction Gamma d'Euler.

$$f_\tau(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha_j \tau) \beta_j^{\alpha_j \tau}} x^{\alpha_j \tau - 1} e^{-\frac{x}{\beta_j}} \quad (5.22)$$

Si $\alpha_j \tau = 1$, alors ΔY suit une loi exponentielle de paramètre $1/\beta_j$. Plus généralement, si $\alpha_j \tau > 0$ est un entier positif, alors ΔY suit une loi Erlang d'ordre n et de paramètre $1/\beta_j$ (une somme de α_j variables aléatoires indépendantes suivant une loi exponentielle de paramètre $1/\beta_j$) (COCOZZA-THIVENT 1997).

La vitesse de dégradation moyenne est $\mu_j = \alpha_j \beta_j$ tandis que la dégradation moyenne sur l'intervalle τ est définie par l'espérance de la variable ΔY :

$$E[\Delta Y] = \mu_j \tau \quad (5.23)$$

Soit $y \in]0, Y_c[$ un seuil préventif arbitraire. Le *MTBR* associé est approché par (5.24) avec F_τ la fonction de répartition associée à $\gamma(\alpha_j \tau, \beta_j)$. Ce temps correspond à un pas de maintenance arbitraire.

$$MTBR(y) \approx \left(\frac{y}{\mu \tau} + 1 \right) \tau \quad (5.24)$$

La fonction coût C_{CB} associée à une stratégie de maintenance conditionnelle correspond au coût moyen de remplacement préventif d'un cycle de vie par *MTBR* avec c_{pre}^j , c_{cor}^j , c_{ins}^j respectivement les coûts de maintenances préventive et corrective et le coût total d'inspection associés au cluster C_j et F_j la fonction de répartition associée à la loi $\gamma(\alpha_j \tau, \beta_j)$.

$$\begin{aligned} C_{CB}(y) &= \frac{c_{pre}^j + c_{ins}^j + c_{cor}^j P(\Delta Y > (Y_c - y))}{MTBR(y)} \\ &= \frac{c_{pre}^j + c_{ins}^j + c_{cor}^j [1 - F_j(Y_c - y)]}{\left(\frac{y}{\mu \tau} + 1 \right) \tau} \end{aligned} \quad (5.25)$$

Le seuil optimal de maintenance préventif Y_p correspond au seuil garantissant le minimum de la fonction coût :

$$Y_p = \inf \{ Y / C_{CB}(Y) = \min_{0 \leq y < Y_c} C_{CB}(y) \} \quad (5.26)$$

Le bénéfice d'une action préventive arbitraire par rapport au tout correctif est mesuré par le ratio $C_{CB}(y)/C_{CB}(Y_c)$. Si $C_{CB}(y)/C_{CB}(Y_c) \geq 1$, alors un remplacement correctif à $t > 0$ est économiquement plus intéressant. Sinon, un remplacement préventif est plus adéquat. Le ratio minimal est atteint à $C_{CB}(Y_p)/C_{CB}(Y_c)$; le seuil préventif le plus

intéressant.

$$\frac{C_{CB}(y)}{C_{CB}(Y_c)} = \frac{c_{pre}^j + c_{ins}^j + c_{cor}^j [1 - F_j(Y_c - y)]}{c_{pre}^j + c_{ins}^j + c_{cor}^j} \frac{Y_c + \mu\tau}{y + \mu\tau} \quad (5.27)$$

D'un point de vue opérationnel, le formalisme introduit ici peut être simplifié. Après la formalisation des processus Y et ΔY puis des seuils Y_p et Y_c , la dégradation des marquages peut être analysée en revenant sur les données de retour d'expériences par le processus $RL(t) = RL_0 - Y(t)$. Les seuils préventifs et correctifs sont respectivement $RL_0 - Y_p$ et $RL_0 - Y_c$. Par abus de notation, ces seuils sont notés Y_p et Y_c .

Le plan de maintenance est simplifiable en fonction du plan d'inspection. Trois exemples réalistes sont présentés ici : un plan d'inspection mensuel (SATHYANARAYANAN et al. 2008), semestriel (recommandé par la section 4.3) et annuel (exemple de la RN4 ou le réseau autoroutier en annexe B).

5.4.2 Exemple : plan d'inspection annuel, semestriel ou mensuel

Plan d'inspection semestriel

Du point de vue du modèle, une inspection semestrielle correspond au pas d'inspection $\tau = 6$ mois. La variable aléatoire ΔY suit alors une loi gamma de paramètres d'échelle $6\alpha > 0$ et de forme $\beta > 0$. La vitesse de dégradation moyenne et la dégradation moyenne sur un semestre sont respectivement $\mu = \alpha\beta$ et 6μ .

La fonction coût C_{CB} associée à une stratégie de maintenance conditionnelle correspond au ratio entre le coût moyen de remplacement par cycle de vie et le $MTBR$ avec c_{pre} , c_{ins} , c_{cor} respectivement les coûts de maintenance préventive et corrective et le coût total d'inspection et F la fonction de répartition associée à la loi $\gamma(\alpha, \beta)$.

$$C_{CB}(y) = \frac{c_{pre} + c_{ins} + c_{cor} [1 - F(Y_c - y)]}{\left(\frac{y}{6\mu} + 1\right) 6} \quad (5.28)$$

Plan d'inspection annuel ou mensuel

Du point de vue du modèle, les hypothèses d'une inspection annuelle ou mensuelle sont équivalentes car le pas d'inspection est le même : $\tau = 1$ (année ou mois). La variable aléatoire ΔY suit une loi gamma de paramètres d'échelle $\alpha > 0$ et de forme $\beta > 0$. La vitesse de dégradation moyenne correspond à la dégradation moyenne : $\mu = \alpha\beta$.

La fonction coût C_{CB} associée à une stratégie de maintenance conditionnelle correspond au ratio entre le coût moyen de remplacement par cycle de vie et le $MTBR$ avec c_{pre} , c_{ins} , c_{cor} respectivement les coûts de maintenance préventive et corrective et le coût total d'inspection et F la fonction de répartition associée à la loi $\gamma(\alpha, \beta)$.

$$C_{CB}(y) = \frac{c_{pre} + c_{ins} + c_{cor} [1 - F(Y_c - y)]}{\frac{y}{\mu} + 1} \quad (5.29)$$

Dans le cas d'inspections annuelles, si le besoin d'une précision mensuelle / trimestrielle / semestrielle se présente, alors il est suffisant de diviser a posteriori le paramètre α par 12, 4 ou 2 pour évaluer la vitesse de dégradation mais le seuil préventif Y_p reste inchangé. Par conséquent, le modèle recommande une fréquence d'inspection en adéquation avec le niveau de précision souhaité.

5.4.3 Loi gamma de référence

Reste à attribuer une loi gamma de référence par cluster qui doit être modélisée. Le chapitre 4 montre que la durée de vie des marquages routiers est censurée car l'instant de défaillance n'est pas établi par les rétro-réflexomètres. Cependant, la loi de dégradation associée au processus ΔY est quant à elle basée sur les variations entre deux inspections au cours d'un même cycle. Par conséquent, il n'y a pas de phénomène de censure. Une loi gamma de référence par cluster, apprise sur l'ensemble des cycles de vie et paramétrée par la classique méthode du Maximum de Vraisemblance, est suffisante.

Soit un cluster C_j proposé par la segmentation d'une ligne de marquages établie par une CAH du suivi de la rétro-réflexion (section 3.2.2) et composé de $n > 1$ marquages. Supposons que $M \geq 1$ cycles de vie observés sur le cluster (éventuellement établis par le détecteur de maintenance proposé à la section 3.2.3). Soit $RL_i^m(t)$ le niveau de rétro-réflexion observé sur le marquage $i \in \llbracket 1 ; n \rrbracket$ au cours du cycle $m \in \llbracket 1 ; M \rrbracket$. La variation observée à l'inspection $t > \tau$ est : $\Delta RL_i^m(t) = RL_i^m(t) - RL_i^m(t - \tau)$. Par généralisation, \mathfrak{D}_j est l'ensemble des variations de rétro-réflexion au cours des $M \geq 1$ cycles de vie.

$$\mathfrak{D}_j = \left\{ \Delta RL_i^m(t) / t > \tau ; i \in \llbracket 1 ; \#C_j \rrbracket ; m \in \llbracket 1 ; M \rrbracket \right\} \quad (5.30)$$

Les variations présentées sur \mathfrak{D}_j sont supposées i.d.d. La classique méthode du MV est suffisante pour paramétrer la loi Gamma de référence du cluster C_j , notée $\gamma(\alpha_j \tau, \beta_j)$.

5.5 Application à la Route Nationale 4

5.5.1 Remplacement basé sur l'âge

Un exemple de loi de Weibull de référence

La section 3.3.3 montre que la ligne axiale de la RN4 est segmentée en 5 clusters interprétés comme des zones stratégiques de maintenance. Le cluster 1 s'étend sur l'ensemble de la ligne et est le plus important (420 points de mesure soit 43% de la ligne). L'historique de maintenance estimé (Section 3.3.4) indique 23 cycles de maintenance de longueurs très variables entre 1 et 7 ans.

En suivant la méthodologie proposée à la section 5.3.1, l'algorithme WEM identifie 1315 durées de vie censurées au cours des 23 cycles de vie. La table 5.1 présente l'analyse de Weibull proposée par l'algorithme. Sur l'ensemble des cycles, la censure à gauche et à droite sont respectivement identifiées dans 20% et 33% des cas. La censure à gauche est d'ailleurs le troisième cas de défaillance observé. En ignorant la censure à droite, les

deux principales dates de défaillance observées sont 18 et 30 mois (respectivement 21 et 19% des observations). Après dix itérations, l'algorithme EM propose la loi de Weibull $\mathcal{W}(22.14; 1.82)$. Les trois principales censures à droite sont également observées à 6, 18 et 30 mois. Dans les deux derniers cas, la date de défaillance est respectivement estimée à 28 et 38 mois. Les marquages étant remplacés à 24 et 36 mois, cette action correspond à une maintenance préventive. En revanche, la censure à droite observée à 6 mois est estimée à 21 mois ce qui correspond à une sur-maintenance.

TABLE 5.1 – Analyse de Weibull du cluster 1
Loi de Weibull $\mathcal{W}(22.14; 1.82)$

Observed failure	Censor	Estimated failure	Numbers	Frequency
6	Left	4	261	20%
	Right	21	56	4%
18	Interval	12	278	21%
	Right	28	355	27%
30	Interval	23	248	19%
	Right	38	18	1%
42	Interval	35	73	6%
	Right	48	25	2%
54	Interval	46	1	0%

Les dates de défaillance estimées sont cohérentes par rapport aux observations. Le test du "papier Weibull" indique $R^2 = 0.85$. L'hypothèse d'une distribution de Weibull n'est pas rejetée. La figure 5.5 compare les fonctions de répartition théorique et empirique des durées de vie. En moyenne, la fonction théorique admet une erreur de 0.05 avec un maximum de 0.17 pendant la période 20-22 mois. Comme pour la comparaison proposée à la section 4.4.2, une inspection semestrielle et non annuelle aurait amélioré l'adéquation entre les fonctions sur la période 18-30 mois. Cependant, la loi de Weibull surestime la durée de vie au-delà de 30 mois.

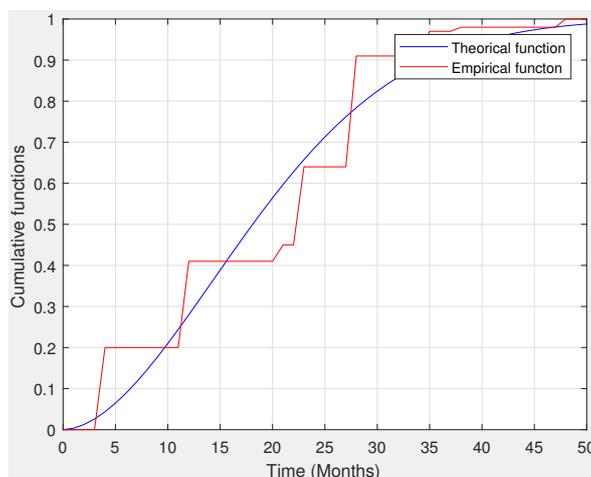


FIGURE 5.5 – Comparaison entre les fonctions de répartition théorique et empirique associées au cluster 1.

L'élaboration d'une loi de durée de vie de référence proposée à la section 5.3.1 permet

bien d'avoir un modèle de Weibull global à l'échelle d'une zone stratégique de maintenance. Les lois de Weibull apprises sont à présent les références pour l'élaboration de stratégies de maintenance préventive par rapport à l'âge ou par bloc.

Remplacement par zone

La table 5.2 synthétise le plan de maintenance préventif par rapport à l'âge sous quatre hypothèses sur la RN4 :

- Un unique seuil de dégradation maximal ($150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$).
- Le budget de maintenance total est $B = 10000$.
- La répartition du budget est équitable en fonction de la taille des clusters.
- La pénalité de maintenance corrective est de l'ordre de $r = 3$.

La table se présente en cinq colonnes : le cluster étudié, son seuil de dégradation maximal et son budget d'entretien associé, la loi de Weibull proposée par l'algorithme EM ainsi que son temps moyen entre deux remplacements (*MTBR*) puis le coût d'investissement par mois et le pas de maintenance préventif optimal au sens de la fonction coût (5.6). Par exemple, la portion de ligne associée au cluster 1 doit être préventivement remplacée tous les 14 mois.

TABLE 5.2 – Stratégie de maintenance préventive de la RN4 par rapport à l'âge. Pénalité de maintenance corrective à $r = 3$ et unique seuil de rétro-réflexion à $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$.

Typography		Remplacement strategy		
Cluster - Number (Frequency)	Preventive Cost	Weibull distribution $\mathcal{W}(\alpha; \beta)$ - MTBR (Month)	Cost by time unit - $\frac{C(T^*)}{C(\infty)}$	Optimum replacement moment T^* (Month)
1 - 420 (43%)	4339	$\mathcal{W}(22.14; 1.82)$ - 20	738 - 84%	14
2 - 336 (35%)	3471	$\mathcal{W}(17.17; 1.39)$ - 16	852 - 96%	18
3 - 63 (7%)	651	$\mathcal{W}(18.6; 1.47)$ - 17	145 - 94%	16
4 - 112 (12%)	1157	$\mathcal{W}(23.63; 2.62)$ - 21	147 - 67%	13
5 - 37 (4%)	382	$\mathcal{W}(31.76; 2.73)$ - 28	35 - 65%	18
Global - 968 (100%)	10000	$\mathcal{W}(21.44; 1.7)$ - 20	1822 - 87%	15

Le cluster 2 est le seul admettant un pas de maintenance supérieur à son MTBR. En dehors de ce cas, l'écart moyen entre le MTBR et le pas de maintenance est de 5,8 mois. Cet

écart coïncide avec le temps entre une inspection (Septembre) et l'action de maintenance (mars de l'année suivante). Par ailleurs, si la totalité de la RN4 est considérée, le pas de maintenance préventif est de 15 mois. Le premier intérêt d'un remplacement par zone est d'éviter un remplacement sur toute la longueur de la RN4. Le plan proposé répond à cette demande : le pas du cluster 1 (43% de la RN4) est de 14 mois tandis que celui du cluster 2 et 5 (39% de la RN4 au total) est de 18 mois.

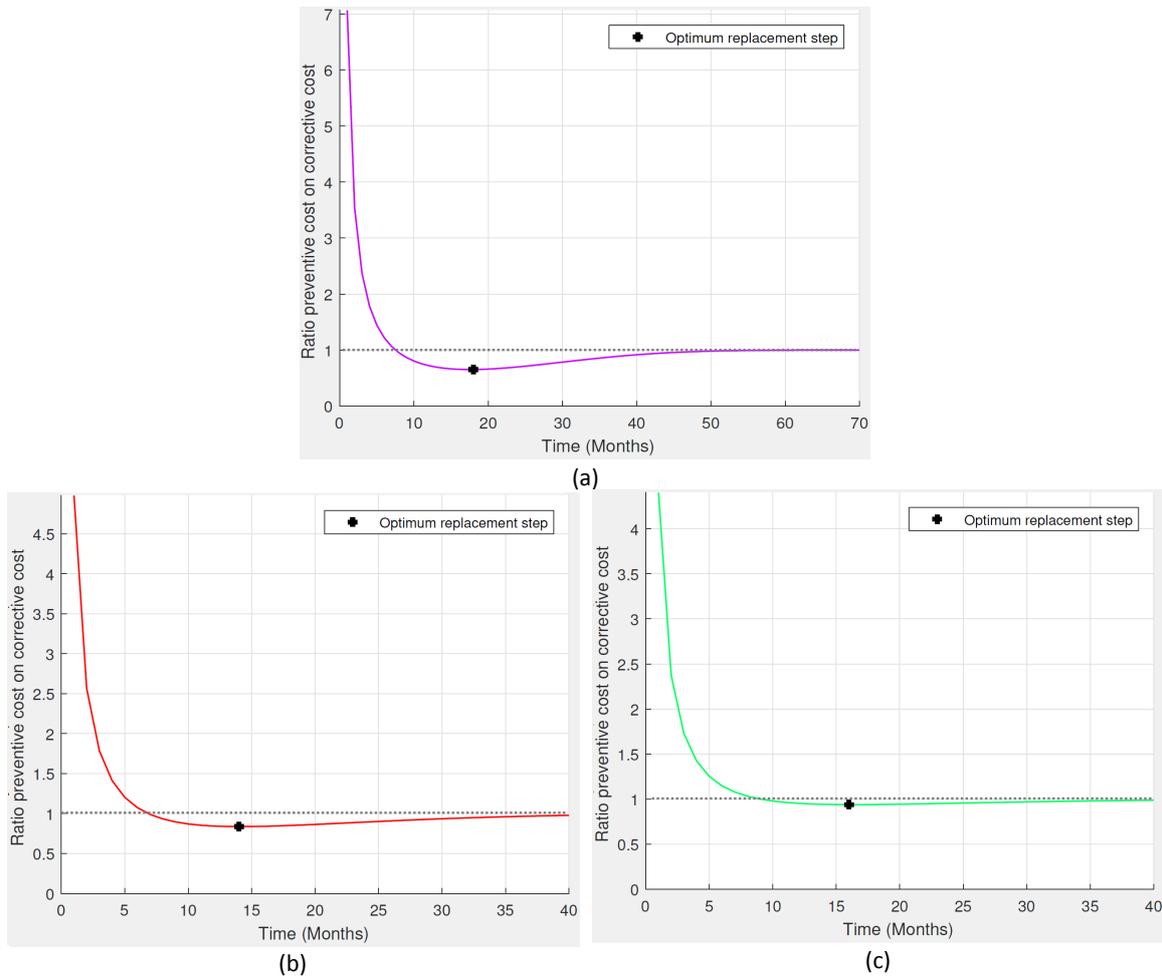


FIGURE 5.6 – Comparaison entre les fonctions coûts asymptotiques : (a) cluster 5, (b) cluster 1, (c) cluster 3.

Le bénéfice économique d'un plan préventif, au sens la fonction coût asymptotique (5.8), est très inégal d'un cluster à l'autre. Plus précisément, le paramètre de forme β (associé à la loi de Weibull du cluster) est corrélé au bénéfice de la stratégie de maintenance : plus β est important, plus le bénéfice est intéressant.

La figure 5.6 présente le coût asymptotique à long terme des clusters 5, 1 et 2. Le cluster 5 (Fig 5.6.(a)) observe l'économie la plus intéressante par rapport au tout correctif (100%-65%=35%). Le cluster 3 (Fig 5.6.(c)) réalise la plus faible (4%). Le cluster 1 (Fig 5.6.(b)) est dans la moyenne (17%). Sur la globalité de la RN4, le modèle prédit une économie de l'ordre de 13%. En revanche, l'économie moyenne par cluster est de 19%. Par conséquent, l'entretien de la ligne sur toute sa longueur est économiquement plus intéressant (mais logistiquement peu crédible). La segmentation de la ligne rogne l'économie de 6%.

Sensibilité au seuil de rétro-réflexion minimal

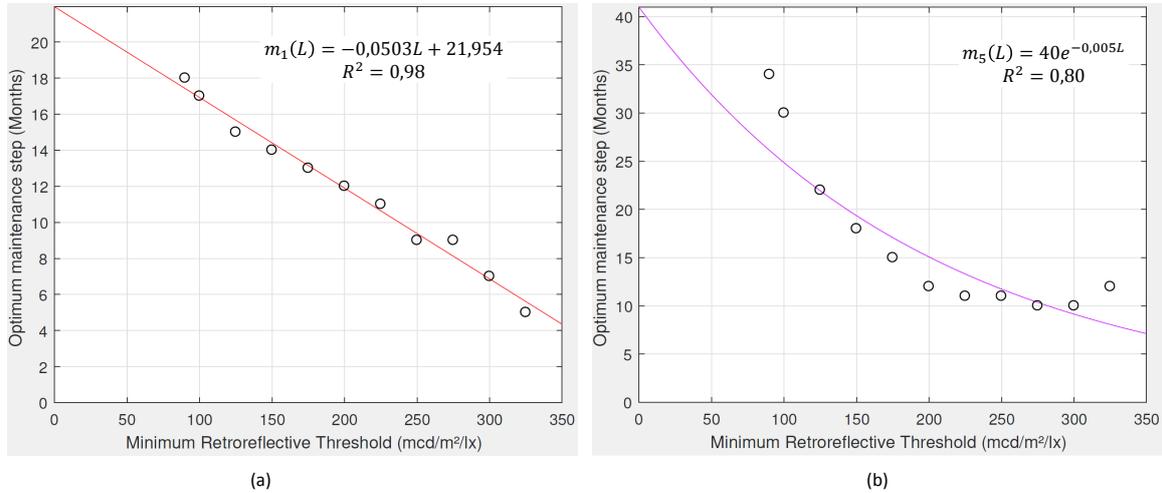


FIGURE 5.7 – Pas de maintenance en fonction du seuil de rétro-réflexion minimal L avec $r = 3$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.

Une exigence de qualité crédible pour la circulation du véhicule autonome est d'instaurer un seuil minimal de rétro-réflexion par zone de maintenance. C'est pour cette raison que la sensibilité du modèle au choix du seuil de rétro-réflexion minimal L est étudiée. Cette dernière est principalement due à l'apprentissage (par l'algorithme EM) d'une nouvelle loi de durée de vie adaptée à L .

Une méthode de régression par cluster est proposée. Concrètement, pour chaque cluster C_j , une fonction (dite de "pas") m_j est approchée par une méthode de régression fonction du seuil de rétro-réflexion minimal L . La figure 5.7 présente les fonctions adaptées aux clusters 1 et 5 (respectivement la plus grande et plus petite zone de maintenance) avec une pénalité correctrice d'ordre $r = 3$.

Sans surprise, le pas de maintenance est décroissant par rapport au seuil minimal de rétro-réflexion. Avec un critère R^2 de l'ordre de 0.98 et 0.80, les fonctions offrent une bonne prédiction du pas de maintenance. Cependant, le type de régression varie d'un cluster à l'autre. Un modèle linéaire est plus adapté au cluster 1 tandis qu'un modèle exponentiel est plus adapté au cluster 5.

Sensibilité à la pénalité de maintenance correctrice

La section 5.2 montre que la pénalité de maintenance correctrice reste difficile à chiffrer à ce jour. Une sensibilité à ce paramètre est proposée afin d'évaluer son impact sur le pas de maintenance. À nouveau, pour chaque cluster C_j , une fonction (dite de "pas") m_j est approchée par une méthode de régression fonction de la pénalité de maintenance r . La figure 5.7 présente les fonctions adaptées aux clusters 1 et 5 avec $L = 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Le pas de maintenance est également décroissant par rapport à la pénalité correctrice. Avec un critère R^2 moyen de l'ordre de 0.98, les fonctions offrent une bonne prédiction du pas de maintenance. Dans les deux cas, un modèle logarithmique est optimal.

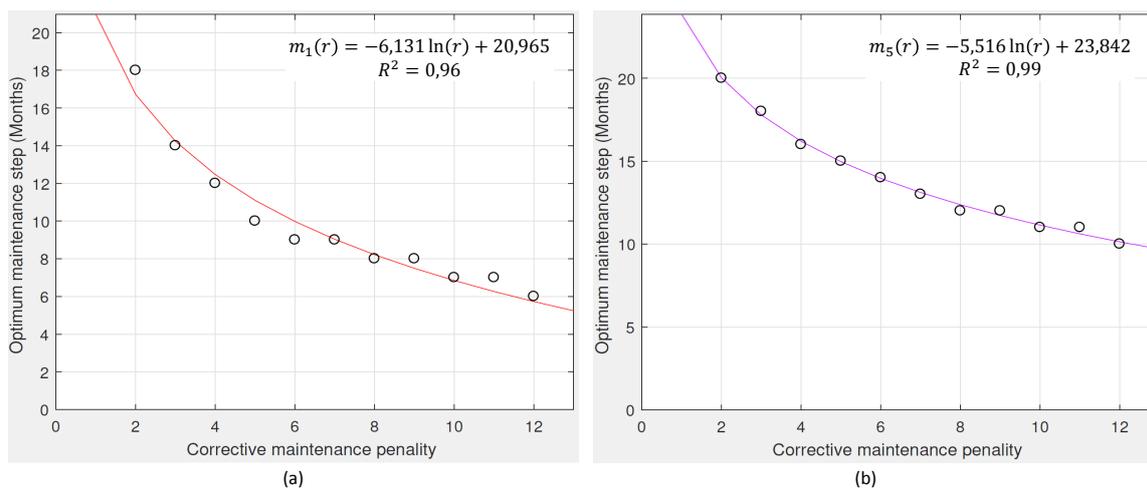


FIGURE 5.8 – Pas de maintenance en fonction de la pénalité de maintenance corrective r avec $L = 150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.

Synthèse et conclusions

La stratégie de maintenance préventive, systématique, par zone et par rapport à l'âge est crédible à l'échelle de la ligne axiale de la RN4. Pour un unique seuil de rétro-réflexion minimal de $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, son action évite une immobilisation globale de l'infrastructure tous les 15 mois. Outre l'aspect logistique, chaque zone de maintenance admet sa propre loi de durée de vie associée à son pas de maintenance optimal (18 mois pour le cluster 5 par exemple). Une extension à un seuil de rétro-réflexion minimal par cluster est possible et semble plus crédible pour la circulation d'un véhicule autonome.

La sensibilité du choix du seuil de rétro-réflexion minimal ou de la pénalité de maintenance corrective sur le pas de maintenance sont toutes les deux modélisées par des méthodes de régression classiques et affichent un critère R^2 de l'ordre de 0.93. Cependant, si une relation logarithmique fait consensus pour le contrôle de la pénalité corrective, une discussion doit être menée sur le contrôle du seuil minimal.

Le bénéfice d'une stratégie préventive est cependant discutable. Toujours pour un unique seuil de rétro-réflexion minimal de $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, la stratégie prédit une économie moyenne de 19%. Mais ce chiffre est très variable d'un cluster à l'autre. Le cluster 2 (partie Est de la RN4) observe le plus faible bénéfice (4%) tandis que le cluster 5 (échangeur de Sommesous) prédit la meilleure économie (35%) par rapport au tout correctif.

Cette stratégie convient parfaitement à une gestion plus "passive" de la maintenance de la signalisation horizontale. Cependant, le pas de maintenance ignore totalement la gestion globale d'une infrastructure routière. Par exemple, si le pas intervient en hiver, alors cette action a de très fortes chances d'être abandonnée pour des raisons logistiques.

5.5.2 Remplacement par bloc

Remplacement par zone

La table 5.3 synthétise le plan de maintenance préventif par bloc sous quatre hypothèses sur la RN4 :

- Un unique seuil de dégradation maximal ($150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$).
- Le budget de maintenance total est $B = 10000$.
- La répartition du budget est équitable en fonction de la taille des clusters.
- La pénalité de maintenance corrective est de l'ordre $r = 3$.

La table se présente en cinq colonnes : le cluster étudié, son seuil de dégradation maximal et son budget d'entretien associé, la loi de Weibull proposée par l'algorithme EM ainsi que son temps moyen entre deux remplacements ($MTBR$) puis le coût d'investissement par mois et le pas de maintenance préventif optimal au sens de la fonction coût (5.16).

TABLE 5.3 – Stratégie de maintenance préventive de la RN4 par bloc. Pénalité de maintenance corrective à $r = 3$ et unique seuil de rétro-réflexion à $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$.

Typography		Replacement Strategy		
Cluster - Number (Frequency)	Preventive Cost	Weibull distribution $\mathcal{W}(\alpha; \beta)$ - $MTBR$	Cost by time unit - $\frac{C(T^*)}{C(\infty)}$	Optimum replacement moment (Month) T^*
1 - 420 (43%)	4339	$\mathcal{W}(22.14; 1.82)$ - 20	707 - 80%	20 - (MTBR)
2 - 336 (35%)	3471	$\mathcal{W}(17.17; 1.39)$ - 16	734 - 83%	16 - (MTBR)
3 - 63 (7%)	651	$\mathcal{W}(18.6; 1.47)$ - 17	128 - 83%	17 - (MTBR)
4 - 112 (12%)	1157	$\mathcal{W}(23.63; 2.62)$ - 21	158 - 72%	15 - (Rausand)
5 - 37 (4%)	382	$\mathcal{W}(31.76; 2.73)$ - 28	38 - 70%	20 - (Rausand)
Global - 968 (100%)	10000	$\mathcal{W}(21.44; 1.7)$ - 20	1699 - 81%	19 - (MTBR)

Le formalisme proposé à la section 5.3.3 indique une règle de décision complexe (5.20). Cette dernière est précisée dans la table :

- "Rausand" indique que le pas est donné par la formule de Arnljot & Rausand (5.19).
- "MTBR" indique que le pas correspond au $MTBR$ (et par conséquent l'absence de coût préventif minimal).

Le comportement de la fonction coût (5.16) est très dépendant du cluster. Seuls les clusters

4 et 5 présentent un pas de maintenance différent du *MTBR*.

La figure 5.9 présente les fonctions de coûts asymptotiques (5.18) associées aux clusters 1 et 5. Tous deux présentent un pas de maintenance de 20 mois. Le premier est un cas où le remplacement par bloc est peu intéressant contrairement au second.

- Le pas de remplacement du cluster 1 est le *MTBR* associé à la loi $\mathcal{W}(22.14; 1.82)$. La fonction coût associée (Fig 5.9.(a)) est clairement décroissante sans présenter de coût minimal (autre qu'à horizon 40 mois correspondant à l'instant où la fonction de répartition est supérieure à 0.90).
- Le pas de remplacement du cluster 5 est établi par la formule directe de Rausand (5.19). La fonction coût associée (Fig 5.9.(b)) est décroissante entre 0 et 20 mois puis se stabilise à un coût asymptotique moyen de 70%.

Le comportement des fonctions coûts associées aux clusters 2 et 3 (et même sur l'ensemble des clusters) est comparable à celui du cluster 1 (Figure 5.9.(a)).

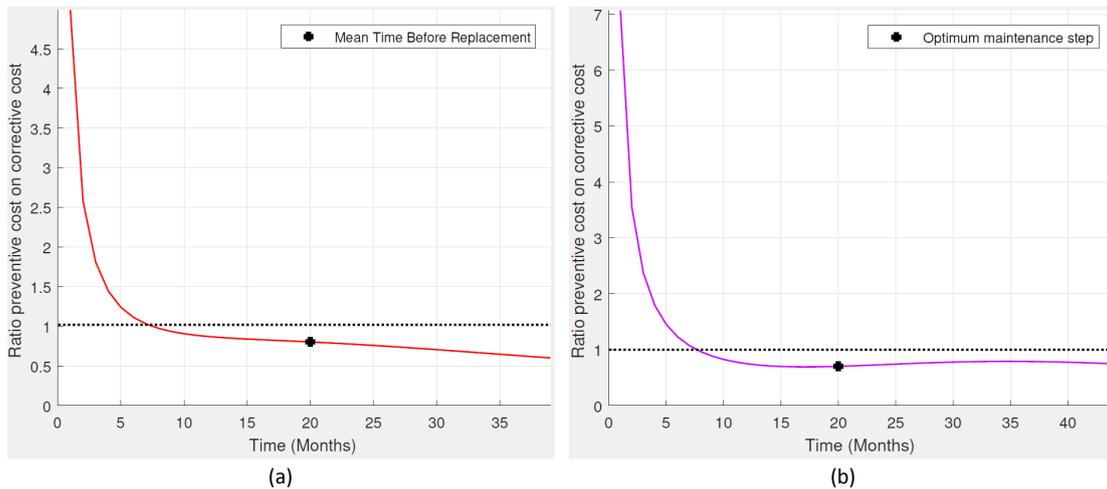


FIGURE 5.9 – Comparaison entre les fonctions coûts : (a) cluster 1, (b) cluster 5. Pénalité de maintenance corrective à $r = 3$ et unique seuil de rétro-réflexion à $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$.

Sur la globalité de la RN4, le modèle annonce une économie de l'ordre $100\% - 81\% = 19\%$. L'économie moyenne par cluster est de l'ordre de 22%. De ce point de vue, les approches sont équivalentes. L'économie réalisée sur les clusters 1, 2 et 3 est de l'ordre de 18% en moyenne. Les clusters 4 et 5 affichent la meilleure économie : 29% en moyenne. Finalement, lorsque le minimum de la fonction coût est bien défini, alors le bénéfice économique est non négligeable. Dans le cas contraire, elle dépendra pleinement de l'algorithme WEM et le *MTBR* associé à la loi proposée.

L'accumulation d'exemples présentant par défaut le *MTBR* comme pas de maintenance préventive est une régression vis-à-vis de la stratégie de maintenance par rapport à l'âge. Toujours sous l'hypothèse d'une pénalité corrective d'ordre $r = 3$ et d'un seuil minimal $L = 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, les clusters 4 et 5 sont les seuls à bénéficier pleinement de la stratégie par bloc. Le pas de maintenance associé au cluster 4 est de 15 mois dans la stratégie de maintenance par bloc (Table 5.3) et est de 13 pour la stratégie par rapport à l'âge (Table 5.2). Le cluster 5 quant à lui présente un pas de 20 mois pour la stratégie par

bloc (Table 5.3) et 18 mois par rapport à l'âge (Table 5.2). À deux mois près, les stratégies de maintenance sont comparables.

Sensibilité au seuil de rétro-réflexion minimal

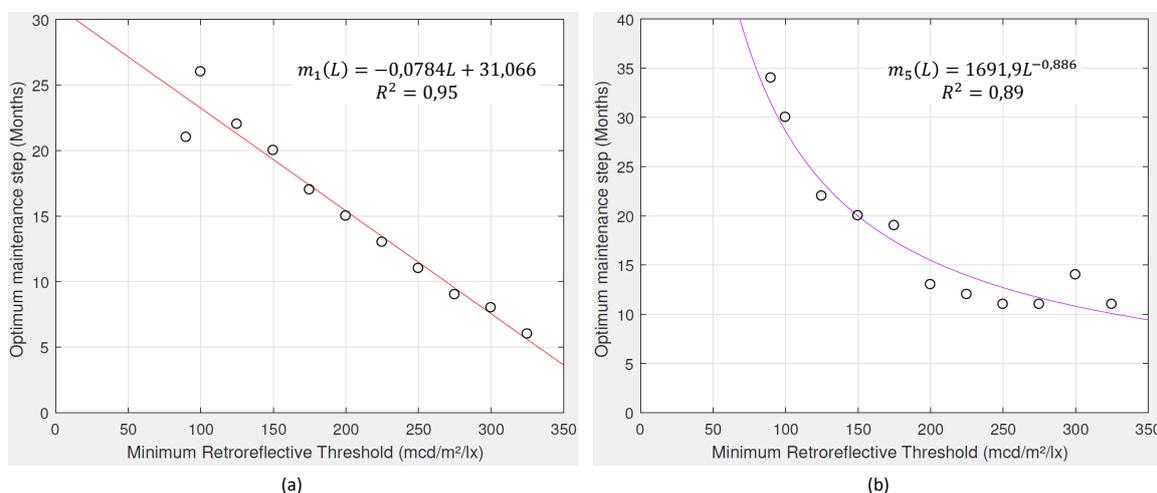


FIGURE 5.10 – Pas de maintenance en fonction du seuil de rétro-réflexion minimal L avec $r = 3$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.

Le choix du seuil minimal de rétro-réflexion est l'un des principaux paramètres d'entrée du modèle de maintenance par bloc. Contrairement aux coûts de maintenance, ce seuil est laissé aux choix des gestionnaires des infrastructures. Sous l'hypothèse d'une pénalité correctrice d'ordre $r = 3$ avec un seuil minimal $L = 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, le cluster 3 (contournement de Sézanne) présente par défaut un pas de maintenance correspondant à son *MTBR*. En revanche sous le seuil minimal de $L = 100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, le pas de maintenance optimal est de 17 mois contre un *MTBR* de 30 mois. La sensibilité à ce seuil est de fait important à maîtriser.

Pour chaque cluster C_j , une fonction (dite de "pas") m_j est approchée par une méthode de régression fonction du seuil de rétro-réflexion minimal L . La figure 5.10 présente les fonctions adaptées aux clusters 1 et 5 avec une pénalité correctrice d'ordre $r = 3$. Le pas de maintenance associé aux deux clusters est clairement décroissant par rapport au seuil de rétro-réflexion minimal. Cependant, le modèle de régression est différent : linéaire pour le cluster 1 et non-linéaire pour le cluster 5.

La sensibilité du pas de maintenance face au choix du seuil de rétro-minimal est modélisable et n'est pas parasitée par la complexité des règles de décision d'une stratégie préventive par bloc. Les modèles observés sont proches de ceux observés avec la stratégie préventive par rapport à l'âge. Par exemple, une relation linéaire modélise la sensibilité du cluster 1.

Sensibilité à la pénalité de maintenance correctrice

Le cluster 2 met en échec la stratégie de maintenance par bloc. Pour une pénalité correctrice fixe d'ordre $r = 3$, aucun seuil de rétro-réflexion minimal recommandant un

pas de maintenance autre que le *MTBR* n'est pas établi. Sous le seuil minimal de $L = 150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, un pas préventif (autre que le *MTBR*) est proposé seulement si $r > 20$. De la même façon, une modélisation de la sensibilité à la pénalité de maintenance corrective r sur le pas de maintenance est proposée. Pour chaque cluster C_j , une fonction (dite de pas) m_j est approchée par une méthode de régression fonction de la pénalité de maintenance r pour un seuil de rétro-réflexion minimal de $L = 150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$. La figure 5.11 présente les modèles associés aux clusters 1 et 5.

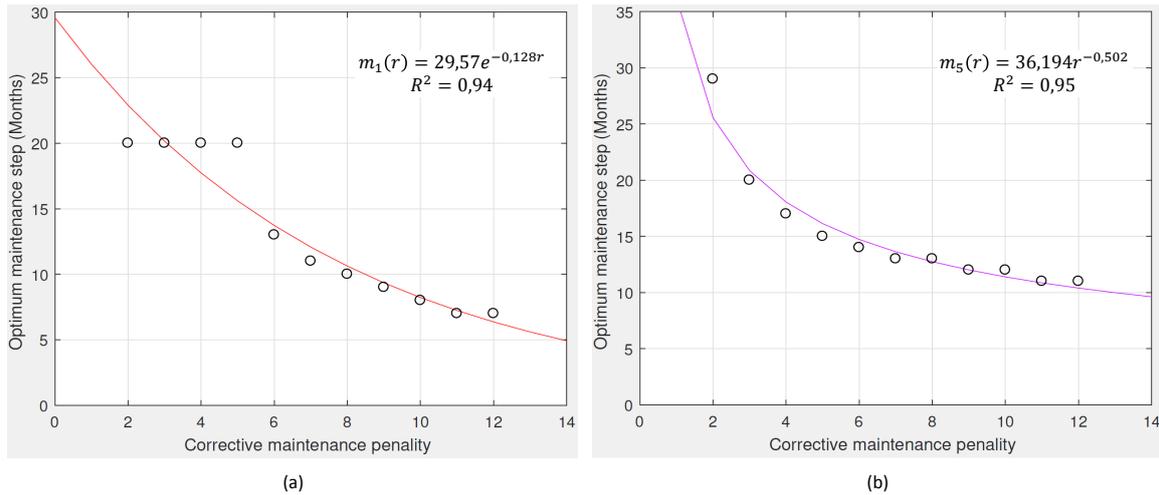


FIGURE 5.11 – Pas de maintenance en fonction de la pénalité de maintenance corrective r avec $L = 150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.

Sans surprise, le pas de maintenance est décroissant par rapport à la pénalité corrective r . Avec un critère R^2 moyen de l'ordre de 0.945, les fonctions offrent une bonne prédiction du pas de maintenance. Le type de régression dépend du cluster : un modèle exponentiel pour le cluster 1 et un modèle non-linéaire pour le cluster 5.

Le modèle exponentiel m_1 présente une observation atypique. Si $r \leq 5$, alors le pas de maintenance observé est égal à 20 mois et correspond au *MTBR* de la loi de durée de vie associée $\mathcal{W}(22.14; 1.82)$. Ces quatre observations orientent pleinement le modèle vers une relation exponentielle. Si $r > 5$, alors le pas de maintenance est donné par la formule de Arljnot & Rausand. À l'échelle de ce cluster avec $L = 150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, la stratégie par bloc est pertinente lorsque $r > 5$.

La sensibilité du pas de maintenance face à la pénalité de maintenance corrective r est modélisable. Cependant, le modèle est parasité par la complexité des règles de décision d'une stratégie préventive par bloc. Par exemple, pour un seuil minimal de rétro-réflexion de $L = 150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, la stratégie est pertinente à l'échelle du cluster 1 si $r > 5$. Par conséquent, pour un seuil minimal de rétro-réflexion, la stratégie de maintenance préventive par bloc est généralement pertinente si la pénalité corrective est élevée.

Synthèse et conclusions

Pour les applications considérées dans ce chapitre, il en ressort que, du point de vue de l'échéancier de maintenance, le remplacement par bloc propose dans le meilleur des cas

une stratégie similaire au remplacement par rapport à l'âge. Sinon, le pas de maintenance préventif correspond au *MTBR* de la loi de Weibull associée à la zone de maintenance stratégique. De ce fait, la stratégie de maintenance préventive par rapport à l'âge est mieux adaptée pour l'entretien d'une ligne de marquages.

Les deux principaux clusters de la RN4 montrent que le remplacement par bloc est pertinent si le niveau de rétro-réflexion minimal est faible ou si les coûts de maintenances correctives sont particulièrement élevés. La stratégie de maintenance par rapport à l'âge ne présentant pas de condition particulière sur ces deux paramètres, cette dernière est plus généraliste.

La littérature montre que le remplacement par bloc est plus adapté lorsque des réparations ou le remplacement par des pièces de rechange sont possibles entre deux échéances de maintenance. Actuellement, il n'existe pas de produit de marquage pouvant être qualifié de rechange et il n'existe pas de technique de réparation autre que le remplacement. Si une telle technologie venait à se développer, alors la stratégie de maintenance par bloc constituerait une alternative crédible à la stratégie par rapport à l'âge.

5.5.3 Remplacement conditionné par la dégradation courante

Un exemple de loi gamma de référence

Le cluster 1 de la RN4 s'étend sur l'ensemble de la ligne axiale et est le plus important. L'historique de maintenance estimé indique 23 cycles de vie de longueurs très variables entre 1 et 7 ans (Section 3.3.4).

La loi de dégradation ΔY associée est modélisée par la méthode du maximum de vraisemblance. Les données d'apprentissage sont établies à partir des cycles de vie ayant bénéficié d'au moins deux campagnes d'inspection. 17 cycles respectent cette condition, ce qui correspond à 2272 exemples de variations de rétro-réflexion d'une année. Finalement, le maximum de vraisemblance propose la loi $\gamma(1.08; 87.47)$. La vitesse de dégradation moyenne (entre deux inspections) est de $1.08 \times 87.47 = 94.4676 \text{ mcd}/m^2/lx$.

Le nombre moyen d'inspections par cycle est de 4. Le plus haut niveau de rétro-réflexion moyen observé à la première inspection est de $469 \text{ mcd}/m^2/lx$. Cette valeur est interprétée comme le niveau de rétro-réflexion à neuf des marquages. Si le seuil de rétro-réflexion minimal est de $150 \text{ mcd}/m^2/lx$, alors le seuil de dégradation préventif est $319 \text{ mcd}/m^2/lx$.

Remplacement par zone

La table 5.4 synthétise le plan de maintenance conditionné à la dégradation courante sous cinq hypothèses sur la RN4 :

- Un unique seuil de dégradation maximal ($150 \text{ mcd}/m^2/lx$).
- Le budget de maintenance total est $B = 10000$.
- La répartition du budget est équitable en fonction de la taille des clusters.
- La pénalité de maintenance corrective est de l'ordre de $r = 3$.
- Le coût unitaire d'inspection est $c_{ins} = 5$.

TABLE 5.4 – Stratégie de maintenance conditionnée à la dégradation courante.
Pénalité de maintenance corrective : $r = 3$; coût d'inspection unitaire : $c_{ins} = 5$; seuil de rétro-réflexion minimal : $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$; Budget $B = 10000$ réparti équitablement.

Typography			Replacement strategy		
Cluster - Number (Frequency)	Average Initial Retroreflective ($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$)	Average Number of Inspections	γ distribution - Speed Deterioration ($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$)	Cost by time unit - $\frac{C_{CB}(Y_p)}{C_{CB}(Y_c)}$	Preventive Threshold ($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$) Y_p
1 - 420 (43%)	469	4	$\gamma(1.08; 87.47)$ - 94	3764 - 67%	346
2 - 336 (35%)	364	4	$\gamma(1.15; 66.95)$ - 77	3415 - 70%	291
3 - 63 (7%)	414	3	$\gamma(0.92; 148.25)$ - 136	843 - 77%	322
4 - 112 (12%)	509	3	$\gamma(1.34; 114.42)$ - 153	1287 - 72%	408
5 - 37 (4%)	563	3	$\gamma(1.25; 181.19)$ - 226	519 - 79%	454
Global - 968 (100%)	464	3	$\gamma(1.04; 97.64)$ - 102	9220 - 69%	347

La table se présente en six colonnes : le cluster étudié, son niveau de rétro-réflexion à neuf (estimé par le haut niveau moyen observé à la première inspection), le nombre moyen d'inspections (longueur moyenne des cycles), la loi de dégradation $\gamma(\alpha\tau; \beta)$ associée à sa vitesse de dégradation (modélisée par le maximum de vraisemblance), le coût de maintenance préventive associé à son seuil préventif de maintenance (prédit par la fonction coût de maintenance (5.25)).

Exemple : la portion de ligne associée au cluster 1 observe un niveau de rétro-réflexion à neuf de $469 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, est inspectée 4 fois en moyenne par cycle, sa loi de dégradation est $\gamma(1.08; 87.47)$, sa vitesse de dégradation moyenne est $94 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ par an et son seuil préventif est $346 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ pour un coût de 3764.

Le niveau de rétro-réflexion à neuf est particulièrement volatile : 364 à $563 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Sous l'hypothèse qu'un même produit de marquage est systématiquement posé, cette observation peut s'expliquer par une maintenance imparfaite³. Mécaniquement, les seuils de maintenance préventifs dépendent pleinement du cluster. Par exemple, le cluster 2 présente le plus faible niveau de rétro-réflexion à neuf ($364 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$) et seuil préventif ($291 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$). Sa vitesse de dégradation moyenne est en revanche la plus lente : $77 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ par an.

L'économie par rapport à la stratégie du tout correctif, et au sens la fonction coût asymptotique (5.27), est de $100\%-69\%=31\%$ sur la globalité de la RN4. L'économie moyenne par cluster est similaire : 27%. La segmentation de la RN4 optimise cette économie uniquement à l'échelle du cluster 1 (33%).

Reste à contrôler la sensibilité du modèle face au seuil de rétro-réflexion minimal et à la pénalité corrective.

Sensibilité au seuil préventif

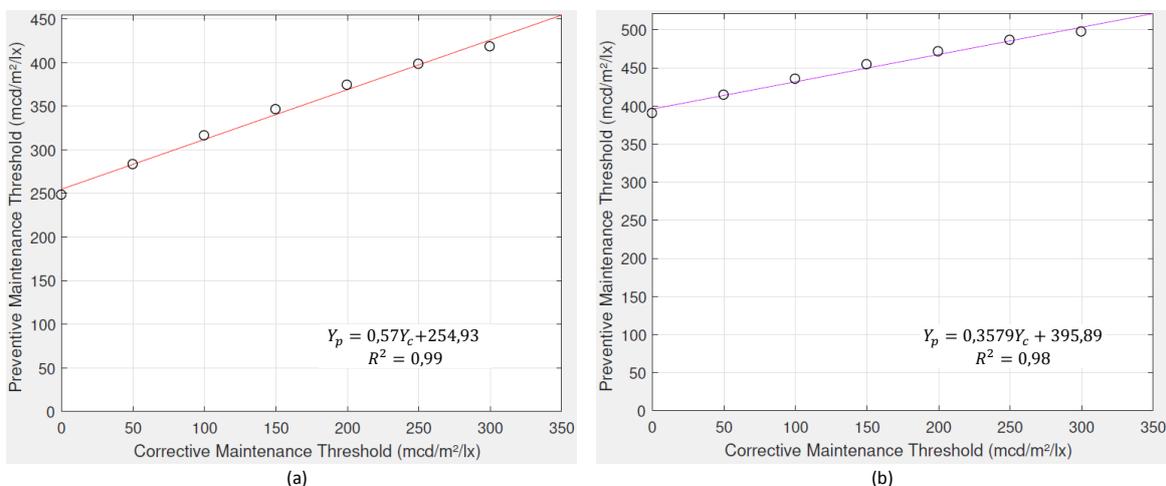


FIGURE 5.12 – Seuil préventif Y_p en fonction du seuil correctif Y_c : (a) cluster 1, (b) cluster 5.

3. Imperfections dues notamment aux conditions d'applications (machine applicateur ou la météo par exemple) et l'imperfection des mesures (moyenne filtrée sur 100 m dans le cas d'Ecodyn par exemple)

Pour chaque cluster C_j , une fonction (dite de seuil) m_j est approchée par une méthode de régression fonction du seuil de maintenance correctif Y_c . La figure 5.12 présente les fonctions adaptées aux clusters 1 et 5 avec une pénalité corrective d'ordre $r = 3$, un coût unitaire d'inspection $c_{ins} = 5$ et un budget $B = 10000$ réparti équitablement. Sans surprise, le seuil préventif est croissant par rapport au seuil correctif. Avec un critère R^2 de l'ordre de 0.98, les relations logarithmiques m_1 et m_5 proposent une bonne prédiction de Y_p en fonction de Y_c .

Sensibilité à la pénalité de maintenance corrective

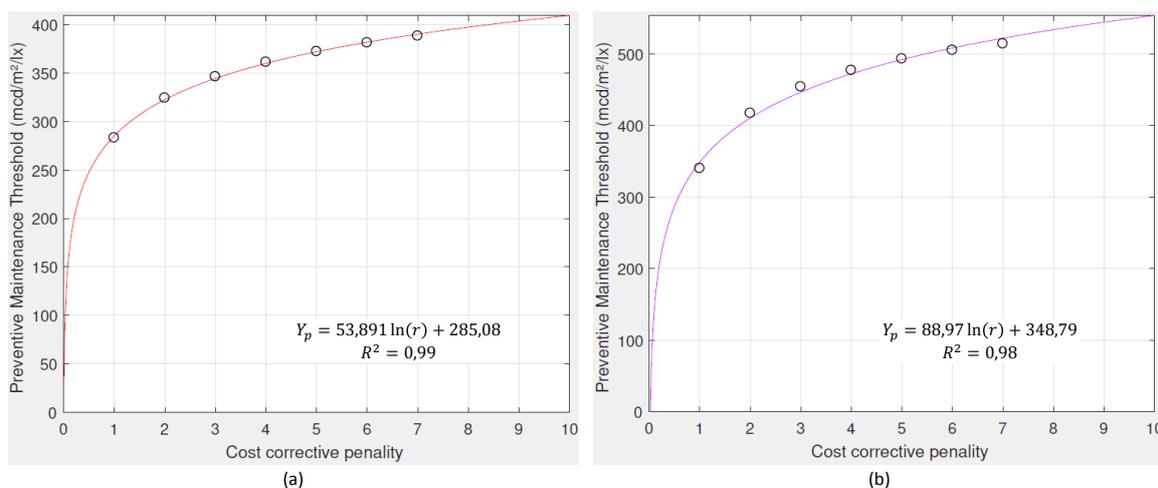


FIGURE 5.13 – Pas de maintenance en fonction de la pénalité de maintenance corrective r avec $L = 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$: (a) cluster 1, (b) cluster 5.

Pour chaque cluster C_j , une fonction (dite de seuil) m_j est approchée par une méthode de régression fonction de la pénalité de maintenance corrective r . La figure 5.12 présente les fonctions adaptées aux clusters 1 et 5. Le seuil de maintenance correctif Y_c est fixé à $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, le coût unitaire d'inspection à $c_{ins} = 5$ pour un budget $B = 10000$ réparti équitablement. Le seuil préventif Y_p est également croissant par rapport à la pénalité r . Avec un critère R^2 de l'ordre de 0.98, les relations logarithmiques m_1 et m_5 proposent une bonne prédiction de Y_p en fonction de r .

Synthèse et conclusions

Pour les applications considérées dans ce chapitre, il en ressort que la stratégie CBM⁴ est une alternative crédible à la stratégie par rapport à l'âge. Tous les deux proposent des plans de maintenance crédibles à l'échelle de la RN4. La principale différence est que la stratégie CBM établit un seuil de dégradation préventif. La veille sur ce paramètre permet de mieux anticiper la dégradation et limiter les effets de sur-maintenance.

Un aspect peu abordé est la fréquence des inspections. Dans une stratégie par rapport à l'âge, la fréquence des campagnes d'inspection réduit la censure des durées de vie des marquages. Une inspection régulière limiterait les effets de défaillances groupées observés

4. Acronyme standard de Condition Based Maintenance

dans le test de Kolmogorov-Smirnov (Section 4.4.2). Dans la stratégie CBM, le pas d'inspection est un élément central à la modélisation. Un plan d'inspection espacé oriente le modèle de maintenance vers un seuil préventif très élevé. A l'échelle de la RN4, les seuils préventifs proposés sont équivalents à des marquages neufs ou faiblement dégradés.

À ce stade, les stratégies CBM et par rapport à l'âge sont équivalents. Une comparaison entre ces deux approches est nécessaire afin d'établir laquelle est la plus adaptée.

5.5.4 Comparaison

La stratégie de maintenance conditionnée par la dégradation courante (CBM) propose des échéances de maintenance à l'inspection près tandis que la stratégie (préventive) par rapport à l'âge propose des échéances fixes et à respecter afin de garantir la minimisation des coûts à long terme. Cette dernière pose le problème des conflits de calendrier de gestion courante de l'infrastructure. Par exemple, si l'échéance intervient au cours de l'hiver, alors la maintenance peut s'avérer difficile voire impossible. De ce point de vue, la stratégie CBM est plus souple car le gestionnaire d'infrastructure dispose d'un intervalle de temps pour réaliser la maintenance.

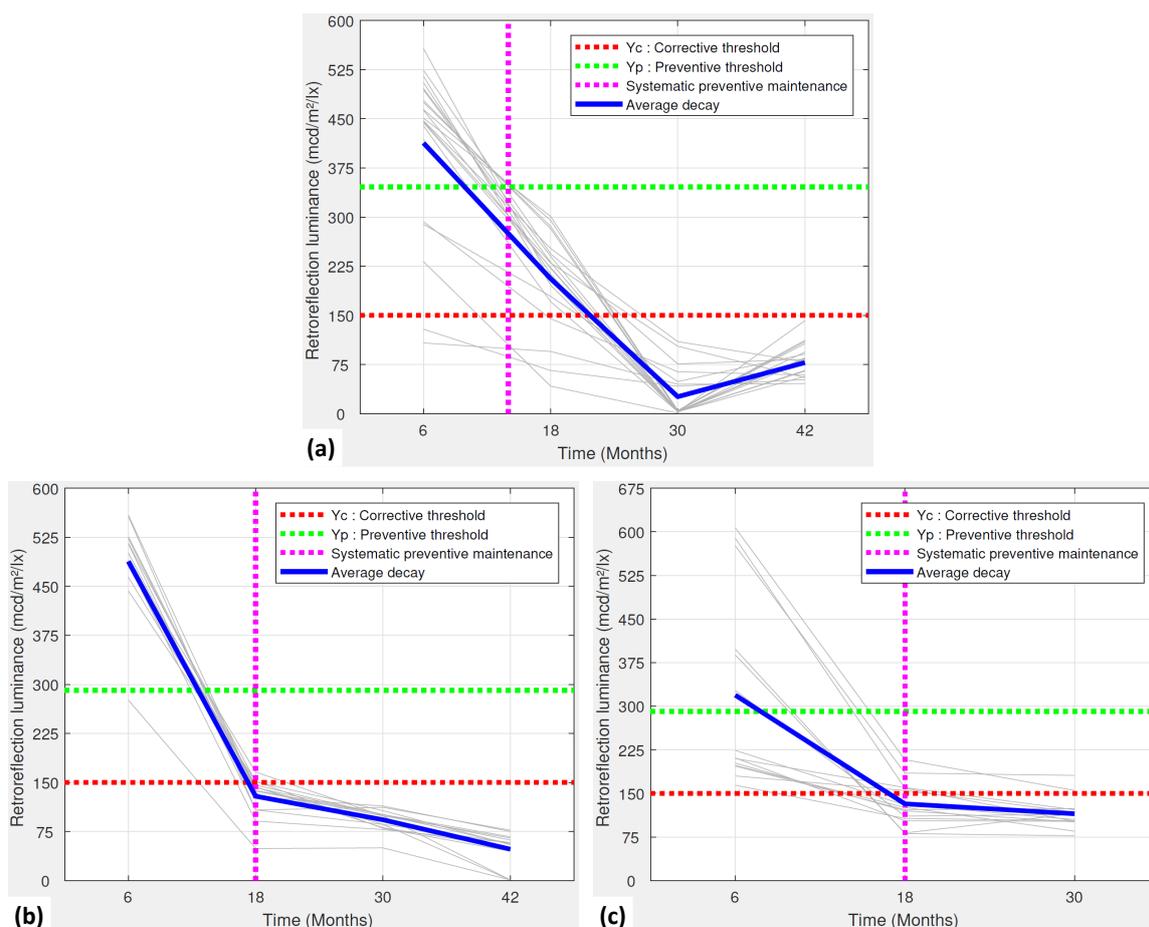


FIGURE 5.14 – Comparaison entre la stratégie préventive par rapport à l'âge et CBM : (a) Cycle 2008-2012 du cluster 1, (b) Cycle 2008-2012 du cluster 2, (c) Cycle 2011-2014 du cluster 2.

Reste la question de la robustesse de ces deux modèles au sein de la RN4. En effet,

les tables 5.2 et 5.4 proposent des plans de maintenance mais rien n'indique s'ils sont en adéquation avec les données de retour d'expérience. Pour cela, des cycles de vie de référence sont sélectionnés au sein des clusters de la RN4. Les deux critères de sélection retenus sont le nombre de marquages présents sur le cycle et la cohérence temporelle entre les cycles candidats. Les neuf cycles retenus sont :

1. Cycle 2008 - 2012 du cluster 1,
2. Cycle 2011 - 2015 du cluster 1,
3. Cycle 2008 - 2012 du cluster 2,
4. Cycle 2011 - 2014 du cluster 2,
5. Cycle 2011 - 2014 du cluster 3,
6. Cycle 2008 - 2012 du cluster 4,
7. Cycle 2008 - 2012 du cluster 5,
8. Cycle 2008 - 2012 sur l'ensemble des Clusters,
9. Cycle 2011 - 2014 sur l'ensemble des Clusters.

Pour rappel, "Cycle 2008 - 2012" signifie que les marquages sont posés en mars 2008 et remplacés en mars 2012 et qu'ils ont bénéficié de quatre inspections en Septembre 2008, 2009, 2010 et 2011. Dans tous les cas, le budget d'entretien de la RN4 est de 10000 et est réparti équitablement en fonction de la taille des clusters. Le coût unitaire d'inspection est de 5 et la pénalité de maintenance corrective est d'ordre $r = 3$. Le seuil de rétro-réflexion minimal est de $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$.

La figure 5.14 présente les trois cycles de vie dont la décision de maintenance est équivalente (en accord avec les plans présentés aux tables 5.2 et 5.4). Dans tous les cas, la stratégie CBM recommande un remplacement à partir de 18 mois (et à réaliser avant le trentième mois) A l'échelle du Cycle 2008-2012 du cluster 1 (Fig 5.14.(a)), le remplacement systématique recommande un pas fixe de 14 mois. Les deux stratégies sont équivalentes : le nombre de marquages défaillants est similaire entre 14 et 18 mois et le niveau de dégradation à 14 mois est estimé par linéarisation. Le pas de remplacement systématique du cluster 2 (Fig 5.14.(b) et 5.14.(c)) est de 18 mois qui correspond également à la seconde inspection. Cette configuration explique la cohérence des stratégies par rapport à l'âge et CBM.

En théorie, l'action de maintenance préventive et systématique est réalisée à 14 ou 18 mois tandis que l'action de maintenance conditionnelle est à réaliser à partir de 18 mois et avant 30 mois. Dans ces trois exemples, le remplacement systématique aurait permis une restauration immédiate des marquages défaillants et un rétablissement de la rétro-réflexion moyenne supérieure à $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, quitte à accepter d'importants cas de sur-maintenance sur le Cycle 2008 - 2012 du cluster 1 (Fig 5.14.(a)). Cette observation indique que si un gestionnaire d'infrastructure souhaite suivre la stratégie CBM, alors il doit assurer une réactivité dans la décision de maintenance à l'horizon des inspections.

Le cycle 2011 - 2014 du cluster 2 (Fig 5.14.(c)) présente à 6 mois (première inspection) un niveau de rétro-réflexion moyen de $319 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ ce qui est proche du seuil préventif

(276 $mcd/m^2/lx$). Cet exemple montre le besoin d'un risque afin d'apprécier la probabilité que la dégradation moyenne soit inférieure au seuil préventif. Le principal intérêt est la planification éventuelle d'une action de maintenance à l'inspection suivante.

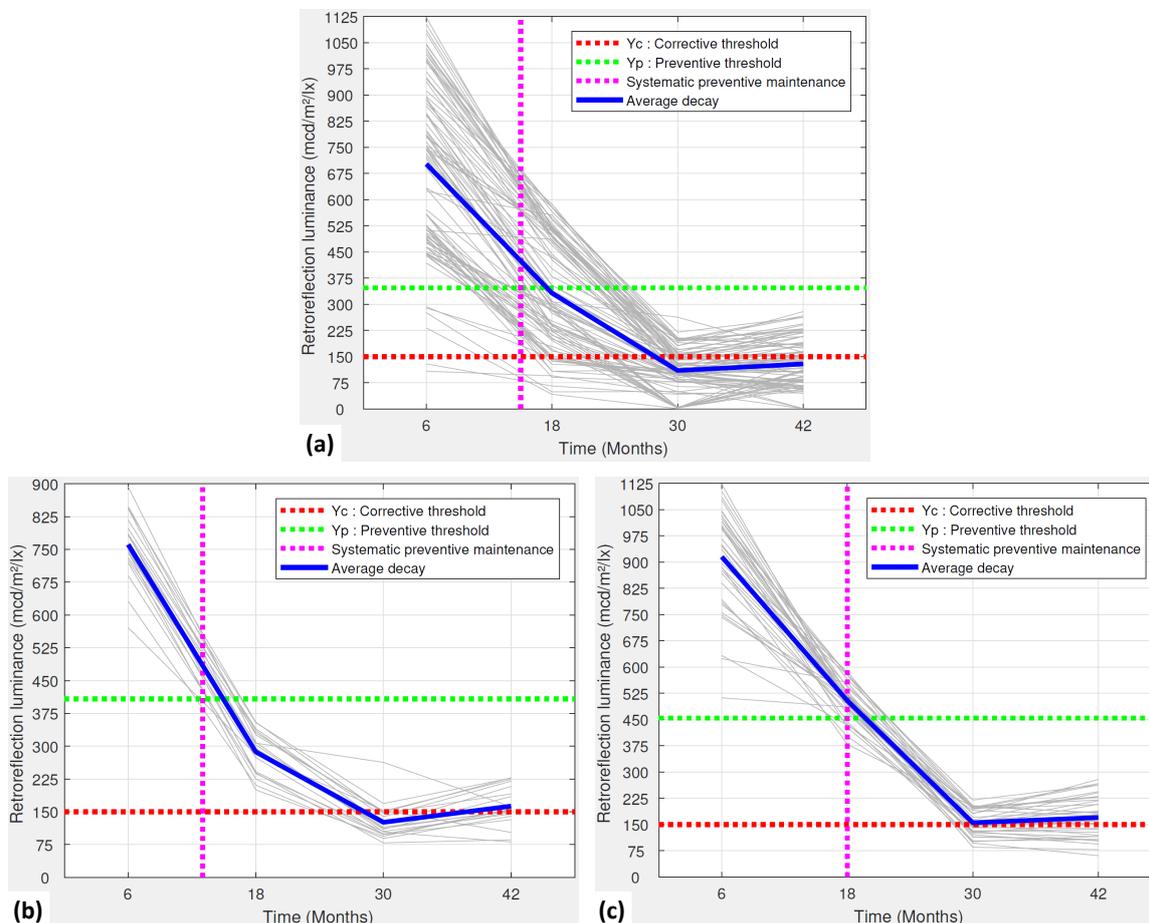


FIGURE 5.15 – Comparaison entre la stratégie préventive par rapport à l'âge et conditionnée à la dégradation courante : (a) Cycle 2008-2012, (b) Cycle 2008 - 2012 du cluster 4, (c) Cycle 2008 - 2012 du cluster 5.

La figure 5.15 présente trois exemples où la stratégie CBM est plus intéressante que celle par rapport à l'âge. Dans tous les cas, la stratégie préventive et systématique conduit à un important phénomène de sur-maintenance. Par exemple, la rétro-réflexion moyenne à l'horizon du pas préventif est supérieure au seuil d'intervention préventif du CBM. Pour les cycles 2008 - 2012 du cluster 4 et 5 (Fig 5.15.(b) et 5.15.(c)), les défaillances apparaissent au moins un an plus tard. Le Cycle 2008-2012 (Fig 5.15.(a)) soulève la question de l'acceptabilité de marquages défaillants : la stratégie CBM conduit à un remplacement entre 18 et 30 mois mais 16% des marquages sont défaillants à 18 mois et 75% le sont à l'inspection suivante (30 mois). Une réactivité dans le choix de la date de remplacement entre 18 et 30 mois doit être prise.

La figure 5.16 présente deux exemples où la stratégie par rapport à l'âge est plus intéressante que CBM. Dans les deux cas, le pas de maintenance préventif correspond aux premiers cas de marquages défaillants. La stratégie CBM reste cependant acceptable sous

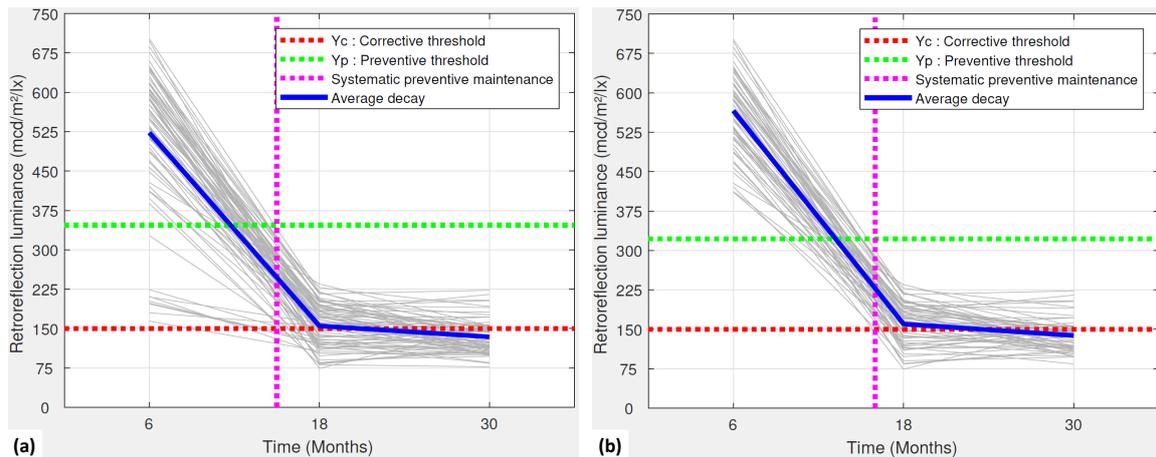


FIGURE 5.16 – Comparaison entre la stratégie préventive par rapport à l'âge et conditionnée à la dégradation courante : (a) Cycle 2011 - 2014, (b) Cycle 2011 - 2014 du cluster 3.

réserve de l'acceptabilité de marquages défaillants et d'une réactivité pour la campagne de remplacement entre 18 et 30 mois.

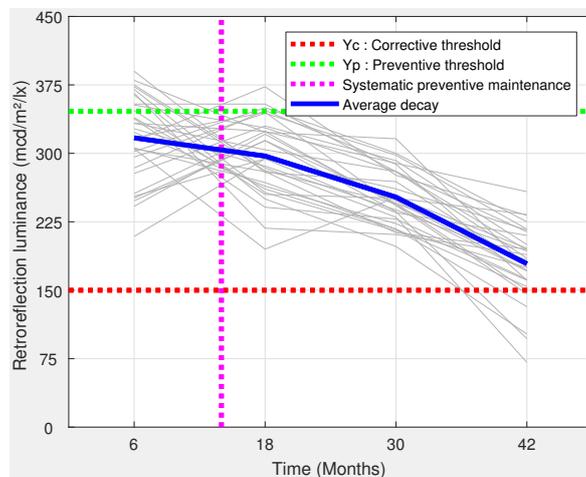


FIGURE 5.17 – Comparaison entre la stratégie préventive par rapport à l'âge et conditionnée à la dégradation courante sur le Cycle 2011 - 2015 du cluster 1.

La figure 5.17 présente un cas où les stratégies par rapport à l'âge et CBM sont inadaptées. La raison principale est l'évolution globale de la rétro-réflexion. En comparaison avec les cycles présentés aux figures 5.14, 5.15 et 5.16, le Cycle 2011 - 2015 du cluster 1 est atypique : décroissance lente sur trois ans, présence de croissances faibles et ponctuelles de la rétro-réflexion et très peu de marquages défaillants à horizon 42 mois. Par conséquent, les deux stratégies de maintenance conduisent à une campagne de sur-maintenance. Cet exemple montre également que les stratégies de maintenance ne sont pas capables de s'adapter à un cycle de vie atypique.

5.6 Synthèse et conclusions

Dans ce chapitre, trois stratégies de maintenance préventive classiques ont été proposées : le remplacement systématique par rapport à l'âge, le remplacement systématique par bloc et le remplacement conditionné par la dégradation courante (CBM). Les deux premières consistent à proposer un pas de maintenance préventif garantissant un compromis optimum entre le risque de défaillance et le coût de maintenance préventive. La principale différence est que le remplacement préventif par rapport à l'âge décale l'échéancier en fonction de l'apparition des actions correctives. Le remplacement par bloc ne modifie pas l'échéancier. La stratégie CBM propose de surveiller à chaque inspection l'évolution moyenne de la rétro-réflexion par rapport à un seuil (de maintenance) préventif et correctif. Si la rétro-réflexion moyenne est inférieure au seuil préventif, alors une campagne préventive est à planifier avant la prochaine inspection. Si la rétro-réflexion moyenne est inférieure au seuil correctif, alors les marquages sont globalement défaillants et un remplacement correctif est à organiser d'urgence.

La stratégie de maintenance par bloc est la moins adaptée des trois. Dans le meilleur des cas, elle coïncide avec le remplacement préventif par rapport à l'âge. Sinon, elle correspond à un remplacement préventif à l'horizon du MTBR c'est-à-dire la stratégie préventive naïve. Cependant, s'il devient possible de "réparer un marquage" ou si une technologie de "marquage de rechange" venait à apparaître, alors la stratégie par bloc offrirait des solutions supplémentaires face aux stratégies par rapport à l'âge ou CBM.

La comparaison des stratégies par rapport à l'âge et CBM montre que les deux sont crédibles à l'échelle de la RN4. Le Cycle 2008 - 2012 montre que la stratégie CBM est plus adaptée tandis que le Cycle 2011 - 2014 privilégie la stratégie par rapport à l'âge. Cependant, la stratégie CBM est davantage en adéquation avec les pratiques de maintenance actuelles. Par ailleurs, cette dernière présente plusieurs perspectives : introduction d'un risque de défaillance avant la prochaine inspection (la durée de vie résiduelle par exemple), estimation de la date de maintenance optimale entre deux inspections consécutives données ou élaboration d'un plan d'inspection en fonction de la dégradation (CASTANIER 2001). Finalement, même si le consensus sur le choix du modèle n'est pas clairement établi, la stratégie CBM présente plusieurs avantages sur la stratégie par rapport à l'âge.

La stratégie de remplacement par rapport à l'âge propose le plan de maintenance le plus aisé à mettre en œuvre : le gestionnaire d'infrastructure doit organiser une campagne de maintenance tous les T unités de temps. Elle autorise une gestion plus "passive" de la maintenance. Les deux principaux inconvénients sont l'inadéquation avec le plan d'inspection courant et la non prise en compte de l'exploitation de l'infrastructure routière. La première conduit à une difficulté supplémentaire à détecter une défaillance généralisée à temps et introduit le risque d'accepter des marquages insuffisamment rétro-réfléchissants. La seconde peut conduire, par exemple, à des actions de maintenance en hivers qui restent délicates à mettre en œuvre.

La stratégie CBM est la plus en adéquation avec les pratiques d'inspection actuelles et celle qui s'adapte le mieux à la "réalité terrain". En effet, chaque inspection analyse

la rétro-réflexion moyenne d'une zone de maintenance et évalue l'opportunité de maintenance à réaliser avant la prochaine inspection. Cependant, cette stratégie étant précise à l'inspection près, elle est la plus gourmande en action d'inspection. La fréquence des inspections impacte pleinement la définition du seuil de maintenance préventif. A l'échelle de la RN4, les inspections annuelles couplées à une dégradation rapide les 24 premiers mois conduisent à des seuils supérieurs à $300 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$. Or ce niveau de rétro-réflexion est comparable à un marquage neuf ou faiblement dégradé. Par ailleurs, cette stratégie offre davantage de perspectives. Par exemple, une optimisation de la fréquence d'inspection ou une alternative basée sur une inspection séquentielle sont envisagées.

La segmentation d'un réseau routier en zones stratégiques de maintenance a l'avantage de présenter différents plans de maintenance calibrés sur une zone géographique précise tout en prenant compte de la durée de vie des marquages et son mode de dégradation. D'un point de vue logistique, un gestionnaire d'infrastructure ne se verra pas obligé de fermer la totalité de l'infrastructure et pourra répartir dans le temps les actions de maintenance sur des zones précises. Les stratégies retenues répondent à cette logique : chaque cluster de la RN4 dispose de son propre pas ou seuil de maintenance préventif. Le Cycle 2008 - 2012 montre même que la stratégie CBM est optimisée par la segmentation, en particulier le cluster 5. Cependant, la segmentation induit une diminution des économies de l'ordre de 6% pour le remplacement par rapport à l'âge et 4% pour le CBM.

Conclusions et perspectives

Le premier objectif de ces travaux de thèse était le développement d'outils d'aide à la maintenance des marquages routiers rétro-réfléchissants. Cette demande était en partie motivée par l'arrivée des véhicules autonomes qui, pour se déplacer, analyseront la signalisation horizontale routière. La technologie courante orienta grandement ces travaux vers l'exploitation de données de rétro-réflexométrie qui sont à la base de la littérature scientifique dédiée aux marquages de ces trente dernières années.

Une étude bibliographique met en évidence une importante production de modèles de dégradation basés sur des méthodes de régression. Le consensus est d'expliquer le niveau de rétro-réflexion d'un marquage a minima par son âge. Ces propositions soulèvent encore aujourd'hui de nombreuses interrogations : le choix de la méthode de régression, les paramètres explicatifs pertinents, la robustesse volatile des modèles, le manque de souplesse face à la réalité terrain... Face à ces interrogations, une rupture scientifique, encouragée en grande partie par l'analyse de Weibull de (SATHYANARAYANAN et al. 2008) et les travaux de maintenance de (CASTANIER 2001), fut donc entreprise dans cette thèse.

Pour commencer, une formalisation de la base de suivi de la rétro-réflexion d'une ligne de marquages a été proposée. Face aux données d'inspection manquantes et l'indisponibilité de l'historique de maintenance, des estimateurs basés sur la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été proposés. Cette classification fut privilégiée car elle permettait une discussion autour du nombre de cluster. La reconstruction des inspections manquantes s'est basée quant à elle sur la dégradation locale. Cette approche était finalement plus adaptée à la correction de bruit blanc (nécessairement présent dans les données de mesure). L'annexe B montre qu'une telle approche est inadaptée lorsque le plan d'inspection est ciblé car la notion de localité est poussée à l'extrême.

La base de suivi réalisée, une CAH de celle-ci a mis en évidence différentes zones géographiques. Chaque zone est définie par son historique de maintenance et sa dynamique de dégradation. A l'échelle de la RN4 ou d'un réseau autoroutier (Cf Annexe B), une représentation cartographique montre que les clusters sont corrélés à la présence d'un échangeur, d'une agglomération ou encore d'un contournement. Ces premiers résultats ont motivé le choix d'un modèle de maintenance par zone.

L'annexe A introduit une première contextualisation des données d'inspection, en particulier l'organisation de l'infrastructure (2×1 ou 2×2 voies par exemple). Une analyse factorielle semble montrer que les éléments caractérisant l'infrastructure sont corrélés au mode de dégradation de la signalisation horizontale. Ces premiers résultats encouragent

un découpage plus fin de l'infrastructure et définir les zones stratégiques de maintenance par l'infrastructure et non selon le mode de dégradation des marquages. L'apport de la contextualisation encourage également le développement d'un réseau de neurones comparable à (KARWA et DONNELL 2011). L'objectif premier est de proposer une alternative à la reconstruction de données d'inspection manquantes.

A l'échelle d'une zone, le premier modèle de maintenance envisagé fut le remplacement systématique par rapport à l'âge. Cette stratégie est la suite logique des travaux introduit par (SATHYANARAYANAN et al. 2008) et a l'avantage de proposer un pas de maintenance optimal pour un gestionnaire d'infrastructure. Ce plan de maintenance est basé sur une loi de durée de vie des marquages. (SATHYANARAYANAN et al. 2008) ont proposé de l'établir par une loi de Weibull modélisée par la méthode du Maximum de Vraisemblance (MV). C'est donc l'approche qui a été considérée dans cette thèse.

Toutefois, les pratiques d'inspection des chaussées actuelles induisent nécessairement des durées de vie censurées. La méthode MV peut être reformulée afin de prendre cette problématique en compte. Cependant, cette démarche entraîna des calculs plus complexes ainsi que des risques de divergence. De plus, les durées de vie restent censurées et ne sont précises qu'à l'inspection près. Un premier algorithme EM développé dans un tout autre contexte a été proposé par (PRADHAN et al. 2014) et présente une première alternative. Après une extension aux censures à gauche et à droite, l'algorithme WEM proposé présente une suite de calculs plus simples (que la méthode MV) et apporte une estimation des durées de vie censurées. L'algorithme présente essentiellement deux défauts. Si les données d'entraînement présentent majoritairement un seul type de censure (droite ou gauche) ou intervalle de censure, alors l'algorithme a tendance à diverger. Les censures étant liées aux inspections, leurs estimations restent précises à l'inspection près. Un plan d'inspection plus régulier limiterait ces deux effets.

Au moins deux alternatives basées sur une approche bayésienne sont très récemment proposées (DUCROS et PAMPHILE 2018) (MARSILI et al. 2018). Ces approches semblent montrer une supériorité sur l'approche EM. Une proposition alternative basées sur ces récents résultats est envisagée.

La littérature spécialisée des algorithmes EM n'aborde pas particulièrement la robustesse des lois modélisées (en particulier dans un contexte multi-censuré). Classiquement, des tests d'adéquation sont déployés. Une étude comparée des principaux tests (adaptés sous la formalisation de l'algorithme WEM) montre que les tests graphiques sont les plus adaptés mais ne sont pas sans défauts. Le principal étant la définition du plan d'inspection. En effet, l'algorithme WEM ne peut attribuer une estimation des censures qu'en fonction des inspections les ayant établies. Cette thèse rejoint un point des travaux de Mariem Krit : seul un test d'adéquation adapté à la censure pourra pleinement répondre à cette problématique (KRIT 2014). Le test de Kolmogorov-Smirnov montre qu'une inspection semestrielle est statistiquement plus pertinente qu'une inspection annuelle.

À ce stade des travaux, tous les éléments étaient complètement réunis pour le développement de stratégies de maintenance. Les données d'inspection ont une nouvelle fois restreint le choix du modèle. L'hypothèse d'un comportement markovien, non-markovien

ou semi-markovien de la dégradation n'ont pas pu être vérifiable. Le choix le plus parcimonieux était donc un comportement binaire : soit le marquage est suffisamment rétro-réfléchissant, soit-il ne l'est pas. Trois stratégies de maintenance préventives ont été comparées : par rapport à l'âge, par bloc, conditionnée à la dégradation courante.

Les deux premières approches proposent un pas de maintenance préventif en fonction de la loi de durée de vie modélisée par l'algorithme WEM et les données budgétaires. La principale différence réside dans la gestion des maintenances correctives : la stratégie par rapport à l'âge remet à 0 l'échéancier de maintenance tandis que celui par bloc reste inchangé. C'est précisément pour cette raison que cette dernière est la moins adaptée à notre problématique. Au mieux, elle est équivalente à celle par rapport à l'âge. Toutes deux présentent un défaut commun : l'échéancier de remplacement des marquages risque de rentrer en conflit avec la gestion courante d'une infrastructure. Par exemple, une maintenance hivernale est particulièrement délicate à entreprendre. L'annexe B montre par ailleurs que si les durées de vie sont essentiellement censurées à droite, alors l'algorithme WEM diverge. La loi de durée de vie, et donc finalement le plan de maintenance ne sont alors pas établis.

Modulo les problèmes d'ordre logistique et sous réserve d'une censure à droite modérée, le remplacement systématique par rapport à l'âge est apparu comme une stratégie acceptable. Cependant, les dernières questions ouvertes sont davantage de l'ordre de l'optimisation du pas de maintenance. Dans le cas des marquages routiers, s'il devient possible de "réparer" des marquages ou recourir à des "marquages de rechange", alors le remplacement systématique par bloc deviendra un concurrent crédible.

La stratégie conditionnée par la dégradation courante a l'avantage d'être pleinement adaptée au plan d'inspection des marquages au sol. Le plan consiste à définir un seuil de dégradation préventif. Lorsqu'une inspection montre que ce seuil est atteint, une campagne de maintenance est réalisée avant la prochaine inspection. Le seuil préventif est établi par une loi de dégradation. Cette dernière se présente sous la forme d'un processus gamma évaluée par la méthode MV entraînée par les variations entre deux inspections. Cette approche a l'avantage d'ignorer la censure des durées de vie mais suppose une dégradation linéaire dans le temps.

Dans la pratique, un défaut majeur a été identifié. La relative courte durée de vie des marquages couplée avec une inspection annuelle engendre des seuils équivalant à un niveau de rétro-réflexion attendu pour un marquage neuf ou faiblement dégradé. Une nouvelle fois, seule une inspection plus régulière limiterait cet effet. Cependant, le remplacement conditionné offre de nombreuses perspectives. Deux principales questions ouvertes sont identifiées. Une fréquence plus soutenue des inspections étant suggérée sur plusieurs points, une version alternative du plan de maintenance basée sur une inspection séquentielle est envisagée dans l'immédiat. Sur cette question, l'introduction d'une flotte régulière de véhicules autonomes peut approcher le cas d'une inspection continue.

L'hypothèse d'une dégradation linéaire sous-entendue par le processus gamma n'est pas totalement satisfaisante pour une ligne de marquages (plus particulièrement en fin de vie). Deux alternatives sont envisagées pour des travaux à venir :

1. Un processus gamma est infiniment divisible ce qui facilite la définition de la période d'inspection optimale. Une alternative basée sur un processus gamma non homogène ou généralisé permettrait la prise en compte d'une dégradation non linéaire tout en conservant cette propriété. Par ailleurs, l'âge peut devenir un paramètre de décision de maintenance au même titre que la dégradation.
2. Dans le contexte de l'ingénierie civile, les travaux de thèse de Mariem Zouch (ZOUCH 2011) et de Boutros El Hajj (EL HAJJ 2015) proposent de lier la loi de l'incrément de dégradation au niveau de la dégradation courante. Les très récents travaux de (GIORGIO et PULCINI 2018) se placent plus spécifiquement sur un processus gamma.

Un dernier plan de maintenance alternatif pouvant être considéré est une approche prévisionnelle par zone basée sur la durée de vie résiduelle. Cependant, les données d'inspection actuelles n'encouragent cette option car trop peu fréquentes.

Finalement, sur l'ensemble des travaux présentés dans cette thèse, la stratégie conditionnée par la dégradation courante et par zone semble constituer la solution la plus stable. Ces principaux atouts sont le contournement de la problématique des durées de vie multicensurées et l'adéquation avec les pratiques d'inspection actuelles. Les deux principaux défauts sont la définition de seuil de dégradation préventif équivalant à un marquage neuf et le choix d'un processus gamma pour modéliser la dégradation. Ces deux derniers points offrent des perspectives.

Pour finir, cette thèse devait initialement établir un plan de maintenance des marquages routiers adapté aux données fournis par une flotte de véhicules autonomes. Sur ce point, il n'existe pas encore d'infrastructure inspectée par une telle flotte. Une telle expérimentation ouvre de nombreux défis scientifiques à lever : établir une mesure de dégradation (des marquages) adaptée aux capteurs du véhicule autonome, proposer un protocole de fusion de données, modéliser la dégradation des marquages sous ce point de vue, adapter les plans de maintenance pour garantir une conduite optimale. Il semble évidemment prématuré de pouvoir affirmer que ces travaux de thèse pourraient être appliqués tels quels à de telles données lorsqu'elles seront disponibles. Toutefois, la généricité de la démarche scientifique et des formalismes posés dans les différents algorithmes proposés milite dans ce sens.

Première généralisation à l'infrastructure routière

Cette annexe est un résumé du stage de fin d'étude encadré par l'auteur et réalisé par Ali Tidjani (TIDJANI et al. 2018). L'objectif principal est d'étudier l'impact de l'infrastructure de la Route Nationale 4 sur la dégradation des trois lignes de marquages (ligne de terre-plein centrale, ligne axiale, bande d'arrêt d'urgence).

A.1 Introduction

A.1.1 La démarche de l'Open Data dans les infrastructures routières

En 2017, le gouvernement français a lancé une démarche d'ouverture des données appelée l'Open Data. Les objectifs principaux de cette démarche étant : informer en toute transparence les décideurs et le citoyen sur l'état du patrimoine et l'utilisation des deniers publics, fournir des données aux entreprises du secteur numérique qui développent des services à l'utilisateur et renforcer le rôle de l'État comme fournisseur de services dans certains domaines.

Dans le domaine des infrastructures routières non concédées, une importante base de données est disponible sur le site du Ministère de l'Écologie et de la Transition Énergétique. Afin de faciliter la collecte de données et l'étude des infrastructures, le Ministère alimente et publie une dizaine de sous-bases. Chacune renseigne une information précise par infrastructure. Par exemple, la base "Liaisons du Réseau routier national" localise (en coordonnée Lambert 93) l'ensemble des Point de Repère (PR) et indique la distance en mètre de chaque PR consécutif tandis que la base "Nature des routes du Réseau routier national" décrit les voies de circulation entre deux PR. Les bases sont actualisées année après année et permet un suivi dans le temps.

A l'échelle de la RN4, une base de suivi de la ligne axiale de la RN4 fut constituée au cours de cette thèse. Le CEREMA Est inspecte également la Bande d'Arrêt d'Urgence (BAU) ainsi que la ligne de Terre-Plein Centrale (TPC) et la DIR Est effectue un suivi de la couche de roulement. Un objectif naturel est de constituer une base d'étude de la RN4 la plus complète possible afin de complexifier à terme la segmentation proposée à la section 3.3.3.

A.1.2 Description de la base d'étude de la RN4

A l'échelle de la RN4 dans le département de la Marne, une sélection des variables descriptives et un processus de fusion de données furent mis en place afin de créer la base d'étude de la RN4 la plus complète possible.

Bases ministérielle

La démarche Open Data propose une quinzaine de bases. Restreinte au département de la Marne, six d'entre elles sont retenues dans cette étude. Les bases restantes n'apportent pas plus de renseignements¹ ou sont redondantes².

"Liaisons du Réseau routier national" localise (en coordonnée Lambert) les bornes kilométriques de la RN4 et les distances entre deux bornes. Le rétro-réflexomètre utilisé par le CEREMA Est (Ecodyn) ayant un pas d'inspection de 100 m (raccordé au PR), une interpolation linéaire entre deux PR fut déployée afin de localiser les mesures d'inspection.

La base "Largeur des routes sur le Réseau routier national" complète la précédente base en indiquant la largeur de la voie de circulation entre deux PR.

"Nature des routes du Réseau routier national" renseigne le type de voie de circulation entre deux PR. La figure A.1 présente les cinq situations trouvées : (a) les chaussées uniques à 2 voies, (b) les chaussées uniques à 3 voies, (c) les chaussées uniques à 4 voies, (d) les chaussées séparées 2 × 2 voies et (e) les chaussées séparées 2 × 1 voies.

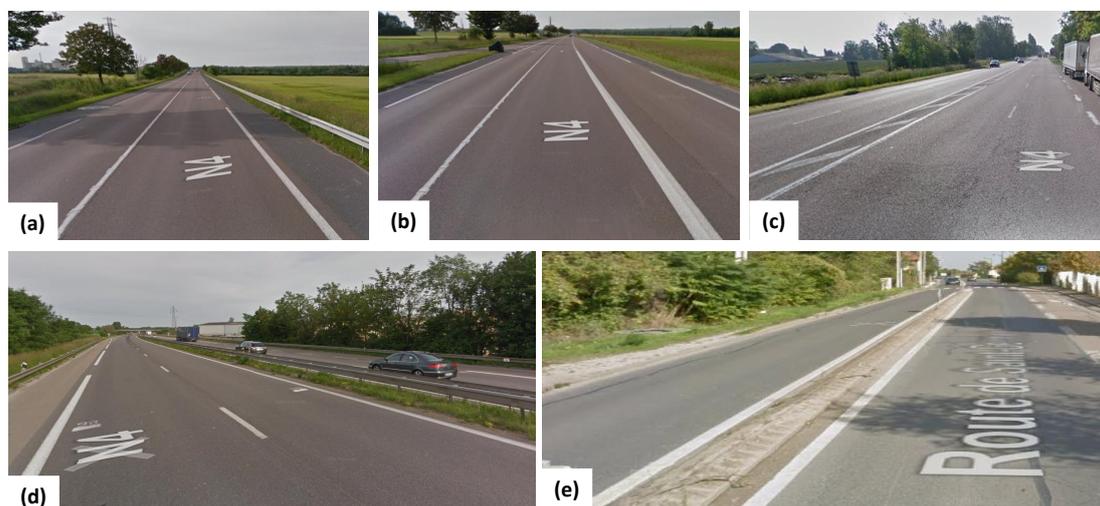


FIGURE A.1 – Types de voie de circulation sur la RN4 : (a) chaussée unique 2 voies, (b) chaussée unique 3 voies, (c) chaussée unique 4 voies, (d) chaussée séparée 2 × 2 voies, (e) chaussée séparée 2 × 1 voies (Google Maps)

"Classes d'état des chaussées du Réseau routier national non concédé" renseigne le niveau de dégradation de la chaussée entre deux bornes en fonction de la méthode IQRN (Images Qualité du Réseau routier National). Cette méthode est basée sur l'état visuel

1. "Gestionnaire du Réseau routier national" confirme que la RN4 est gérée par la DIR Est.
2. "Nombre de voies par chaussée" est équivalente à "Nature des routes du Réseau routier national".

(complété par des mesures physiques) et une évaluation du coût de réparation des chaussées. Une note d'état du patrimoine s'échelonne de 0 (infrastructure à remplacer intégralement) à 20 (chaussée neuve ou parfaite).

"Carrefours du Réseau routier national" localise à une borne près les carrefours et plus généralement les infrastructures inhabituelles. Sur la RN4, cinq situations sont observées : absence de croisement et route plane (simplifié par Rien A Signaler ou RAS), les croisements avec un plan (routes nationales/départementales), des échangeurs et des zones de dénivelés (contournement de Sézanne essentiellement).

"Trafic moyen journalier annuel sur le Réseau routier national" renseigne le trafic moyen journalier annuel sur une zone définie par deux bornes kilométriques. Le trafic est établi soit par un comptage manuel soit par une boucle électromagnétique. Une mise à jour est réalisée chaque année.

Les bases ministérielles renseignent la RN4 depuis 2014. Or les campagnes d'inspection de la signalisation horizontale sont réalisées depuis 2007. Dans la mesure où l'infrastructure est largement stable depuis 2014, chaque base retenue a été agrégée sous forme d'une variable descriptive contextualisant les inspections des marquages.

Données d'inspection du CEREMA et la DIR Est

Les sections 3.1.3, 3.3, 4.4 et 5.5 se concentrent exclusivement sur la ligne axiale dans la direction de Strasbourg de la RN4. Le CEREMA Est inspecte également la BAU et la TPC sous les mêmes conditions depuis 2007. Les trois lignes de marquages sont à présent prises en compte. Pour rappel, la BAU est destinée à permettre aux véhicules en difficulté de s'arrêter sur le bord droit des voies en attendant les secours et délimite également une voie de circulation réservée aux services de secours. Le TPC est le séparateur central entre deux chaussées séparées et peut être complété par des glissières de sécurité, un mur en béton ou une terre végétale.

La DIR Est réalise un suivi de la couche de roulement de la RN4, en particulier le type de bitume posé et son âge. Le bitume est généralement un mélange d'hydrocarbures à l'état liquide ou solide et a une couleur brunâtre à noirâtre. Un état de l'art plus général est proposé par Tristan Lorinio. Les types de bitume rencontrés sur la Route Nationale 4 sont les bitumes minces purs (BBmp), les bitumes très minces purs (BBtmp), les bitumes très minces modifiés (BBtmm), les bitumes semi grenus purs (BBsgp), les bitumes semi grenus modifiés (BBsgm) et les bitumes à module élevé (BBame). La DIR Est donne une précision par zone délimitée par deux bornes kilométriques.

Synthèse

Ce présent rapport de thèse présente la RN4 dans le département de la Marne sous l'angle des inspections de la ligne axiale dans la direction de Strasbourg et réalisées annuellement en Septembre entre 2007 et 2016. En complétant par les campagnes d'inspection de la BAU et la TPC, les principales lignes de la signalisation horizontale de la RN4 en direction de Strasbourg sont prises en compte. Les bases ministérielles décrivent l'in-

frastructure routière à la borne kilométrique près. Enfin, les données d'inspection de la chaussée réalisées par la DIR Est décrivent la couche de roulement.

Cette nouvelle base d'étude de la RN4 est la plus complète à ce jour. Dans l'immédiat, le principal intérêt de cette base est la contextualisation des données d'inspection de la signalisation horizontale. Les variables descriptives sont à la fois qualitatives et quantitatives et sont de différentes natures entre elles. L'identification des zones stratégiques de maintenance directement par une CAH (section 3.2.2) est de fait inadaptée.

Une approche basée sur l'analyse factorielle a l'avantage de proposer une discrimination des marquages en fonction de l'infrastructure et de la couche de roulement. Les axes factoriels permettent également de distinguer ce qui caractérise les marquages tout en indiquant les principales différences dans la structure des données. Finalement, la carte des individus permet un regroupement des marquages, définissant ainsi les zones stratégiques de maintenance.

A.2 Analyse factorielle de données mixtes de la Route Nationale 4

A.2.1 Analyse factorielle de données mixtes

L'analyse factorielle de données mixtes (AFDM) est une fusion entre l'analyse des composantes principales et l'analyse des correspondances multiples et qui peut s'interpréter comme une ACP acceptant les données qualitatives (PAGÈS 2004).

L'AFDM s'applique à des tableaux à deux dimensions croisant des individus et des variables quantitatives et qualitatives. Par exemple sur la RN4, les 1000 points de mesures reconnus par Ecodyn sont contextualisés par les lignes axiales et BAU inspectées entre 2007 et 2015, l'âge et le type de bitume, ainsi que la description de la voirie. Au total, un tableau structuré de 1000 lignes et x colonnes et mélangeant données quantitatives et qualitatives. La ligne TPC n'étant pas posée sur toute la longueur de la RN4, cette dernière est retirée de l'AFDM. La ligne est réintégrée a posteriori.

La figure A.2 présente l'ACP sous le formalisme proposé par (ESCOFIER et PAGÈS 2008). Les étapes (1) et (2) correspondent aux traitements de données en amont. Dans une AFDM, (PAGÈS 2004) propose un traitement de données sur de telles tables pour la rendre compréhensible par une ACP. Dans un premier temps, la table est scindée en deux : les données quantitatives d'une part et qualitatives de l'autre. En accord avec le formalisme de l'ACP, la première table est normalisée. La partie qualitative est quant à elle transformée en Tableau Disjonctif Complet (TDC) dont chaque colonne est pondérée par l'inverse de la racine carrée de l'écart-type. Finalement, il suffit de fusionner les deux tables. La table qui en résulte est interprétable par une ACP.

Les étapes (3) et (4) correspondent à deux points de vue différents mais complémentaires : la matrice des individus et des corrélations. La première décrit chaque marquage en fonction des variables descriptives et la seconde décrit les variables descriptives en fonction des marquages. Sur chaque matrice, les valeurs propres sont calculées et les vecteurs

propres sont déduits.

Les étapes (5) et (6) correspondent aux interprétations géométriques des matrices des individus et des corrélations. Les axes géométriques sont formés par les vecteurs propres. La figure A.2.(5) présente l'hyperplan des individus. Les marquages ne se regroupent pas dans une figure géométrique remarquable en générale (mais il est toujours possible de les délimiter). La figure A.2.(6) présente l'hypersphère des corrélations. Les variables descriptives sont toujours enfermées dans l'hypersphère de rayon 1 (ESCOFIER et PAGÈS 2008).

Le principal inconvénient de l'hypersphère et de l'hyperplan est qu'il n'est pas aisé de les interpréter géométriquement. D'où les étapes (7) et (8) qui correspondent à des projections hilbertiennes successives vers un plan cartésien à deux dimensions. Les étapes (9) et (10) représentent la carte des individus et le cercle des corrélations. La carte présente en général des nuages de points. Ici, chaque nuage représente les marquages qui ont tendance à partager les mêmes variables descriptives. Le cercle présente les principales variables discriminantes : plus la variable est proche de la frontière du cercle, plus elle est discriminante. De plus, plus de variables sont éloignées, plus elles s'opposent. Inversement, plus deux variables sont proches, plus elles sont associées.

(ESCOFIER et PAGÈS 2008) montre que les valeurs propres des matrices des individus et des corrélations sont liées par une relation algébrique explicite (Fig A.2.(11)). Cette relation montre qu'il est suffisant d'évaluer les valeurs propres de la matrice des individus (choix arbitraire classique). Un autre intérêt de cette relation est qu'il est possible de fusionner la carte des individus et le cercle des corrélations en un seul graphique. Cependant (ESCOFIER et PAGÈS 2008) déconseille cette opération car elle est facultative et la proximité entre une variable et un marquage est ambiguë à interpréter.

Chaque vecteur propre contribue à la variance totale du modèle ACP. Les composantes principales sont les vecteurs qui contribuent le plus. Le nombre de composantes principales est ici donné par le critère de Karlis-Saporta-Spinakis (KARLIS et al. 2003) car il réalise le ratio A.1 entre le nombre de variables (p) et le nombre d'individus (n). Le critère noté KSS indique la borne inférieure à considérer pour la sélection des valeurs propres. Dans l'étude de la RN4, cela conduit à sélectionner les neuf premières composantes principales.

$$KSS = 1 + 2\sqrt{\frac{p-1}{n-1}} \quad (\text{A.1})$$

Pour faciliter l'étude de la carte des individus, un regroupement des marquages par une CAH propose un regroupement en 9 groupes.

A.2.2 Application à la RN4

L'interprétation des composantes principales se fait séquentiellement. Les variables contribuant le plus à la formation d'un axe donné sont celles dont les coordonnées sur cet axe sont proches de 1 en valeur absolue sur le cercle des corrélations.

- La composante 1 oppose les chaussées uniques à deux voies ayant un état acceptable, sans croisement et faites de bitume très mince modifié aux chaussées séparées 2×2

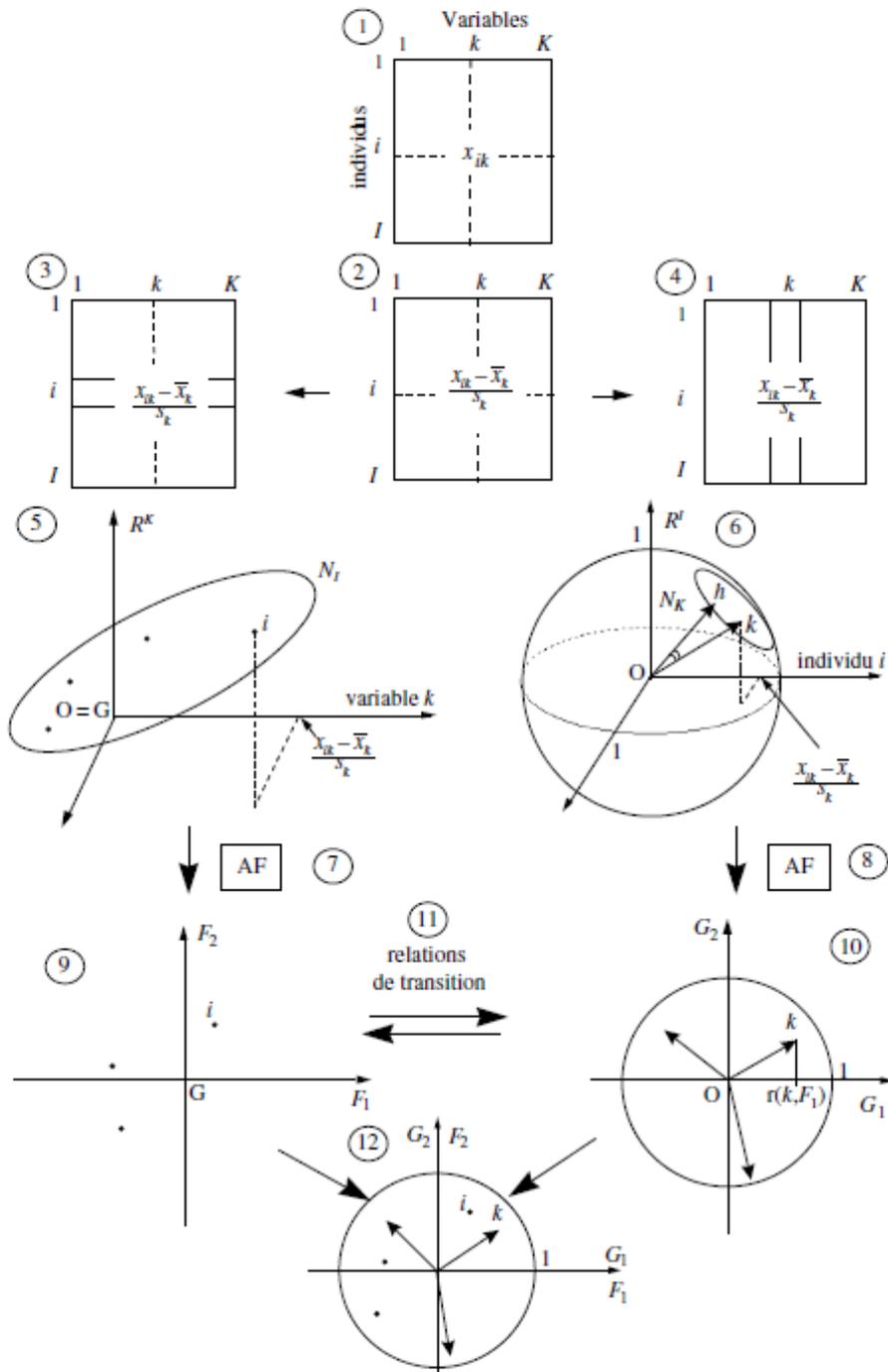


FIGURE A.2 – L'analyse en composantes principales : (1) Table initiale, (2) Normalisation de la table, (3) Matrice des individus, (4) Matrice des corrélations, (5) Hyperplan des individus, (6) Hypersphère des corrélations, (7-8) Projections hilbertiennes, (9) Carte des individus, (10) Cercle des corrélations, (11) Fusion algébrique, (12) Carte des individus et des corrélations (ESCOFIER et PAGÈS 2008)

voies qui sont dans un excellent état.

- La composante 2 oppose les chaussées uniques à deux voies ayant un état acceptable, sans croisement et faites de bitume mince pur aux chaussées séparées 2×2 voies qui sont dans un mauvais état et rencontrant un dénivelé.
- La composante 3 oppose les chaussées uniques à deux voies ayant un état médiocre, avec croisement et/ou dénivelé et faites de bitume semi grenu modifié aux chaussées séparées 2×2 voies qui sont dans un mauvais état et sans croisement.

Les composantes restantes peuvent se décrire de façon plus légère. La composante 4 oppose les marquages dont l'état de la chaussée est acceptable aux sections admettant une bande d'arrêt d'urgence. La composante 5 oppose les chaussées uniques 4 voies en état médiocre aux chaussées séparées 2×2 voies croisant un dénivelé. La composante 6 oppose les chaussées uniques 4 voies en mauvais état et faites de bitume mince pur aux chaussées à bitume très mince modifié. La composante 7 oppose les chaussées séparées 2×1 voies en mauvais état faites de bitume semi grenu pur au reste. La composante 8 oppose les chaussées dans un état acceptable présentant un échangeur et faites de bitume très mince pur aux chaussées séparées 2×1 voies en mauvais état et sans croisement particulier. La dernière composante retenue oppose les chaussées uniques 3 voies sans croisement particulier aux chaussées uniques 4 voies en état acceptable admettant un échangeur ou un croisement et faites de bitume semi grenu pur.

La figure A.3 confronte les deux premières composantes principales ainsi que le regroupement des individus en 9 clusters. Les composantes concentrent 26% de la variance totale.

Le cercle des corrélations (Fig A.3.(a)) présente les relations entre toutes les variables descriptives. Le principe général est que chaque axe du cercle dissocie les variables et celles qui sont proches de la frontière du cercle portent le modèle.

- Les variables les plus au centre du cercle ont peu d'impact sur le modèle. Par exemple : CU2VI, BBame, Plan et CU3VI. A l'inverse, les variables les plus proches de la frontière du cercle caractérisent le croisement des axes. Par exemple, CS22V et CU2VS.
- L'axe vertical du cercle est la première composante principale. Il sépare d'une part à droite la ligne axiale, les chaussées séparées, les croisements et la qualité du bitume et d'autre part à gauche la BAU, les chaussées uniques, l'absence de croisement et l'âge du bitume.
- L'axe horizontal du cercle est la seconde composante principale. Il sépare d'une part au Nord les inspections de marquages observant un non remplacé (axiale en 2012 par exemple), l'absence de croisement, la qualité et l'âge du bitume et d'autre part au Sud les inspections de marquages observant un remplacement, les croisements ou dénivelées et le trafic journalier.

La carte des individus projetée sur les deux premières composantes principales et segmentée en 9 clusters (Fig A.3.(b)) présente les groupes de marquages en fonctions de leurs positions sur les neuf composantes principales. Sous le regard du cercle des corrélations, plusieurs observations sont notables.

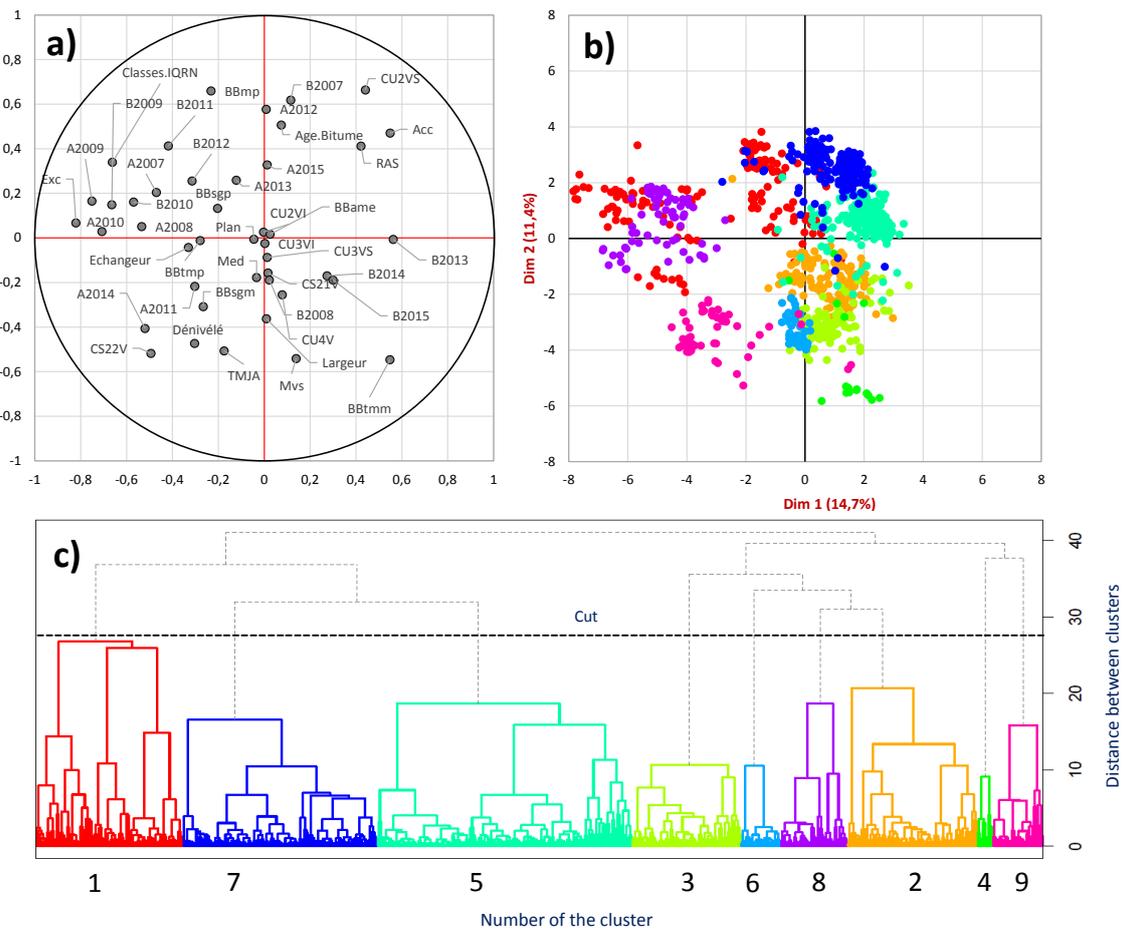
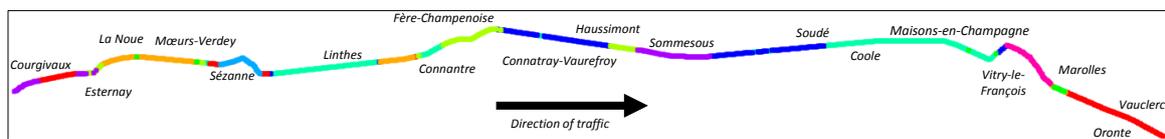


FIGURE A.3 – Confrontation des deux premières composantes principales : (a) Cercle des corrélations, (b) Carte des individus, (c) Dendrogramme de la CAH de la carte des individus

A.2. ANALYSE FACTORIELLE DE DONNÉES MIXTES DE LA ROUTE NATIONALE 4137

- Le cluster 1 est le seul qui soit scindé en deux. Les autres sont très bien isolés par la CAH. L'hypothèse la plus raisonnable est que les marquages sont posés à moitié sur une chaussée 2×2 voies séparées et l'autre moitié 2 voies uniques.
- Une frontière sépare une première moitié du cluster 1, le cluster 8 et 9 des autres clusters. Le cercle des corrélations indique que la chaussée des marquages située à l'Ouest de la carte a tendance à être en excellent état. La voie de circulation à l'extrême Ouest a tendance à être organisée en 2×2 voies séparées.
- Le cluster 9 semble positionné dans une zone présentant un dénivelé.
- Le cluster 4 est orienté plein Sud où la chaussée a tendance à être en mauvais état.
- Les clusters 2, 3 et 6 sont voisins. Le premier est plus proche de l'origine et les deux derniers sont séparés par la seconde composante. Ces trois nuages semblent se diriger vers le Sud - Sud-Est qui correspond aux chaussées revêtues d'un bitume mince modifié.
- Les clusters 5 et 7 sont également voisins et semblent se diriger vers le Nord - Nord-Est. Dans cette zone, la tendance est une chaussée acceptable organisée en 2 voies uniques et l'infrastructure n'observe pas de croisement ou de dénivelé.

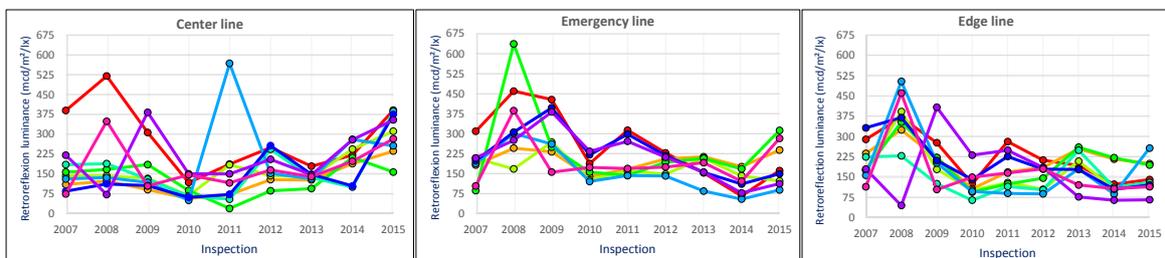
La lecture seule du cercle des corrélations et de la carte des individus ne permet pas d'établir un profil précis de chaque cluster de la chaussée et ne renseigne pas sur la rétro-réflexion des lignes de marquages.



(a)

Cluster	Typographie			Etat de la chaussée				Nature de la chaussée				Croisement			Nature bitume											
	Effectif	Longueur (km)	Largeur (m)	TMIA	Acc.	Exc.	Med.	Mvs	CS21V	CS22V	CU2VI	CU2VS	CU3VI	CU3VS	CU4V	Déniélé	Echangeur	Plan	RAS	BBarne	BBmp	BBsgm	BBsgp	BBtrm	BBtmp	Age Bitume (années)
1	148 (15%)	15	8	9315	13%	87%	-	-	3%	43%	-	54%	-	-	-	7%	7%	4%	82%	-	58%	-	32%	7%	2%	15.40
2	130 (13%)	13	8	9950	55%	45%	-	-	-	87%	-	2%	-	11%	-	1%	-	5%	95%	-	1%	-	-	99%	-	16.01
3	109 (11%)	11	8	9874	-	-	-	100%	19%	77%	-	4%	-	-	-	10%	-	1%	89%	-	-	-	4%	96%	-	12.20
4	16 (2%)	2	16	15806	25%	-	6%	69%	-	-	-	6%	-	-	94%	-	-	13%	88%	-	-	-	6%	94%	-	17.55
5	255 (25%)	25	8	9298	100%	-	-	-	-	3%	-	95%	1%	1%	-	-	-	5%	95%	1%	7%	2%	2%	85%	3%	16.55
6	40 (4%)	4	9	11202	100%	-	-	-	-	100%	-	-	-	-	-	75%	25%	-	-	-	-	-	-	100%	-	17.65
7	195 (19%)	19	8	8478	99%	-	-	1%	4%	1%	1%	95%	-	-	-	-	-	-	100%	-	80%	-	18%	2%	20.05	
8	67 (7%)	6	8	10514	-	100%	-	-	-	99%	-	1%	-	-	-	7%	15%	6%	72%	-	57%	-	9%	-	34%	19.46
9	50 (5%)	5	9	18442	-	80%	20%	-	14%	38%	-	44%	-	4%	-	92%	-	-	8%	-	-	88%	8%	4%	-	9.56

(b)



(c)

(d)

(e)

FIGURE A.4 – (a) Projection des clusters sur la RN4, (b) Profils typographique, de chaussée, d'infrastructure et de bitume, (c) suivi de la ligne axiale, (d) suivi de la bande d'arrêt d'urgence, (e) suivi de la ligne terre-plein centrale

La figure A.4 décrit la typographie des neuf clusters. Leurs localisations sont projetées

sur une carte de la RN4 (Fig A.4(a)). Les profils qualitatifs moyens sont présentés sous forme de table (Fig A.4(b)). Et enfin, les suivis simultanés de la ligne axiale, de la BAU et de la TPC sont présentés par les figures A.4(c)-(e).

Le cluster 1 est scindé en deux aux extrémités de la RN4 (Courgivaux et Vauclerc). Les marquages sont posés sur des chaussées séparées 2×2 voies ou unique 2 voies tous deux en excellent état. Plus de la moitié de la chaussée (58%) est revêtue de bitume mince pur. Le niveau de la rétro-réflexion de la ligne axiale et BAU est la plus élevée en générale.

Le cluster 2 est principalement localisé à La Noue, Moeurs-Verdey et Connantre. Les marquages sont posés sur une chaussée séparée 2×2 voies dont l'état est acceptable voire excellente. Elle est revêtue d'un bitume très mince modifié.

Le cluster 3 est localisé à Fère-Champenoise et Haussimont. Les marquages sont posés sur une chaussée séparée 2×2 voies en mauvais état. Elle est revêtue d'un bitume très mince modifié.

Le cluster 4 est la sortie du contournement de Vitry-le-François à Marolles. Les marquages sont posés sur une chaussée unique à 4 voies en mauvais état. Elle est revêtue d'un bitume très mince modifié. La ligne TPC suit une évolution particulière : hausse importante de la rétro-réflexion entre 2007 et 2008 puis une baisse considérable avant de se stabiliser.

Le cluster 5 est localisé à Linthes, Connantre, Coole et Maisons-en-Champagne. Les marquages sont posés sur une chaussée unique 2 voies dont l'état est acceptable. Ce cluster est le seul contenant une chaussée unique à 3 voies.

Le cluster 6 est le contournement de Sézanne. Les marquages sont posés sur une chaussée séparée 2×2 voies revêtues de bitume très mince modifié et en état acceptable. L'infrastructure présente un important dénivelé (75%) et un échangeur (25%). La ligne axiale et la TPC présentent un remarquable pic de rétro-réflexion respectivement en 2011 et 2008.

Le cluster 7 est scindé en deux et est localisé dans la région de Connantray-Vaufrey et Soudé. Les marquages sont posés sur une chaussée unique 2 voies revêtue d'un bitume mince pur et en état acceptable. Ce cluster est le seul dans lequel il n'y a aucun croisement particulier. Le bitume est également le plus ancien et le taux de trafic journalier est le plus faible.

Le cluster 8 est l'échangeur de Sommesous (complété par une petite zone près de Courgivaux). Les marquages sont posés sur une chaussée séparée 2×2 voies revêtues majoritairement d'un bitume mince pur et en excellent état.

Le cluster 9 est le contournement de Vitry-le-François. Les marquages sont posés sur une chaussée unique 2 voies ou séparée 2×2 voies revêtues d'un bitume semi grenu modifié et dans un état acceptable. La quasi-totalité de la chaussée présente un dénivelé (92%).

A.2.3 Synthèse et conclusions

L'AFDM des données ministérielles, des campagnes Ecodyn du CEREMA et de suivi du bitume de la DIR Est apportent une segmentation de la RN4 plus riche et complète

que celle proposée à la section 3.3.3. En effet, chaque cluster apporte un contexte aux lignes de marquages. Par exemple, le cluster 9 est le contournement de Vitry-le-François qui présente un important dénivelé et s'organise en chaussées uniques 2 voies ou séparées 2×2 voies.

Chaque cluster est interprété comme des zones (de maintenance) stratégiques. Dans le formalisme de l'AFDM, l'évolution de la rétro-réflexion est corrélée à l'infrastructure. Par exemple, les marquages posés sur le contournement de Vitry-le-François ont bénéficié d'une restauration complète en 2008 puis semblent suivre une restauration tous les deux ou trois ans.

Une perspective possible est l'apport d'un suivi dans le temps de la qualité du bitume, de la taille des fissures longitudinales observées ou de la notation NBO de l'infrastructure. Cet apport ouvrirait à une extension des travaux de thèse de (MENANT 2014) et (ZOUCH 2011) à l'entretien des marquages en plus de l'entretien des chaussées.

A.3 Maximum de Vraisemblance et Algorithme EM

Le chapitre 4 montre que les lois de Weibull proposent des modèles de durée de vie satisfaisant des marquages routiers. La méthode du Maximum de Vraisemblance (MV) optimisée par la méthode de Newton-Raphson est l'approche classique pour paramétrer une telle loi (BAIN et ENGLEHARDT 2017) (SATHYANARAYANAN et al. 2008). L'algorithme WEM est établi comme une alternative crédible afin de prendre davantage en compte la censure des durées de vie. Cette annexe répond à deux questions laissées en suspens : l'algorithme WEM et la méthode MV convergent-ils vers un même modèle et la résolution de l'étape M par un approche point fixe est-elle optimale ?

Pour l'ensemble de cette section, la loi de Weibull définie par sa fonction de densité simplifie le changement de variable $\alpha \leftarrow 1/\alpha^\beta$ suivant :

$$f(t) = \begin{cases} \alpha\beta t^{\beta-1} e^{-\alpha t^\beta} & \text{si } t > 0 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

De plus, la loi de Weibull initiale $\mathcal{W}(\alpha_0, \beta_0)$ est donnée par la méthode MV ignorant les phénomènes de censures.

A.3.1 Maximum de Vraisemblance

Soit une ligne de marquages composée de $n > 0$ marquages et $W = (t_1, \dots, t_n)$ leurs durées de vie supposées indépendamment et identiquement distribuées (i.d.d). Après identification des censures par l'indicateur de censure (4.4), les durées de vie exactes et les censures à gauche, intervalle, droite forment respectivement les ensembles \mathcal{T} , \mathcal{X} , \mathcal{Y} , \mathcal{Z} (4.5-4.8).

$$\ln L(\alpha, \beta) = \sum_{t \in \mathcal{T}} \ln \alpha + \ln \beta + (\beta - 1) \ln t - \alpha t^\beta + \sum_{x \in \mathcal{X}} \ln(1 - e^{-\alpha x^\beta}) + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \ln(e^{-\alpha l^\beta} - e^{-\alpha r^\beta}) - \sum_{z \in \mathcal{Z}} \alpha z^\beta \quad (\text{A.3})$$

La méthode MV consiste à estimer le couple (α, β) par le maximum de la fonction log-vraisemblance censurée (A.3) où F et R sont la fonction de répartition et de fiabilité associée à la loi $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$. Classiquement, ce couple forme les zéros des dérivées partielles en α et β de la fonction log-vraisemblance (SAPORTA 2006). Cela revient ici à résoudre un système d'équations non linéaires (A.4-A.5).

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = \mathcal{J}_\alpha = \sum_{t \in \mathcal{T}} \frac{1}{\alpha} - t^\beta + \sum_{x \in \mathcal{X}} \frac{x^\beta e^{-\alpha x^\beta}}{1 - e^{-\alpha x^\beta}} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \frac{l^\beta e^{-\alpha l^\beta} - r^\beta e^{-\alpha r^\beta}}{e^{-\alpha l^\beta} - e^{-\alpha r^\beta}} - \sum_{z \in \mathcal{Z}} z^\beta \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial \beta} = \mathcal{J}_\beta = & \sum_{t \in \mathcal{T}} \frac{1}{\beta} + (1 - \alpha t^\beta) \ln t \\ & + \alpha \left[\sum_{x \in \mathcal{X}} \frac{x^\beta e^{-\alpha x^\beta} \ln x}{1 - e^{-\alpha x^\beta}} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \frac{l^\beta e^{-\alpha l^\beta} \ln l - r^\beta e^{-\alpha r^\beta} \ln r}{e^{-\alpha l^\beta} - e^{-\alpha r^\beta}} - \sum_{z \in \mathcal{Z}} z^\beta \ln z \right] \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

L'algorithme de Newton-Raphson est un algorithme itératif dont le but est l'estimation d'un zéro d'une fonction non linéaire et dérivable. Pour une telle fonction h , le principe général est de calculer la suite (A.6) jusqu'à son point de convergence correspondant à un zéro.

$$x_{k+1} = x_k - \frac{h(x_k)}{h'(x_k)} \quad (\text{A.6})$$

Pour le système à deux fonctions non linéaires dérivables (A.4-A.5), l'algorithme de Newton-Raphson correspond à la suite itérative A.7 où \mathcal{J}_k^{-1} est l'inverse de la matrice jacobienne associée à la fonction log-vraisemblance (A.8) évaluée à l'itération $k > 0$.

$$[\alpha_{k+1}; \beta_{k+1}] = [\alpha_k; \beta_k] - \mathcal{J}_k^{-1} \times [\mathcal{J}_\alpha(\alpha_k, \beta_k); \mathcal{J}_\beta(\alpha_k, \beta_k)] \quad (\text{A.7})$$

$$\mathcal{J}_k = \begin{bmatrix} \mathcal{J}_{\alpha_k \alpha_k} & \mathcal{J}_{\alpha_k \beta_k} \\ \mathcal{J}_{\beta_k \alpha_k} & \mathcal{J}_{\beta_k \beta_k} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\mathcal{J}_{\alpha\alpha} = \frac{\partial^2 \ln L}{\partial^2 \alpha} = -\frac{\#\mathcal{T}}{\alpha^2} - \sum_{x \in \mathcal{X}} \frac{x^\beta e^{-\alpha x^\beta}}{(1 - e^{-\alpha x^\beta})^2} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \frac{((rl)^\beta - r^{2\beta} - l^{2\beta}) e^{-\alpha(r^\beta + l^\beta)}}{(e^{-\alpha(r^\beta)} - e^{-\alpha(l^\beta)})^2} \quad (\text{A.9})$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{J}_{\beta\beta} &= \frac{\partial^2 \ln L}{\partial^2 \beta} & (A.10) \\
&= -\frac{\#\mathcal{T}}{\beta^2} - \alpha \left(\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta (\ln t)^2 + \sum_{z \in \mathcal{Z}} z^\beta (\ln z)^2 \right) \\
&\quad + \sum_{x \in \mathcal{X}} \frac{\alpha x^\beta (\ln x)^2 e^{-\alpha x^\beta} [1 - e^{-\alpha x^\beta} - x^\beta + x^\beta e^{-\alpha x^\beta} - \alpha x^\beta e^{-\alpha x^\beta}]}{(1 - e^{-\alpha x^\beta})^2} \\
&\quad + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \alpha \frac{(\ln l)^2 l^\beta (e^{-\alpha(l^\beta+r^\beta)} - e^{2\alpha l^\beta}) + (\ln r)^2 r^\beta (e^{-\alpha(l^\beta+r^\beta)} - e^{2\alpha r^\beta})}{(e^{-\alpha r^\beta} - e^{-\alpha l^\beta})^2} \\
&\quad - \frac{[\alpha l^\beta \ln l - \alpha r^\beta \ln r]^2 e^{-\alpha(r^\beta+l^\beta)}}{(e^{-\alpha r^\beta} - e^{-\alpha l^\beta})^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{J}_{\alpha\beta} = \mathcal{J}_{\beta\alpha} &= \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha \partial \beta} & (A.11) \\
&= -\left(\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta \ln t + \sum_{z \in \mathcal{Z}} z^\beta \ln z \right) + \sum_{x \in \mathcal{X}} \frac{x^\beta \ln x e^{-\alpha x^\beta} (1 - e^{-\alpha x^\beta} - \alpha x^\beta)}{(1 - e^{-\alpha x^\beta})^2} \\
&\quad + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \frac{[l^\beta \ln l (1 + \alpha(r^\beta - l^\beta)) + r^\beta \ln r (1 + \alpha(l^\beta - r^\beta))] e^{-\alpha(l^\beta+r^\beta)}}{(e^{-\alpha r^\beta} - e^{-\alpha l^\beta})^2} \\
&\quad - \frac{l^\beta \ln l e^{-2\alpha l^\beta} + r^\beta \ln r e^{-2\alpha r^\beta}}{(e^{-\alpha r^\beta} - e^{-\alpha l^\beta})^2}
\end{aligned}$$

Le critère d'arrêt retenu correspond à un Newton-Raphson d'ordre 4 (A.12). Cette précision est d'une part classique sous le logiciel Matlab et est d'autre part en adéquation avec les critères d'arrêts retenues pour l'algorithme WEM (Section 4.3.1).

$$\max \{ |\mathcal{J}_\alpha(\alpha_k, \beta_k) - \mathcal{J}_\alpha(\alpha_{k+1}, \beta_{k+1})| ; |\mathcal{J}_\beta(\alpha_k, \beta_k) - \mathcal{J}_\beta(\alpha_{k+1}, \beta_{k+1})| \} < 10^{-4} \quad (A.12)$$

La loi de Weibull finale est $\mathcal{W}(\alpha_{k+1}, \beta_{k+1}) = \mathcal{W}(\alpha, \beta)$ où $(\alpha_{k+1}, \beta_{k+1})$ sont les paramètres retenus par Newton-Raphson. La méthode du Maximum de Vraisemblance (MV) optimisée par la méthode de Newton-Raphson est nommée à présent "algorithme MVNR".

A.3.2 Algorithme EM optimisé par Newton-Raphson

La section précédente montre que la méthode de Newton-Raphson optimise la méthode MV. L'algorithme WEM présenté au chapitre 4 fonctionne en deux temps. L'étape E estime les censures par des espérances conditionnelles (4.12-4.14) tandis que l'étape M correspond à la méthode MV optimisée par une approche point fixe. L'algorithme EM optimisé par Newton-Raphson consiste à résoudre l'étape M par la méthode de Newton-

Raphson. Cette approche est nommée à présent "algorithme WEMNR".

$$L_c(\alpha_k, \beta_k) = \prod_{t \in \mathcal{T}} f(t) \prod_{x \in \mathcal{X}} f(\hat{x}) \prod_{y \in \mathcal{Y}} f(\hat{y}) \prod_{z \in \mathcal{Z}} f(\hat{z}) \quad (\text{A.13})$$

À une itération $k > 0$ donnée, la section 4.2.2 montre que l'étape M est initialement la méthode MV adaptée à la fonction de vraisemblance complétée par l'étape E (A.13). Sa dérivée partielle en α_k montre que le paramètre d'échelle est dépendant de β_k (A.14). Par conséquent, optimiser l'estimation de β_k puis déduire α_k est moins coûteux qu'estimer ces deux paramètres simultanément.

$$\alpha_k = \frac{n}{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^{\beta_k} + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^{\beta_k} + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^{\beta_k} + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^{\beta_k}} \quad (\text{A.14})$$

La méthode de Newton-Raphson consiste à estimer un zéro de la fonction non linéaire et dérivable $\frac{\partial \ln L_c}{\partial \beta}$. Soit $\mathcal{S} = \mathcal{X} \cup \mathcal{Y} \cup \mathcal{Z}$, la suite itérative associée est définie par :

$$b_{n+1} = b_n - \frac{\frac{\partial \ln L_c}{\partial \beta_k}(b_n)}{\frac{\partial^2 \ln L_c}{\partial^2 \beta_k}(b_n)} \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{\partial^2 \ln L_c}{\partial^2 \beta} = \frac{\left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta (\ln t)^2 + \sum_{s \in \mathcal{S}} \hat{s}^\beta (\ln \hat{s})^2 \right] \times \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta + \sum_{s \in \mathcal{S}} \hat{s}^\beta \right] - \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta \ln t + \sum_{s \in \mathcal{S}} \hat{s}^\beta \ln \hat{s} \right]^2}{\left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta \ln t + \sum_{s \in \mathcal{S}} \hat{s}^\beta \ln \hat{s} - \frac{\left[\sum_{t \in \mathcal{T}} \ln t + \sum_{s \in \mathcal{S}} \ln \hat{s} \right] \times \left[\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta + \sum_{s \in \mathcal{S}} \hat{s}^\beta \right]}{n} \right]^2} - 1 \quad (\text{A.16})$$

Le critère d'arrêt retenu est un Newton-Raphson d'ordre 4 : $|b_n - b_{n+1}| < 10^{-4}$. Cette précision est d'une part classique sous le logiciel Matlab et est d'autre part en adéquation avec les critères d'arrêt retenus pour l'algorithme WEM (Section 4.3.1). L'estimation du paramètre de forme à l'itération $k > 0$ est bien-définie par la convergence de la suite itérative $(b_n)_{n>0}$.

$$\beta_k = \lim_{n \rightarrow +\infty} (b_n)_{n \geq 0} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \begin{cases} b_0 = \beta_{k-1} & \text{si } n = 0 \\ b_n = b_{n-1} - \frac{\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_k}(b_{n-1})}{\frac{\partial^2 \ln L}{\partial^2 \beta_k}(b_{n-1})} & \text{Sinon.} \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

Finalement, le critère de convergence de l'algorithme WEMNR est bien-défini par (A.18). Le critère d'arrêt est $|\beta_k - \beta_{k-1}| < 10^{-4}$. Pour revenir à la définition standard

d'une loi de Weibull (4.1), il suffit d'appliquer le changement de variable $\alpha \leftarrow 1/\sqrt[\beta]{\alpha}$.

$$\begin{cases} \beta = \lim_{k \rightarrow +\infty} (\beta_k)_{k \geq 0} \\ \alpha = \frac{n}{\sum_{t \in \mathcal{T}} t^\beta + \sum_{x \in \mathcal{X}} \hat{x}^\beta + \sum_{y \in \mathcal{Y}} \hat{y}^\beta + \sum_{z \in \mathcal{Z}} \hat{z}^\beta} \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

A.3.3 Comparaison

La première différence triviale entre l'algorithme MVNR et les algorithmes WEM et WEMNR est la gestion des durées de vie censurées. L'algorithme MVNR prend en compte le phénomène de censure mais n'apporte aucune estimation particulière. Les algorithmes WEM et WEMNR proposent la loi de Weibull la plus vraisemblable en fonction des censures qui sont elles-mêmes estimées en fonction de la loi. Mécaniquement, ils proposent donc les estimations les plus vraisemblables des censures.

Une comparaison des algorithmes est réalisée au travers de cinq cycles de vie :

1. Cycle 2008 - 2012 de la ligne axiale (de la RN4),
2. Cycle 2008 - 2012 de la bande d'arrêt d'urgence,
3. Cycle 2008 - 2012 de la ligne de terre-plein centrale,
4. Cycle 2008 - 2013 de la bande d'arrêt d'urgence,
5. Cycle 2008 - 2013 de la ligne de terre-plein centrale.

Pour rappel, "Cycle 2008 - 2013" signifie que les marquages sont posés en mars 2008, remplacés en mars 2013 et ont bénéficié de cinq inspections en Septembre 2008, 2009, 2010, 2011 et 2012.

TABLE A.1 – Synthèse des lois de Weibull proposée par trois différents algorithmes

	MVNR	WEM	WEMNR
AXE (2008-2012)	$\mathcal{W}(32.85; 2.41)$	$\mathcal{W}(32.47; 2.71)$	$\mathcal{W}(32.47; 2.71)$
BAU (2008-2012)	∞	$\mathcal{W}(21.61; 2.07)$	$\mathcal{W}(21.61; 2.07)$
TPC (2008-2012)	$\mathcal{W}(40.02; 2.12)$	$\mathcal{W}(38.32; 2.65)$	$\mathcal{W}(38.32; 2.65)$
BAU (2008-2013)	∞	∞	$\mathcal{W}(27.09; 2.81)$
TPC (2008-2013)	$\mathcal{W}(29.84; 2.25)$	∞	$\mathcal{W}(29.78; 2.36)$

La table A.1 synthétise les lois de Weibull proposées par les différentes approches présentées dans cette thèse (MVNR, EM et WEMNR). Chaque ligne représente un cycle de vie et chaque colonne indique la loi proposée par un algorithme. Par exemple, les lois adaptées au Cycle 2008 - 2012 de la ligne axiale sont $\mathcal{W}(32.85; 2.41)$ pour l'algorithme MVNR et $\mathcal{W}(32.47; 2.71)$ pour les deux restants. Lorsque l'un des algorithmes diverge, par exemple l'algorithme MVNR appliqué au Cycle 2008 - 2012 de la BAU, la divergence est symbolisée par ∞ .

Les deux principales observations sont : l'algorithme WEMNR est le seul à converger systématiquement et les algorithmes EM et WEMNR proposent les mêmes lois de Weibull. Quatre cas de divergence sont observés. Le Cycle 2008 - 2012 de la BAU observe une matrice jacobienne non inversible. Pour le Cycle 2008 - 2013 de la BAU, la censure à

droite induit une constante e^{54^3} qui est arrondie à ∞ par Matlab. Pour les deux Cycles 2008 - 2013, l'algorithme WEM diverge car la méthode point fixe diverge. (PRADHAN et al. 2014) affirmant que l'approche point fixe ne pouvait pas diverger, ces deux cycles constituent des candidats de contre-exemples.

Les Cycles 2008 - 2012 de la ligne axiale et TPC montrent que les différentes lois de Weibull sont cohérentes entre elles. Les lois de Weibull adaptées à la ligne TPC sont $\mathcal{W}(40.02; 2.12)$ et $\mathcal{W}(38.32; 2.65)$. Les paramètres de forme sont équivalents (2.12 et 2.65) alors qu'une différence de deux mois est établie dans le paramètre d'échelle (40.02 et 38.32 mois). Cette différence est due à l'estimation des censures.

La cohérence entre les algorithmes WEM et WEMNR n'est pas une surprise. En effet, tous deux sont essentiellement basés sur une estimation du paramètre β interprété comme le zéro de la dérivée partielle en β de la fonction de vraisemblance complétée. Les deux Cycles 2008 - 2013 prouvent que Newton-Raphson est plus performant que l'approche point fixe proposée par (PRADHAN et al. 2014). La section 4.4.1 ayant montré que l'algorithme WEM propose des estimations crédibles des durées de vie censurées, il en va de même pour l'algorithme WEMNR.

A.3.4 Synthèse et conclusions

L'algorithme MVNR est la démarche recommandée par (SATHYANARAYANAN et al. 2008) pour l'analyse de Weibull censurée des marquages routiers. Sa robustesse est à nouveau établie sur les données de rétro-réflexion de la RN4. Cependant, au moins deux cas de divergence sont établis : l'un montre que Newton-Raphson n'est pas systématiquement adaptée et l'autre est dû à la manipulation du nombre e^{54^3} qui est inaccessible pour Matlab. Le premier exemple de divergence est annoncé par (PRADHAN et al. 2014) et le second constitue un candidat contre-exemple. Afin de trancher sur le statut de contre-exemple, une transformation logarithmique des durées de vie est envisagée.

(PRADHAN et al. 2014) ont proposé un premier algorithme EM en guise d'alternative à la méthode MV. Ce dernier propose deux principaux avantages : une estimation des durées de vie censurées et le remplacement de la méthode Newton-Raphson par une approche point fixe. Le chapitre 4 propose une extension vers les censures à gauche et à droite. Les deux Cycles 2008 - 2013 de la BAU et TPC montrent que l'approche point fixe n'est également pas systématiquement convergente.

La littérature montre que l'algorithme de Newton-Raphson est le plus adapté à l'optimisation de la méthode MV d'une loi de Weibull non censurée. L'étape E de l'algorithme WEM consiste à compléter les censures par des durées de vie estimées. L'étape M correspond à la méthode MV d'une loi de Weibull non censurée. Adapter cette dernière étape à l'algorithme de Newton-Raphson est donc pertinent et constitue une fusion entre les algorithmes EM et MVNR.

Finalement, l'algorithme WEMNR est cohérent avec l'algorithme WEM : mêmes lois de Weibull et mêmes estimations des censures. L'algorithme WEMNR ne présentant pas de cas divergence, il démontre ainsi sa supériorité sur les algorithmes WEM et MVNR.

A.4 Conclusion

La signalisation horizontale joue un rôle important dans le guidage des véhicules. En particulier pour les futurs véhicules autonomes. C'est pour cette raison qu'elle doit être entretenue. Il en va de même pour l'ensemble des éléments constituant une infrastructure routière.

Ce système de guidage subit une dégradation au fil du temps et au travers de son usage. Des dégradations importantes constitueraient une entrave pour la bonne circulation des véhicules. Des stratégies de maintenance permettraient de remettre le système en bon état.

L'objectif premier consiste à établir des zones (de maintenance) stratégiques en tenant compte de l'ensemble des caractéristiques d'une infrastructure routière. Le second objectif est l'analyse de différents cycles de vie des marquages présents sur ces zones au travers d'une analyse de Weibull.

La prise en compte des caractéristiques de la RN4 permet de mieux définir des zones stratégiques. Les neuf zones obtenues dans cette étude sont d'ailleurs mieux distinguables que celles obtenues au chapitre 4. De plus, l'ensemble de la RN4 est à présent considéré.

L'algorithme WEM comme alternative à la méthode classique du Maximum de Vraisemblance est renforcé : plus performant tout en aboutissant aux mêmes lois de Weibull. Toutefois, l'optimisation de l'algorithme WEM élaborée par la méthode du point fixe atteint ses limites dans deux exemples (Cycle 2008-2013 de la BAU et TPC). Une optimisation alternative par la méthode de Newton-Raphson remédie à cet état de fait.

Une modélisation économétrique de type Panel peut être abordée pour évaluer le niveau d'impact des caractéristiques de l'infrastructure routière sur la signalisation horizontale. Plus généralement, la base actuelle peut être améliorée par la collecte et l'introduction d'autres données sur les infrastructures routières. Par exemple : un suivi de la notation NBO de la chaussée ou de la taille des fissures observées.

La suite pertinente de cette première étude est la modélisation et l'optimisation de la maintenance des infrastructures routières pour le véhicule autonome. Cette question fera l'objet d'une seconde thèse au sein de VEDECOM.

Un réseau autoroutier

Cette annexe propose un second exemple d'application des outils présentés tout au long de ce manuscrit. Son intérêt est double. Premièrement, l'exemple montre qu'il est possible d'analyser un réseau routier dans une direction donnée. Deuxièmement, il montre qu'un plan d'inspection ciblé a tendance à produire une importante quantité de données manquantes qui impactent grandement la robustesse de l'analyse. Les propriétaires des données d'inspection ont souhaité rester anonymes.

B.1 Présentation du réseau autoroutier

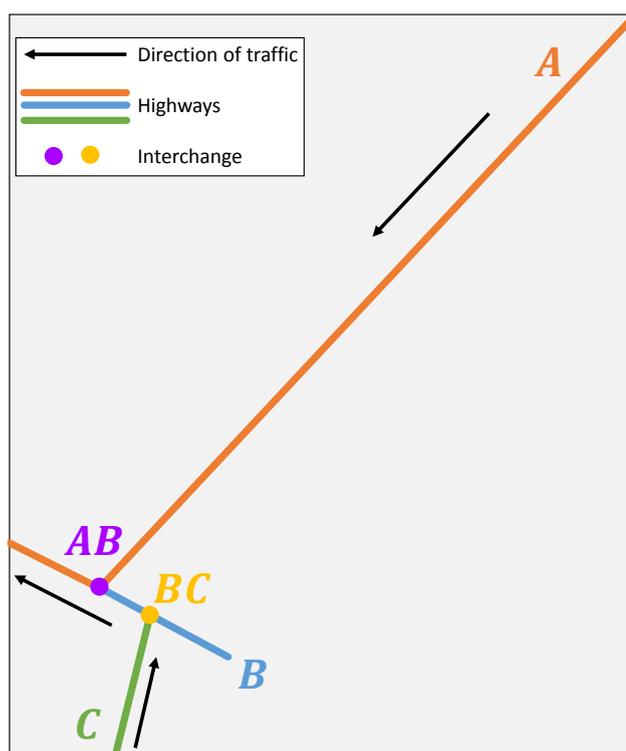


FIGURE B.1 – Réseau autoroutier (anonymisé) composé des autoroutes A, B et C et leurs échangeurs AB et BC

Le contrat d'entretien de la signalisation horizontale court sur la période 2011-2016. Le réseau autoroutier est constitué de trois autoroutes A, B, C interconnectés par deux échangeurs AB et BC. Le réseau est inspecté annuellement fin mars - début avril afin de planifier les campagnes de maintenance fin avril. Cependant, les zones à inspecter sont ciblées par le gestionnaire d'infrastructure. Le suivi dans le temps de la rétro-réflexion est mécaniquement bruité par une importante quantité de données manquantes.

Afin de distinguer les différentes voies de circulation, la ligne axiale d'une autoroute est généralement appelée ligne V1/V2 ou voie lente - voie rapide. La première est privilégiée. La ligne V1/V2 est segmentée en 4048 Points de Repère (PR) sur l'ensemble des trois autoroutes. Cela correspond à environ 405 km. Seulement 32 d'entre eux (localisés sur l'autoroute *C* en amont de l'échangeur *BC*) ont été systématiquement inspectés. Seuls les marquages ayant bénéficié d'au moins trois inspections sont considérées. Ce choix est un compromis entre la sauvegarde d'un maximum de données et la minimisation du besoin de reconstruction. Un filtre plus sévère éliminerait l'autoroute *B* et un filtre plus souple autoriserait des marquages trop peu inspectés. A ce stade, l'autoroute *A* ne présente pas de données d'inspection en 2011. Cette année est retirée de l'étude. Finalement, 1266 points de mesure sont considérés, ce qui correspond à une perte de 69% des données.

La figure B.1 présente le réseau autoroutier anonymisé et filtré aux points de repères exploitables. Pour des raisons de confidentialité : les autoroutes sont linéarisées, la localisation ne sera pas divulguée, la description de l'infrastructure réduite à son strict minimum et seules les données de rétro-réflexion et l'historique d'entretien de la signalisation horizontale seront mentionnés. L'autoroute *A* constitue l'essentiel du réseau (74%).

B.2 Analyse des données de rétro-réflexion

B.2.1 Reconstruction des données de rétro-réflexion

La table B.1 présente la reconstruction de l'ensemble des données d'inspection du réseau. Chaque autoroute a bénéficié de sa propre reconstruction de données. La campagne d'inspection de 2012 peut être considérée comme complète. Les campagnes de 2013 et 2014 sont ciblées sur les autoroutes *A* et *B* (respectivement 80% et 70% de données manquantes en moyenne). Les deux dernières sont davantage ciblées sur l'autoroute *C* (83% de données manquantes en moyenne). En dehors de l'inspection de 2012 sur *C*, le nombre de clusters nécessaire à la reconstruction est faible (10 en moyenne). Ceci est entièrement dû à l'importante quantité de données manquantes. La reconstruction du suivi réalisée, la ligne V1/V2 du réseau autoroutier peut à présent être segmentée par la CAH.

B.2.2 Suivi de la rétro-réflexion

La figure B.2 présente le suivi de rétro-réflexion du réseau en prenant compte des trois autoroutes. Chaque autoroute présente son propre suivi. D'après l'historique de maintenance, les inspections sont systématiquement réalisées avant les actions de maintenance. Par conséquent, un marquage posé à l'année n sera inspecté pour la première fois un an plus tard. Par exemple, l'inspection de 2013 montre que l'autoroute *A* a bénéficié d'une maintenance évidente en 2012. L'autoroute *B* est restaurée en 2013 et 2015 mais présente deux dynamiques de dégradation. L'autoroute *C* présente une maintenance évidente réalisée en 2012 suivie d'une dégradation lente.

La CAH introduite à la section 3.2.2 propose une segmentation en neuf clusters. La figure B.3 présente le suivi simultané des clusters. Une observation générale est que cha-

TABLE B.1 – Suivi de reconstruction du réseau autoroutier

Highway	Yearly Inspection	Number of missing data	Frequency against the highway	Number of cluster used by the algorithm	Number of absurd estimation
A	2013	900	81%	4	0
	2014	896	80%	1	0
	2015	86	8%	77	0
	2016	186	17%	4	0
B	2013	89	61%	3	0
	2014	116	80%	1	0
	2016	88	61%	1	0
C	2012	1	1%	176	0
	2015	159	83%	1	0
	2016	157	82%	1	0

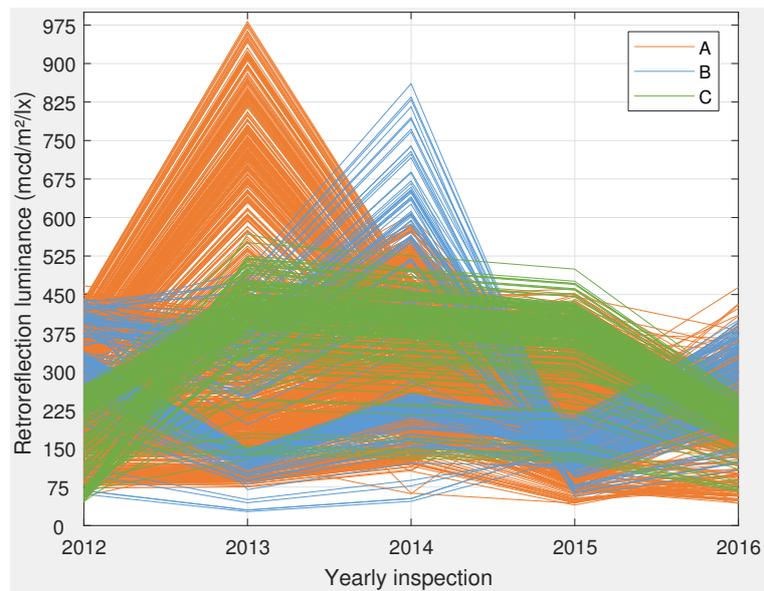


FIGURE B.2 – Suivi de la ligne V1/V2 entre 2011 et 2016 en prenant compte les trois autoroutes A, B et C

cun présente une évolution particulièrement lisse. Cette propriété est largement due au processus de reconstruction de données dont les variations de référence sont restreintes.

L'autoroute *A* est segmentée en 5 clusters notés *A1* : 5. *A1* est atypique : relativement stable entre 75 et 225 $mcd/m^2/lx$ avec des augmentations ponctuelles en 2014 et 2015. Les clusters *A2* : 5 partagent la maintenance évidente de 2013. Une augmentation ponctuelle de la rétro-réflexion est observée en 2014 et 2016 sur *A2*. La période 2014-2016 distingue *A4* et *A5* : rétro-réflexion décroissante puis croissante pour *A4* et décroissance lente pour *A5*.

Le cluster *B* présente deux cycles de trois ans similaires. Par exemple, rétro-réflexion décroissante entre 2012 et 2013 puis croissante entre 2013 et 2014. Le Custer *C* est à l'image de l'autoroute *C* : une maintenance évidente en 2013 suivie d'une décroissance lente. Les clusters *A + B* et *A + C* sont respectivement des mélanges entre les autoroutes *A* et *B* d'une part et *A* et *C* d'autre part. Le premier est construit autour d'une maintenance évidente en 2014. Le second est relativement stable entre 150 et 450 $mcd/m^2/lx$.

La segmentation du suivi réalisée, une projection des clusters sur la carte anonymisée permet de visualiser les futures zones (de maintenance) stratégiques.

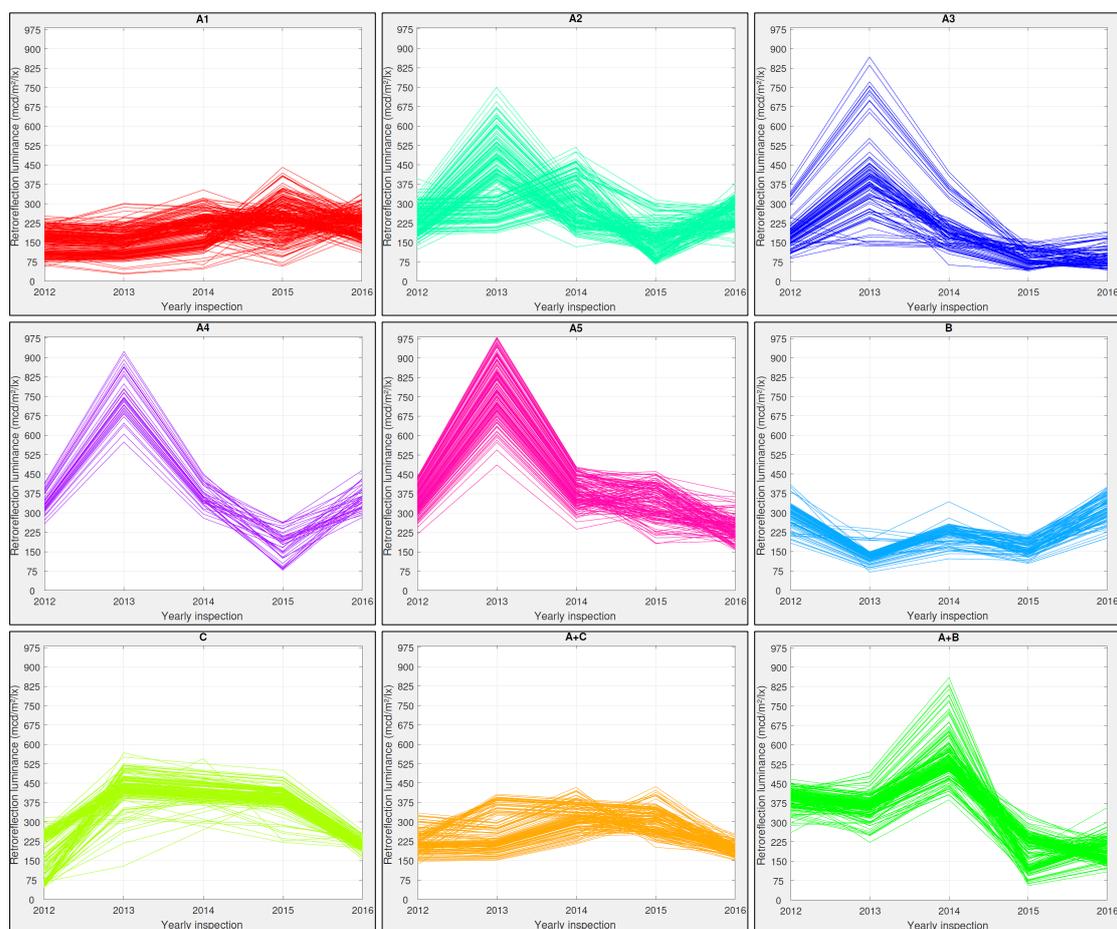


FIGURE B.3 – Suivi en neuf clusters de la ligne V1/V2 entre 2011 et 2016

B.2.3 Segmentation du réseau

La figure B.4 projette les neuf clusters sur une carte anonymisée. Sans surprise, l'autoroute *A* présente le plus de zones. Le cluster *A3* est le plus isolé et correspond à une zone connue par le gestionnaire d'infrastructure. L'échangeur *AB* est segmenté en deux parties : le cluster *A4* représente son voisinage tandis que le cluster *A5* et le coeur de l'échangeur (et réalise une frontière entre *A* et *B*). Les autoroutes *B* et *C* sont bien localisées. L'échangeur *BC* réalise une frontière entre les clusters *C*, *B* et *A + B*. Ce dernier correspond soit à la transition entre les échangeurs *AB* et *BC*, soit à une zone en amont de l'autoroute *A*. Les clusters *A + C* est un regroupement des marquages mal classés. Les zones de maintenance établies, reste à établir les plans de maintenance adaptés.

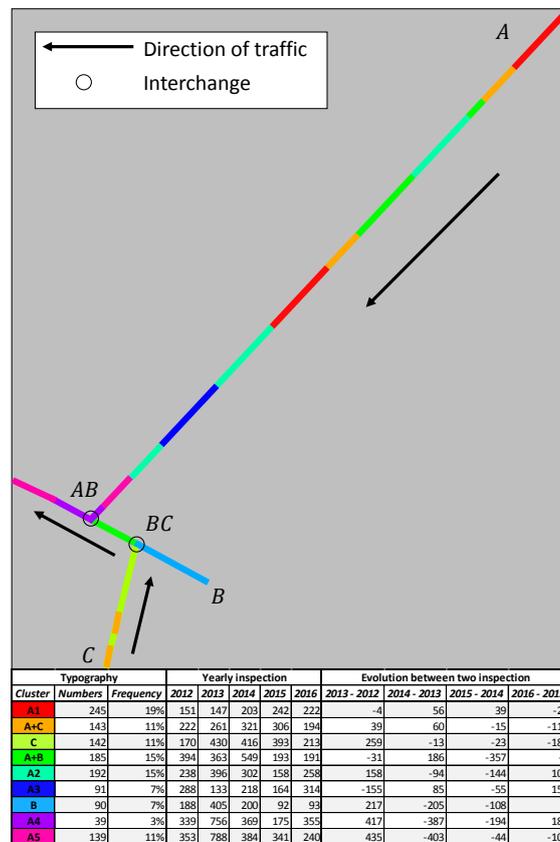


FIGURE B.4 – Segmentation de la ligne V1/V2 en neuf clusters projetés sur une carte anonymisée

B.2.4 Synthèse

Un dernier point non abordé est la cohérence du suivi reconstruit par rapport à l'historique de maintenance. À l'échelle de l'autoroute *A*, l'historique de maintenance estimé (par la méthodologie présentée à la section 3.2.3) et officiel coïncident à seulement 40%.

Deux facteurs expliquent ce constat. Premièrement, la table B.1 montre que le suivi de la rétro-réflexion a subi une très importante reconstruction de données basée sur des zones relativement restreintes le long de l'autoroute.

Deuxièmement, les zones inspectées sont également ciblées. Une pratique actuelle est d'inspecter en priorité les tronçons ayant subi des plaintes de la part des usagers. Dans ce

cas, la reconstruction estime généralement à la baisse la rétro-réflexion. Un second exemple est donné par l'historique de maintenance officiel. Ce dernier indique également les portions de chaussée restaurées, impliquant un remplacement de la signalisation horizontale. Le croisement de l'historique et des données d'inspection indique qu'une inspection des marquages est systématiquement réalisée dans cette situation. Par conséquent, la reconstruction estime généralement à la hausse la rétro-réflexion.

Finalement, cet exemple montre que la reconstruction de données proposée à la section 3.2.3 est davantage adaptée à la correction du bruit blanc et trouve ses limites à un plan d'inspection ciblé. L'annexe A montrant que la prise en compte des caractéristiques de l'infrastructure routière dans l'étude des marquages apporte une segmentation du réseau plus précise. Une reconstruction de données basée sur un réseau de neurones, l'historique de maintenance officiel et l'infrastructure est actuellement à l'étude.

La reconstruction de données réalisée, le suivi de la rétro-réflexion dans le temps et la définition de zones stratégiques de maintenance par une CAH restent réalisables. Malgré les faiblesses de la reconstruction de données, les zones stratégiques sont crédibles : le cluster $A3$ est parfaitement localisé et correspond à une zone connue du gestionnaire d'autoroutes, l'échangeur BC est une frontière entre trois clusters et l'échangeur AB est divisé en trois entre son cœur et son voisinage (respectivement les clusters $A4$, $A5$ et $A+B$). Par souci de cohérence avec les données, la suite de cette étude est basée sur l'historique de maintenance estimé.

B.3 Analyse de Weibull

L'historique de maintenance estimé sur la période 2012-2016 identifie, sur l'ensemble des clusters, 40 cycles de vie dont la longueur varie entre 1 et 4 ans.

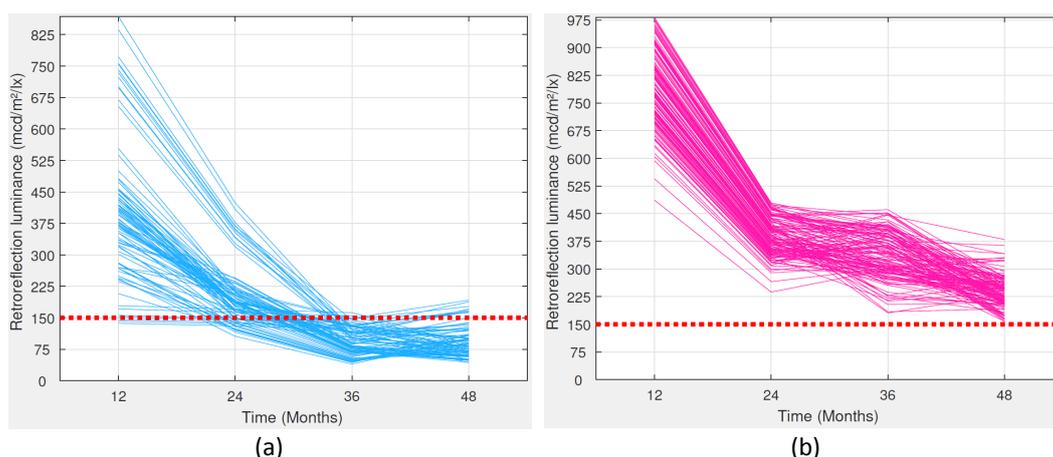


FIGURE B.5 – Suivi de la rétro-réflexion du cycle 2012 - 2016 : (a) cluster B , (b) cluster $A5$

Le cycle 2012 - 2016 du cluster B (amont de l'autoroute B) est le principal cycle de vie et est présenté par la figure B.5.(a). En considérant le niveau de rétro-réflexion minimal à $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, les trois types de censures sont visuellement présentes : trois censures à gauche sont observables à 12 mois (Avril 2013), une majorité de défaillances à lieu entre

24 et 36 mois (Avril 2013 - 2014) et quelques censures à droite à 48 mois (Avril 2016).

Contrairement à la RN4, le réseau autoroutier présente de nombreux exemples de cycles totalement censurés à droite. Par exemple, le principal cycle du cluster $A5$ (voisinage de l'échangeur AB) est le cycle 2012-2016 présenté par la figure B.5.(b). À horizon 2016, le niveau de rétro-réflexion moyen est de $235 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ et aucun marquage est défaillant. Dans cette situation, l'algorithme WEM présenté au chapitre 4 diverge.

TABLE B.2 – Analyse de Weibull du cycle 2012 - 2016 du cluster B

Observed failure	Numbers	Estimated failure $\mathcal{W}(27.93, 7.99)$
(12, 1)	3 (3%)	10.66 (February 2013)
([12, 24], 2)	17 (19%)	21.18 (January 2014)
([24, 36], 2)	67 (75%)	28.08 (July 2014)
([36, 48], 2)	2 (2%)	36.53 (February 2015)

La table B.2 synthétise l'analyse de Weibull du cycle 2012 - 2016 du cluster B . L'algorithme WEM propose après 14 itérations de distribuer les défaillances des marquages par la loi de Weibull à valeurs extrêmes $\mathcal{W}(27.93, 7.99)$. Les tests graphiques ne rejettent pas l'hypothèse d'une distribution de Weibull ($R^2 = 0.89$ et $R_{EJG}^2 = 0.82$). L'algorithme rejette la présence de censures à droite. En effet, les marquages dont la rétro-réflexion est supérieure à $150 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ à 48 mois ont bénéficié d'une légère augmentation de la rétro-réflexion entre 36 et 48 mois. La principale période de défaillance (75% des marquages du cycle) est comprise entre 24 et 36 mois. L'algorithme WEM estime la défaillance à 28 mois soit en juillet 2014. Les dates de défaillance estimées sont crédibles.

Finalement, l'algorithme WEM proposé au chapitre 4 est en mesure d'analyser les cycles de vie présents sur le réseau autoroutier. Contrairement à la RN4, les cycles du réseau présentent bien plus de censures à droite qui provoquent mécaniquement des cas de divergence de l'algorithme WEM .

B.4 Plan de maintenance

Comme pour la RN4, une comparaison entre les stratégies préventives par rapport à l'âge et conditionnée à la dégradation courante est proposée.

B.4.1 Stratégie préventive par rapport à l'âge

La table B.3 synthétise les plans de maintenance préventives par rapport à l'âge du réseau autoroutier. Les clusters $A + B$, $A4$ et $A5$ sont absents car l'algorithme WEM a détecté une trop forte présence de censures à droite. Par conséquent, ces clusters ne disposent pas d'un plan optimisé. Par défaut, le plan de maintenance global est appliqué : un remplacement systématique tous les 24 mois.

La figure B.6 illustre la stratégie préventive sur le cycle de vie 2012 - 2016 des clusters B et $A5$. Le pas de maintenance du cluster B est optimisé à 19 mois. À cette échelle, la table B.2 montre que 3% des marquages sont défaillants à cet horizon. De plus, ce chiffre

TABLE B.3 – Maintenance systématique par rapport à l'âge
Pénalité de maintenance corrective $r = 3$ et unique seuil de rétro-minimal $L = 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$

Typography		Remplacement strategy		
Cluster - Number (Frequency)	Preventive Cost	Weibull distribution $\mathcal{W}(\alpha; \beta)$ - MTBR (Month)	Cost by time unit - $\frac{C(T^*)}{C(\infty)}$	Optimum replacement moment T^* (Month)
A1 - 245 (19%)	6753	$\mathcal{W}(36.3; 1.78)$ - 32	708 - 85%	24
C - 142 (11%)	3914	$\mathcal{W}(57.16; 2.21)$ - 51	229 - 74%	32
A+B - 185 (15%)	5099	$\mathcal{W}(34.37; 8.40)$ - 32	244 - 39%	24
A2 - 192 (15%)	5292	$\mathcal{W}(33.28; 9.84)$ - 32	247 - 36%	24
A3 - 91 (7%)	5292	$\mathcal{W}(23.79; 31.78)$ - 23	126 - 29%	21
B - 90 (7%)	2481	$\mathcal{W}(27.85; 7.9)$ - 26	150 - 40%	19
Global - 1266 (100%)	25000	$\mathcal{W}(41.08; 9.19)$ - 37	1620 - 60%	23

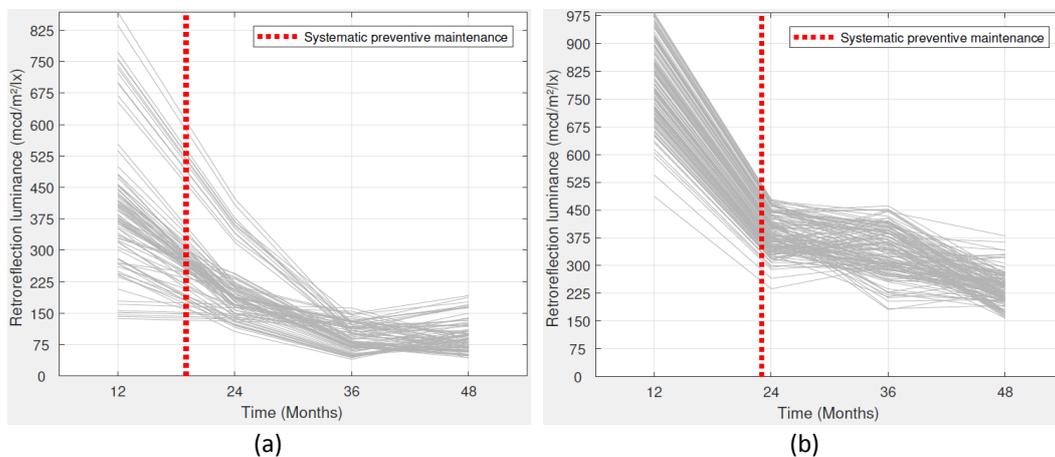


FIGURE B.6 – Maintenance par rapport à l'âge appliquée au cycle 2012 - 2016 : (a) cluster B, (b) cluster A5

monte à 22% puis 98% à horizon 22 et 28 mois. La figure B.6.(a) illustre parfaitement ces observations : le pas de maintenance apparaît juste après les premières défaillances et juste avant le principal instant de défaillance généralisé. Le remplacement à 19 mois est pleinement justifié.

Le pas de maintenance du cluster *A5* est à 23 mois par défaut. L'analyse de Weibull du cycle 2012 - 2016 (Fig B.6.(b)) montre l'absence de défaillance. La dégradation est en deux temps : très rapide entre 12 et 24 mois ($-407 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ en moyenne) puis plus lente ($-149 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ en moyenne depuis 24 mois). Un remplacement à 23 mois préviendrait une dégradation plus rapide est plus forte. A l'échelle de ce cycle, le pas n'anticipe pas la dégradation plus lente à partir de 24 mois et correspond donc à une action de sur-maintenance. Le remplacement à 23 mois est finalement inadapté.

B.4.2 Stratégie conditionnée à la dégradation courante

La table B.4 synthétise les plans de maintenance conditionnés à la dégradation courante du réseau autoroutier. Contrairement à la précédente approche, chaque cluster possède sa propre stratégie. Par exemple, les seuils (de maintenance) préventifs des clusters *B* et *A5* sont respectivement 414 et 503 $\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$.

Le seuil préventif moyen est de 401 $\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ et correspond à un marquage neuf. Comme pour l'exemple de la RN4, le pas d'inspection annuel couplé à une dégradation rapide ($145 \pm 60 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ par an en moyenne) conduisent à ce fait. Pour rappel, le remplacement de la ligne doit être réalisé entre deux inspections.

L'économie moyenne par rapport à une stratégie corrective est de 32%. L'écart moyen entre les clusters est de l'ordre de 3%. Le principal intérêt de la segmentation du réseau est donc d'ordre logistique.

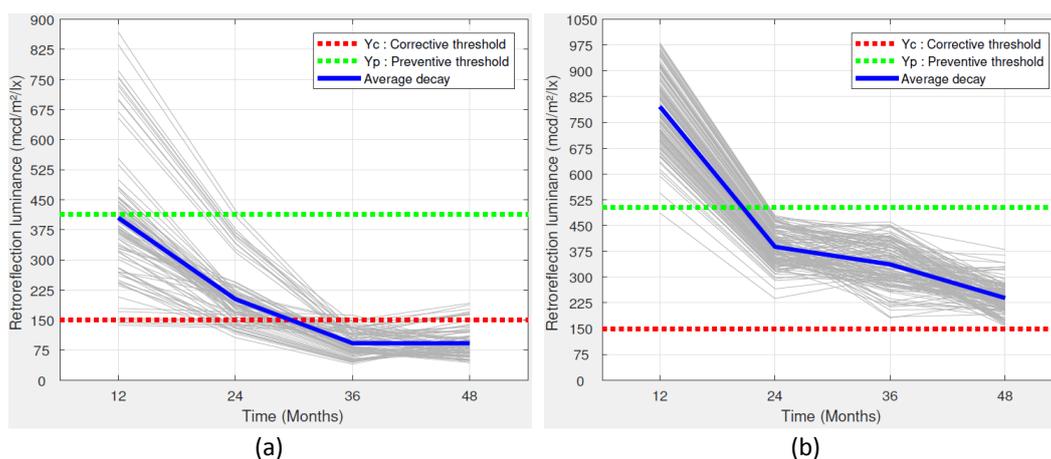


FIGURE B.7 – Maintenance conditionnée par la dégradation courante appliquée au cycle 2012 - 2016 : (a) cluster *B*, (b) cluster *A5*

La figure B.7 illustre la stratégie conditionnelle sur le cycle de vie 2012 - 2016 des clusters *B* et *A5*.

TABLE B.4 – Maintenance conditionnée par la dégradation courante appliquée au réseau autoroutier

Typography			Replacement strategy		
Cluster - Number (Frequency)	Average Initial Retroreflective (mcd/m ² /lx)	Average Number of Inspection	Gamma distribution - Speed Deterioration (mcd/m ² /lx)	$\frac{C_{CB}(Y_p)}{C_{CB}(Y_c)}$	Preventive Threshold Y_p (mcd/m ² /lx)
A1 - 245 (19%)	343	2	$\gamma(1.33; 38.05)$ - 51	63%	255
A + C - 143 (11%)	280	3	$\gamma(1.33; 50, 52)$ - 67	79%	237
C - 142 (11%)	512	3	$\gamma(1.02; 80.5)$ - 82	62%	330
A + B - 185 (15%)	718	2	$\gamma(1.14; 161.3)$ - 184	67%	475
A2 - 192 (15%)	635	3	$\gamma(2.01; 93.99)$ - 189	68%	481
A3 - 91 (7%)	378	2	$\gamma(1.9; 55.87)$ - 106	74%	315
B - 90 (7%)	630	4	$\gamma(1.26; 104, 1)$ - 131	64%	414
A4 - 39 (3%)	728	3	$\gamma(4.64; 62.01)$ - 288	67%	627
A5 - 139 (11%)	713	3	$\gamma(1.37; 154.9)$ - 212	70%	503
Global - 1266 (100%)	549	3	$\gamma(1.04; 131.1)$ - 136	69%	376

Le seuil préventif du cluster B est optimisé à $414 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$. La dégradation moyenne atteint ce seuil dès la première inspection à 12 mois (Fig B.7).(a)). De fait, la stratégie prend en compte la censure à gauche et anticipe la défaillance à 22 mois. Le remplacement entre 12 et 24 mois est pleinement justifié. D'un point de vue formel, cette décision est équivalente à un remplacement systématique à 23 mois.

Le seuil préventif du cluster B est optimisé à $503 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$. La dégradation moyenne atteint ce seuil à la seconde inspection à 24 mois (Fig B.7).(b)). Même si le remplacement doit être réalisé avant 36 mois, l'action correspond à une sur-maintenance. Cependant, comparée à la stratégie par rapport à l'âge, cette action intervient bien plus tardivement. De fait, la stratégie conditionnelle est plus adaptée.

B.4.3 Synthèse

La stratégie préventive par rapport à l'âge étant fortement liée à l'algorithme WEM proposé au chapitre 4, elle partage les mêmes limites identifiées à la section B.3. Les marquages composant le cluster $A4$ (cœur de l'échangeur AB) sont totalement censurés à droite sur la période 2012-2016. Par conséquent, l'algorithme WEM ne parvient pas à proposer une loi de durée de vie de référence, et une stratégie préventive n'est pas établie. La stratégie conditionnée à la dégradation courante est plus adaptée.

B.5 Conclusion

La principale difficulté d'un plan d'inspection périodique mais ciblé est d'établir un suivi de la rétro-réflexion des marquages dans le temps. Le suivi de la ligne V1/V2 de ce réseau autoroutier subit une importante reconstruction des données et son principe d'une estimation par la dégradation locale est poussée à l'extrême. A l'échelle de l'autoroute A , le processus de reconstruction est basé sur seulement 20% de l'autoroute.

Une segmentation en 9 clusters de la ligne de marquages est proposée. Malgré la très forte reconstruction des données, les zones stratégiques sont crédibles et correspondent à des configurations connues par le gestionnaire d'infrastructure. Par exemple, l'échangeur BC représente une frontière entre trois zones et l'échangeur AB est segmenté en trois (son cœur, son voisinage au sein de l'autoroute A et son approche par l'autoroute B). De plus, chaque zone présente son propre modèle de dégradation.

Une conséquence directe de la forte reconstruction des données de rétro-réflexométrie est la difficulté à établir une analyse de Weibull. Par exemple, le cluster $A4$ (voisinage de l'échangeur AB) présente des marquages systématiquement censurés à droite. Par conséquent, l'algorithme WEM n'est pas en mesure de proposer une loi de durée de vie des marquages. De ce fait, une stratégie de maintenance préventive par rapport à l'âge n'est pas établie sur ce cluster.

La stratégie conditionnée par la dégradation courante est finalement l'approche la plus robuste face à un plan d'inspection ciblée. Le cluster $A5$ dispose d'un plan de maintenance crédible malgré la forte reconstruction et les nombreuses censures à droite.

Analyse factorielle des produits de marquages français

Les principaux objectifs sont d'une part explorer les données d'expérimentations de l'ASsociation pour la Certification et la QQualification des Equipements de la Route (ASC-QUER) et d'autre part extraire des familles de produits de marquage. Cette annexe a fait l'objet d'une communication (REDONDIN 2018).

C.1 Introduction

La section 2.6.1 montre que la rétro-réflexion n'est pas l'unique mesure de dégradation des marquages routiers. La norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) en reconnaît au moins deux autres. La rétro-réflexion correspond à la visibilité de nuit. Celle de jour est identifiée par la luminance (sous éclairage diffus). Toutes les deux sont mesurées en millicandela par mètre carré et par lux ($mcd/m^2/lx$). Un coefficient d'adhérence correspondant à la résistance d'un marquage est également disponible. La figure C.1 illustre la différence entre rétro-réflexion et luminance. La première est la lumière des phares réfléchies par le marquage vers le conducteur. La seconde est l'ensemble des sources de lumières réfléchies par le marquage vers le conducteur.

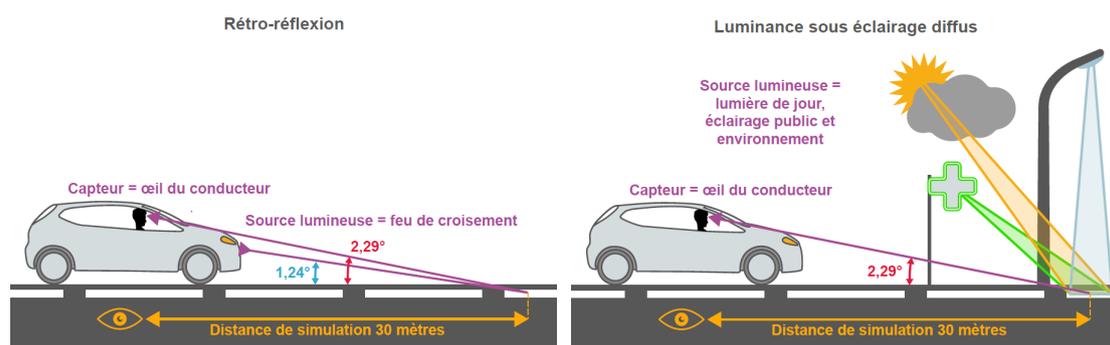


FIGURE C.1 – Distinction entre les phénomènes de rétro-réflexion et luminance

La section 2.4 montre que la rétro-réflexion est la seule mesure de dégradation retenue car elle est la seule dynamiquement mesurable. Le chapitre 2 et plus généralement ce présent rapport de thèse montrent que cette mesure est la base de toutes les recherches de fiabilité des marquages.

Pour un véhicule autonome, la luminance est une mesure plus pertinente. La section 2.6.1 cite les travaux de (LUNDKVIST et ISACSSON 2007) et (BABIC et al. 2016) qui pro-

posent des relations linéaires entre rétro-réflexion et luminance. La norme NF EN 1824 (AFNOR 2012) charge l'ASCQUER de l'homologation de tous les marquages commercialisés en France. Deux bases publiques présentent la dégradation théorique des trois mesures reconnues et une description de chaque produit (ASCQUER 2018a) (ASCQUER 2018b). A partir de ces bases, (HAUTIERE et al. 2008) proposent un modèle de dégradation de la rétro-réflexion.

Une fouille de ces deux bases réalisées par une analyse factorielle de données mixtes est ici proposée. Une double discrimination basée sur la couleur et la capacité de rétro-réflexion apparaît et identifie 8 groupes de marquages. Les profils de dégradation montrent qu'une relation entre la luminance et la rétro-réflexion doit prendre en compte le produit de marquage.

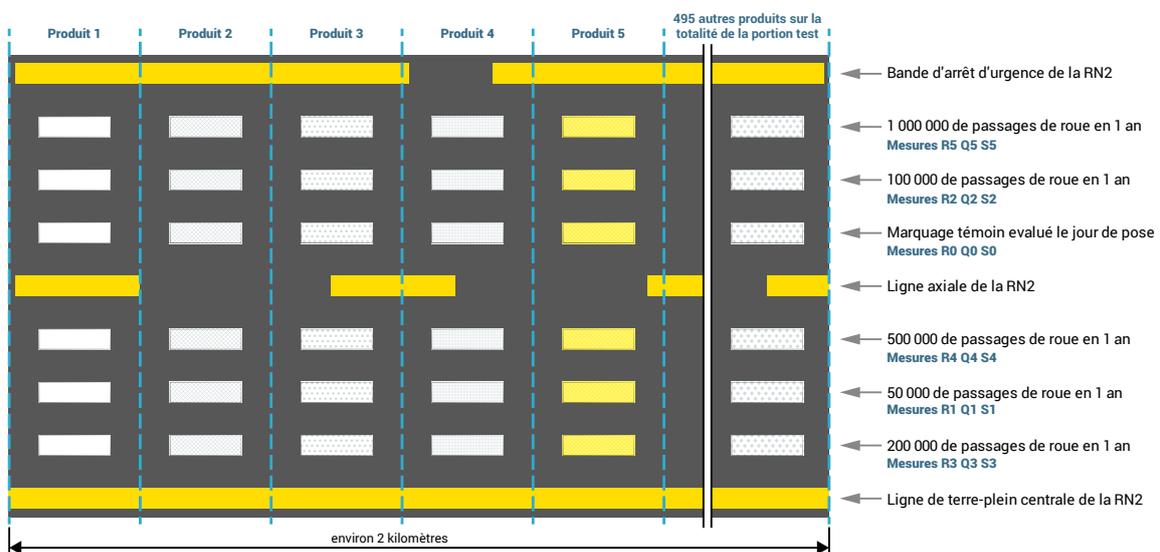


FIGURE C.2 – Banc d'essai de Boissy-Fresnoy sur la Route Nationale 2

L'ASCQUER a installé un banc d'essai sur la Route Nationale 2 aux abords de Boissy-Fresnoy (AFNOR 2012). Illustrée par la figure C.2, la route est divisée en sections accueillant un seul produit de marquage reproduit six fois. Un marquage subit un nombre de passages de roues par an estimé par un modèle fonction du trafic journalier (réévalué chaque année) (AFNOR 2012). Dans le sens de circulation, un marquage situé à l'extrême droite subit 1 000 000 de passages de roues par an tandis qu'un marquage à l'extrême gauche n'en subit que 200 000 par exemple. La pose est réalisée par les industriels sous la surveillance de l'ASCQUER. Un témoin est inspecté le jour de pose. Un an après, les marquages sont inspectés par l'ASCQUER et la dégradation simultanée de la rétro-réflexion, de la luminance et de l'adhérence en fonction du nombre de passages de roues est établie.

Un produit respectant finalement la norme NF EN 1436 (AFNOR 2018b) est autorisé à la vente. Sa dégradation théorique est publiée dans l'une des bases "Produit de MARquage" (PMA) (ASCQUER 2018a) ou "Visible de Nuit et par Temps de Pluie" (VNTP) (500 produits en février 2017) (ASCQUER 2018b).

Les variables qualitatives et quantitatives retenues sont :

- La capacité de rétro-réflexion (non, oui, VNTP),
- La chimie (bande préfabriquée, enduit à chaud ou à froid, peinture à l'eau, réactive ou solvantée, mélange de peintures, mélange d'enduits et de peintures),
- L'usage (tout usage, urbain, hors-agglomération, spécial, temporaire, sonore),
- Les six mesures de rétro-réflexion R_0, \dots, R_5 , de luminance Q_0, \dots, Q_5 et d'adhérence S_0, \dots, S_5 en fonction du nombre de passages de roues.

Le trafic journalier est exclu car stationnaire dans le temps (7920 ± 645 véhicules/jour).

C.2 Analyse factorielle des produits de marquages

La section A.2.1 rappelle le fonctionnement général de l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM). Cette technique répond à un besoin de confronter les variables tout en proposant une première représentation des individus. Le critère de Kalis-Saporta-Spinakis (KARLIS et al. 2003) sélectionne sept composantes principales comptabilisant 68% de l'inertie totale. Une CAH réalisée par la distance de Ward et basée sur les coordonnées des produits de marquage sur les sept composantes principales répond au besoin de regroupement des produits de marquages.

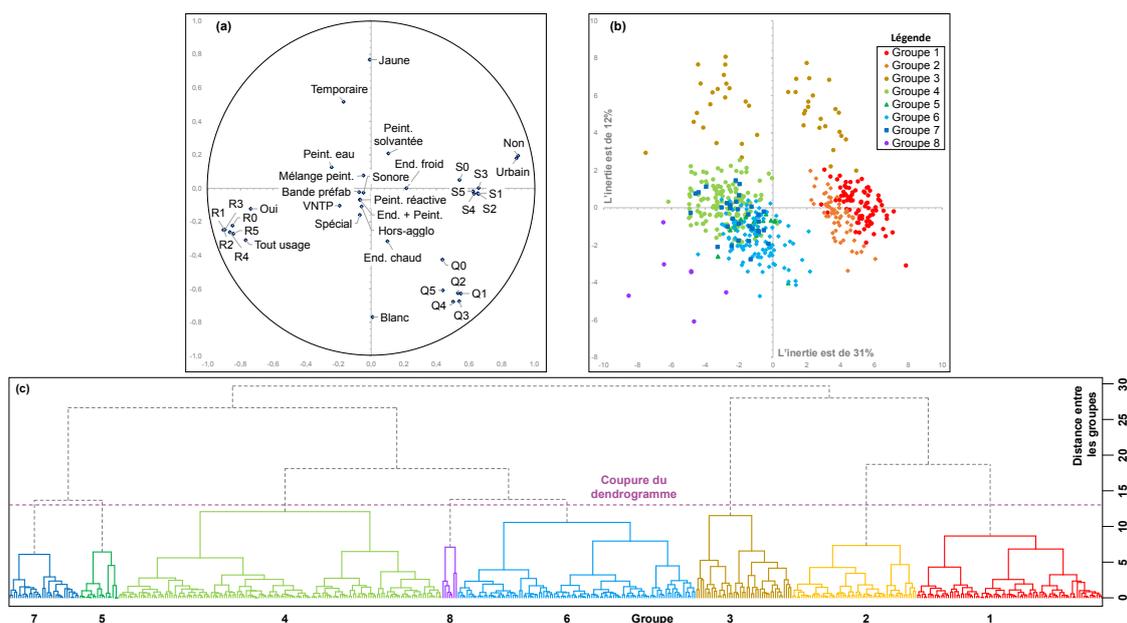


FIGURE C.3 – Cercle des corrélations (a) - Carte des individus par groupes projetés sur les deux premières composantes principales - Dendrogramme associée à la CAH (c)

Le cercle des corrélations (Fig C.3.a) indique les variables qui ont tendance à s'associer ou à se repousser via deux axes de discriminations : rétro-réfléchissant et tout usage opposé à non rétro-réfléchissant et urbain ainsi que jaune opposé à blanc luminant. La carte des individus (Fig C.3.b) est divisée en quatre parties. Les points les plus à droite ont tendance à favoriser la non rétro-réflexion, les plus à gauche au contraire la favorise, la partie supérieure de la carte favorise la couleur jaune et la partie inférieure le blanc luminant. Le dendrogramme (Fig C.3.c) est découpé à huit groupes. Cette coupe crée un groupe dont la rétro-réflexion est très élevée et réalise un compromis entre un regroupement

peu nuancé en six groupes et un regroupement trop précis en dix.

Typologie	Rétro-réflexion				Composition chimique							Couleur		Usage							
	Effectif	Non	VNTP	Oui	Bande préfab	End. chaud	End. froid	End. + Peint.	Peint. Eau	Mélange Peint.	Peint. réactive	Peint. solvantée	Blanc	Jaune	Tout	Sonore	Hors agglo	Spécial	Temporaire	Urbain	
1	85 (17%)	100%	-	-	7%	20%	21%	-	19%	-	4%	29%	100%	-	-	-	-	-	-	-	100%
2	57 (11%)	100%	-	-	7%	11%	35%	-	25%	-	4%	19%	100%	-	-	-	-	-	-	-	100%
3	44 (9%)	52%	5%	43%	18%	2%	14%	-	20%	5%	2%	39%	-	100%	14%	-	-	-	36%	50%	
4	148 (30%)	-	-	100%	3%	7%	12%	-	46%	-	9%	24%	100%	-	100%	-	-	-	-	-	-
5	18 (4%)	-	83%	17%	-	6%	17%	78%	-	-	-	-	100%	-	44%	17%	39%	-	-	-	-
6	109 (22%)	-	-	100%	9%	39%	6%	-	10%	-	8%	28%	100%	-	100%	-	-	-	-	-	-
7	32 (6%)	-	100%	-	3%	25%	6%	-	47%	13%	3%	3%	100%	-	100%	-	-	-	-	-	-
8	7 (1%)	-	14%	86%	100%	-	-	-	-	-	-	-	100%	-	71%	-	-	-	29%	-	-

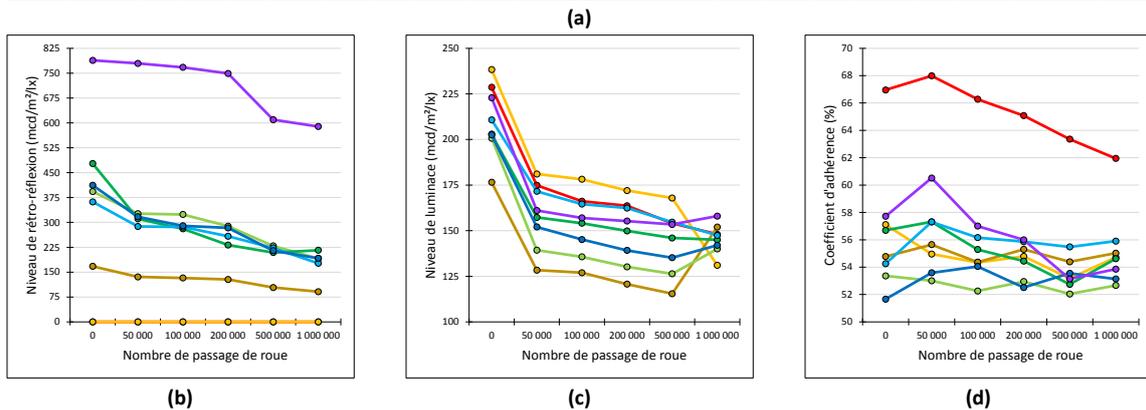


FIGURE C.4 - (a) Typologie et Profil qualitatif - Profil de dégradation en fonction du passage de roues : (b) Rétro-réflexion, (c) Luminance, (d) Adhérence

La figure C.4 présente les groupes. La figure C.4.a indique les effectifs et la répartition des propriétés qualitatives. Les figures restantes présentent le profil de dégradation en fonction du nombre de passages de roues des trois mesures. D'après le dendrogramme, le regroupement en six groupes agrège les actuels groupes 7 et 5 puis les groupes 4, 8 et 6. La regroupement en dix groupes divise les groupes 4 et 3.

Les groupes 1 et 2 sont les produits non rétro-réfléchissants blancs sans chimie particulière et exclusivement urbain. Le groupe 1 a la plus haute adhérence (65%) tandis que le groupe 2 admet quasi-systématiquement la plus haute luminance (240 à 130 $mcd/m^2/lx$).

Le groupe 3 regroupe les marquages jaunes à usage urbain ou temporaire (86%) avec autant de produits rétro-réfléchissants (48%) que non. L'adhérence est stationnaire (55%) et le niveau de rétro-réflexion et de la luminance sont les plus faibles.

Les groupes restants sont rétro-réfléchissants et blancs. Le groupe 8 a la plus haute rétro-réflexion (790 à 590 $mcd/m^2/lx$), est le plus petit (1%), est composé de bandes préfabriquées et est le seul habilité à un usage spécial (voie lente par exemple). Les groupes 4 à 7 ont le même profil de dégradation de la rétro-réflexion (410 à 195 $mcd/m^2/lx$).

Les groupes 4 et 6 portent la moitié des produits (52%) et sont tout usage. Le 4 privilégie la peinture (79%) tandis que le 6 s'oriente vers les alternatives (54%). Avec le 8, ce groupe a la plus haute luminance parmi les rétro-réfléchissants (225 à 160 $mcd/m^2/lx$) et son adhérence connaît une forte dégradation entre 50 000 et 1 000 000 passages de roues (61 à 54 %). Le groupe 4 admet le plus faible niveau de luminance (200 à 140 $mcd/m^2/lx$) et d'adhérence (53 %) parmi les produits rétro-réfléchissants.

Les groupes 5 et 7 sont garantis rétro-réfléchissants par temps de pluie (VNTP). Le 5 se distingue par un mélange d'enduits et de peintures (78 %) et un usage diversifié (sonore et hors agglomération). Le 7 privilégie la peinture (66 %) et est tout usage. Les profils de dégradation sont comparables.

L'AFDM identifie huit grandes familles hétérogènes de marquages dont les propriétés chimiques, l'usage et le mode de dégradation sont parfaitement descriptibles.

C.3 Conclusion

L'AFDM décrit huit familles de marquages : non rétro-réfléchissant avec une haute adhérence, non rétro-réfléchissant avec une haute luminance, jaune, rétro-réfléchissant avec une faible performance, mélange d'enduits et de peintures rétro-réfléchissant par temps de pluie, rétro-réfléchissant avec une haute luminance et adhérence, peinture rétro-réfléchissante par temps de pluie et bande préfabriquée rétro-réfléchissante avec une haute rétro-réflexion.

Cette synthèse correspond aux actuelles pratiques de la maintenance : la peinture est privilégiée, le marquage rétro-réfléchissant est tout usage, un marquage urbain propose une meilleure luminance, le jaune a un usage ciblé, les bandes préfabriquées sont hautement rétro-réfléchissantes. Cette étude peut être une référence pour les prochaines générations de marquages routiers classables sous forme d'individus supplémentaires.

L'inertie retenue en sept composantes principales est relativement petite (68%). Inclure le coût de pose théorique de chaque produit de marquage peut améliorer ce point tout en permettant, aux équipes de maintenance ou maintenanciers, un choix de marquage plus nuancé. La composition chimique est paradoxale : elle est la variable la plus diversifiée mais elle a un impact limité sur les profils de dégradation (sauf bande préfabriquée). Cette observation nuance la réputation des peintures ayant la durée de vie la plus courte. La couleur est particulièrement discriminante mais difficile à ignorer au regard de son rôle signalétique. Le dendrogramme associé à la CAH synthétise l'influence des axes de discrimination : les groupes 1-2, 5-7 et 4-6-8 sont regroupables par capacité de rétro-réflexion et le groupe 3 est isolé rapidement. La classification devrait être instable face à une rupture technologique.

Trois suites à cette étude sont envisagées. Le modèle de dégradation de (HAUTIERE et al. 2008) basé sur les mêmes données ne prend pas aussi finement en compte la chimie des marquages que peut apporter cette étude. L'approche proposée est inadaptée pour établir une analyse de durée de vie théorique. Sur ce point, une classification alternative basée sur un mélange gaussien (par exemple (MARBAC et al. 2014)) est envisagée. La bande préfabriquée présente la plus forte rétro-réflexion mais partage la luminance d'un marquage rétro-réfléchissant favorisant cette propriété. De fait, une expression analytique reliant ces deux mesures est difficile à établir sans prendre en compte les propriétés chimiques. Une approche basée sur un réseau de neurones est actuellement à l'étude.

Bibliographie

- ABBOUD, Nasser et Brian BOWMAN (2002), « Cost-and longevity-based scheduling of paint and thermoplastic striping », *in* : *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board 1794*, p. 55–62.
- AFNOR (2012), *NF EN 1824 - Produits de marquage routier - Essais routiers*.
- (2018a), *NF EN 13306 - Road marking materials - Road marking performance for road users*.
- (2018b), *NF EN 1436 (January 2018) - Maintenance - Maintenance terminology*.
- AL-MASAEID, Hashem R (1997), « Performance of safety evaluation methods », *in* : *Journal of transportation engineering* 123.5, p. 364–369.
- AL-MASAEID, H.R. et K.C. SINHA (1994), « Analysis of Accident Reduction Potentials of Pavement Markings », *in* : *Journal of Transportation Engineering* 120(5), p. 723–736.
- ANDRADY, A.L. (1997), *Pavement marking materials : assessing environment friendly performance*, National Academy Press.
- ANTLE, C.E. et L.J. BAIN (1969), « A property of maximum likelihood estimators of location and scale parameters », *in* : *SIAM Review* 11(7), p. 251–253.
- ARNLJOT, Hoyland et Marvin RAUSAND (2009), *System reliability theory : models and statistical methods*, t. 420, John Wiley & Sons.
- Arrete du 10 mai 2000 relatif a la certification de conformite des produits de marquage de chaussées*.
- ASCQUER (2018a), *Produits de marquage de chaussées*, http://ascquer.fr/produit-certifie/NF/12/PMA_NF2/Produits-de-marquage-de-chaussees---NF2.
- (2018b), *Produits de marquage visibles de nuit et par temps de pluie*, <http://ascquer.fr/produit-certifie/NF/11/VNTP/Produits-de-marquage-visibles-de-nuit-et-par-temps-de-pluie>.
- ASDRUBALI, F., C. BURATTI, E. MORETTI, F. D’ALESSANDRO et S. SCHIAVONI (2013), « Assessment of the Performance of Road Markings in Urban Areas : The Outcomes of the CIVITAS RENAISSANCE Project », *in* : *The Open Transportation Journal* 7, p. 7–19.
- BABIC, D., T.E. BURGHARDT et D. BABIC (2015), « Application and Characteristics of Waterborne Road Marking Paint », *in* : *International Journal for Traffic and Transport Engineering* 5(2), p. 150–169.
- BABIC, D., A. SCUKANEC et D. BABIC (2016), « Determining the correlation between daytime and night-time road markings visibility », *in* : *The Baltic journal of road and bridge engineering* 11(4), p. 283–290.
- BAGHERI, S.F., E. BAHRAMI SAMANI et M. GANJALI (2016), « The generalized modified Weibull power series distribution : theory and applications », *in* : *Communications in Statistics and data analysis* 94, p. 136–160.

- BAHAR, G., M. MASLIAH, T. ERWIN et E. TAN (2006), « Pavement Marking Materials and Markers : Real-World Relationship Between Retroreflectivity and Safety Over Time. », *in : NCHRP Report 17-28, Transportation Research Board, Washington, D.C.*
- BAIN, Lee et Max ENGLEHARDT (2017), *Statistical analysis of reliability and life-testing models : theory and methods (Second Edition)*, Routledge.
- BALAKRISHNAN, N. et D. MITRA (2012), « Left truncated and right censored Weibull data and likelihood inference with an illustration », *in : Communications in Statistics and data analysis* 56, p. 4011–4025.
- BALI, S., R. POTTS, J. FEE, I. TAYLOR et J. GLENNON (1978), « Cost-Effectiveness and Safety of Alternative Roadway Delineation Treatments for Rural Two-Lane Highways », *in : National Technical Information Services (Report FHWA-RD-78-50)*.
- BARILLOT, Jean, Hervé CABANES et Philippe CARILLO (2018), *La route et ses chaussées*, Eyrolles.
- BARLOW, R.E. et L. HUNTER (1961), « Optimum preventive maintenance policies », *in : Operations Research* 8, p. 90–100.
- BARLOW, R.E. et F. PROSCHAN (1996), *Mathematical Theory of Reliability, volume 17, second edition*, Society for Industrial et Applied Mathematics.
- BARROS, Anne (2003), « Maintenance des systèmes multicomposants sous surveillance imparfaite : modélisation stochastique et optimisation », thèse de doct., Troyes.
- BASILE, A.J. (1962), « Effect of Pavement Edge Markings on Traffic Accidents in Kansas », *in : Highway Research Board Bulletin* 308, p. 80–86.
- BLOCK, Henry W, Wagner S BORGES et Thomas H SAVITS (1985), « Age-dependent minimal repair », *in : Journal of applied probability* 22.2, p. 370–385.
- BONIC, L., A. DE GALIZIA et A. BRACQUEMOND (2017), *Identification of real world driving scenarios for the functional safety of autonomous vehicles*, IEEE.
- BORDES, L. et D. CHAUVEAU (2016), « Stochastic EM algorithms for parametric and semiparametric mixture models for right-censored lifetime data », *in : Comput Stat* 31, p. 1513–1538.
- BORDES, P, G GUINARD et G LAURENT (1996), *L'entretien courant des chaussées*, Service d'études techniques des routes et autoroutes.
- BOUVARD, K., S. ARTUS, C. BERENQUER et V.. COCQUEMPOT (2011), « Condition-based dynamic maintenance operations planning and grouping - Application to commercial heavy vehicles », *in : Reliability Engineering and System Safety* 96(6), p. 601–610.
- BRESSON, Guillaume, Mohamed-Cherif RAHAL, Dominique GRUYER, Marc REVILLOUD et Zayed ALSAYED (2016), « A cooperative fusion architecture for robust localization : Application to autonomous driving », *in : Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on*, IEEE, p. 859–866.
- BROWN, Mark et Frank PROSCHAN (1983), « Imperfect repair », *in : Journal of Applied probability* 20.4, p. 851–859.
- CASTANIER, Bruno (2001), « Modélisation Stochastique et Optimisation de la Maintenance Conditionnelle des Systemes a Degradation Graduelle », thèse de doct., Université de Technologie de Troyes.

- CASTANIER, Bruno (2012), *Contribution à l'optimisation de la décision sous incertitudes : application à la maintenance*.
- CASTANIER, Bruno, Antoine GRALL et Christophe BÉRENGUER (2005), « A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system », *in : Reliability Engineering & System Safety* 87.1, p. 109–120.
- CHAN, J. K. et L. SHAW (1993), « Modelling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance », *in : IEEE Transactions on Reliability* 42(4), p. 566–571.
- CHAUVEAU, D. (1995), « A stochastic EM algorithm for mixtures with censored data. », *in : Journal of statistical planning and inference* 46, p. 1–25.
- CHIARONI, F, Mohamed-Cherif RAHAL, Nicolas HUEBER et Frédéric DUFAUX (2018), « Learning with a generative adversarial network from a positive unlabeled dataset for image classification », *in : IEEE International Conference on Image Processing*.
- CHO, Danny I et Mahmut PARLAR (1991), « A survey of maintenance models for multi-unit systems », *in : European Journal of Operational Research* 51.1, p. 1–23.
- CHOUËIRI, Elias M, Ruediger LAMM, Juergen H KLOECKNER et Theodor MAILAENDER (1994), « Safety aspects of individual design elements and their interactions on two-lane highways : international perspective », *in : Transportation Research Record* 1445.
- COCOZZA-THIVENT, Christiane. (1997), *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes*. Springer.
- COSTELLO, Seosamh Benedict, William Frank MOSS, Christopher John READ et Steve GRAYER (2011), « Life-cycle planning methodology for ancillary highway assets », *in : Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, t. 164, 4, Thomas Telford Ltd, p. 251–257.
- COTTRELL, B.H..Jr (1988), « Evaluation of Wide Edge Lines on Two-Lane Rural Roads », *in : Transportation Research Record* 1160, p. 35–44.
- D'AGOSTINO, R.B (2017), *Goodness-of-fit-techniques*, Routledge.
- DE GALIZIA, A., A. BRACQUEMOND et E. ARBARETIER (2018), « A scenario-based risk analysis oriented to manage safety critical situations in autonomous driving », *in : European Safety and Reliability Conference, Trondheim, Norway*, 6p.
- DEKKER, Rommert et Ralph E WILDEMAN (1997), « A review of multi-component maintenance models with economic dependence », *in : Mathematical Methods of Operations Research* 45.3, p. 411–435.
- DEMPSTER, Arthur P, Nan M LAIRD et Donald B RUBIN (1977), « Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm », *in : Journal of the royal statistical society. Series B (methodological)*, p. 1–38.
- DO VAN, Phuc, Florent BRISSAUD, Anne BARROS, Christophe BÉRENGUER et Keomany BOUVARD (2012), « Dynamic grouping maintenance strategy with time limited opportunities », *in : Advances in Safety, Reliability and Risk Manag.*
- DOMHAN, M.M. et M.C FREDERIC (1975), *Marquage et balisage des routes*, Recherche routiere - Organisation de coopération et de développement économiques.

- DOYEN, Laurent et O GAUDOIN (2002), « Modelling and assessment of maintenance efficiency for repairable systems », in : *Proceedings of the ESREL 2002 conference (Lyon, France, 2002)*.
- DUCROS, Florence et Patrick PAMPHILE (2018), « Bayesian estimation of Weibull mixture in heavily censored data setting », in : *Reliability Engineering & System Safety* 180, p. 453–462.
- DUMONT, Eric (2001), *Evaluation du degre d'usure des marquages routiers par traitement d'images*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Convention DSCR-LCPC.
- DUPONT, Pierre et al. (2007), *Uni longitudinal des couches de roulement neuves : des surprises à éviter*, GNCD - Sous-groupe Uni Longitudinal.
- EL HAJJ, Boutros (2015), « Modélisation probabiliste de dégradations multiphasiques pour l'optimisation de la maintenance d'infrastructures en génie civil : Application à une structure en béton armé immergée », thèse de doct., Nantes.
- ELMAHDY, E.E. (2015), « A new approach for Weibull modeling for reliability life data analysis », in : *Applied Mathematics and computation* 250, p. 708–720.
- ERLICH, J. (2017), *Quelle infrastructure pour le véhicule autonome ?*
- ESCOFIER, Brigitte et Jérôme PAGÈS (2008), *Analyses factorielles simples et multiples : objectifs, méthodes et interprétation*, Dunod.
- EUROPEAN COMMISSION (1999), *COST 331 : requirements for horizontal road marking : final report of the action*.
- EVANS, James W, Richard Arnold JOHNSON et David William GREEN (1989), *Two-and three-parameter Weibull goodness-of-fit tests*, t. 493, US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- FAN, Jianqing (2018), *Local polynomial modelling and its applications : monographs on statistics and applied probability*, Routledge.
- FAURE, Michel (1998), *Cours de routes - Tome 1 et 2*, Les cours de l'ENTPE.
- FÉRÉ, Frédéric (2016), *Guide pratique de la signalisation horizontale*, SIGNATURE GROUP.
- GERTSBAKH, Ilya (2013), *Reliability theory : with applications to preventive maintenance*, Springer.
- GIORGIO, Massimiliano et Gianpaolo PULCINI (2018), « A new state-dependent degradation process and related model misidentification problems », in : *European Journal of Operational Research* 267.3, p. 1027–1038.
- GOLPARVAR-FARD, Mani, Vahid BALALI et Jesus M de la GARZA (2012), « Segmentation and recognition of highway assets using image-based 3D point clouds and semantic Texton forests », in : *Journal of Computing in Civil Engineering* 29.1, p. 14–23.
- GOUBERT, L, G MICHAUX et C TOUSSAINT (2007), *Code de bonne pratique pour l'exécution des marquages routiers*.
- GRALL, Antoine, Laurence DIEULLE, Christophe BÉRENGUER et Michel ROUSSIGNOL (2002), « Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system », in : *IEEE transactions on reliability* 51.2, p. 141–150.
- HAUTIÈRE, Nicolas, Vincent LEDOUX, Jean-Philippe TAREL, Vincent BOUCHER et Pierre CHARBONNIER (2008), « Observation, modélisation et prédiction de la dégradation

- temporelle des marquages routiers », *in* : *Projet DIVAS - Dialogue Infrastructure Véhicules pour Améliorer la Sécurité routière*, p. 195–212.
- HAZELHOFF, Lykele, Ivo M CREUSEN, Thomas WOUDEMA et al. (2015), « Exploiting automatically generated databases of traffic signs and road markings for contextual co-occurrence analysis », *in* : *Journal of Electronic Imaging* 24.6, p. 1–20.
- HILLEL, A.B., R. LERNER, D. LEVI et G. RAZ (2014), « Recent progress in road and lane detection : a survey », *in* : *Machine Vision and Applications* 25(3), p. 727–745.
- HUYNH, Khac Tuan (2011), « Quantification de l'apport de l'information de surveillance dans la prise de décision en maintenance », thèse de doct., Université de Technologie de Troyes.
- IISR (2011), *Instruction interministerielle sur la signalisation routière, 7eme partie : Marquages sur chaussée*.
- JOHNS, R.C. et Matthias J.S. (1997), « Relationship of the Color of the Highway Centerline Stripe to the Accident Rate in Arizona », *in* : *Transportation Research Record* 643, p. 32–36.
- KARLIS, Dimitris, Gilbert SAPORTA et Antonis SPINAKIS (2003), « A simple rule for the selection of principal components », *in* : *Communications in Statistics-Theory and Methods* 32.3, p. 643–666.
- KARWA, V. et E. DONNELL (2011), « Predicting Pavement Marking Retroreflectivity Using Artificial Neural Networks : Exploratory Analysis », *in* : *Journal of Transportation Engineering* 137(2), p. 91–103.
- KHOURY, E. (2012), « Modelisation de la durée de vie résiduelle et maintenance prédictive : application à des véhicules industriels », thèse de doct., Université de Technologie de Troyes, France.
- KOPF, J. (2004), « Reflectivity of Pavement Markings : Analysis of Retroreflectivity Curves. », *in* : *Washington State Transportation Center, University of Washington, Report No. WA-RD 592.1. (2004)*.
- KRIT, Meryam (2014), « Goodness-of-fit tests in reliability : Weibull distribution and imperfect maintenance models », thèse de doct., Université de Grenoble.
- KRIT, Meryam, Emmanuel REMY et Olivier GAUDOIN (2014), « Goodness-of-fit tests for the Weibull distribution : complete and censored data (Communication 4B-2) », *in* : *19e Congrès de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement*.
- KRIT, Meryam, Olivier GAUDOIN, Min XIE et Emmanuel REMY (2016), « Simplified Likelihood Based Goodness-of-fit Tests for the Weibull Distribution », *in* : *Communications in Statistics - Simulation and Computation* 45.3, p. 920–951.
- KUMAR, Pankaj, Conor P McELHINNEY, Paul LEWIS et Timothy MCCARTHY (2014), « Automated road markings extraction from mobile laser scanning data », *in* : *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 32, p. 125–137.
- KUNDU, D. et A. KUMAR DREY (2009), « Estimating the parameters of the Marshall-Olkin bivariate Weibull distribution by EM Algorithm », *in* : *Computational Statistics and Data Analysis* 53, p. 956–965.

- LAM, C.T. et R.H. YEH (1994), « Optimal Replacement Policies for Multistate Deteriorating Systems. », *in* : *Naval Research Logistics* 41), p. 303–315.
- LEE, Hyun-Seok, Heung-Un OH et Jung-Hwa JANG (2010), « Development of the decay curve of pavement marking retroreflectivity based on a field survey », *in* : *REAAA Journal* 16(1), p. 42–51.
- LEE, J-T., T. MALECK et W. TAYLOR (1999), « Pavement Marking Material Study in Michigan. », *in* : *Institute of Transportation Engineering (ITE) Journal*, p. 44–50.
- LEE, Seokju et al. (2017), « VPGNet : Vanishing point guided network for lane and road marking detection and recognition », *in* : *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, IEEE, p. 1965–1973.
- LIAO, H., E. ELSAYED et L. CHAN (2006), « Maintenance of continuously monitored degrading systems », *in* : *European Journal of Operational Research* 175(2), p. 821–835.
- LIM, TJ (1998), « Estimating system reliability with fully masked data under Brown-Proschan imperfect repair model », *in* : *Reliability Engineering & System Safety* 59.3, p. 277–289.
- LINDLY, J.K. et R.K. WIJESUNDERA (2003), « Evaluation of Profiled Pavement Markings. », *in* : *Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Alabama, UTCA Report Number 01465 (2003)*.
- LORINO, Tristan (2008), *Rapport de la première tâche du projet SBaDFoRM*, Technical report (IFSTTAR).
- LOUTZENHEISER, R.C. (1996), « Wide Pavement Markings on Rural Two-Lane Roads », *in* : *Transportation Research Board 75th Annual Meeting* 250, p. 7–11.
- LU, J.J. (1995), « Performance of Traffic Markings in cold regions. », *in* : *Transportation Research Center, University of Alaska Fairbanks, Report No. INE/TRC 95.03 (1995)*.
- LUNDKVIST, S.O. et U. ISACSSON (2007), « Prediction of Road Marking Performance », *in* : *Journal of Transportation Engineering* 133, p. 341–346.
- MALIK, Mazhar Ali Khan (1979), « Reliable preventive maintenance scheduling », *in* : *AIIE transactions* 11.3, p. 221–228.
- MANN, Nancy R, Ernest M SCNEUER et Kenneth W FERTIG (1973), « A goodness-of-fit test for the two-parameter Weibull or extreme-value distribution with unknown parameters », *in* : *Communications in Statistics-Theory and Methods* 2.5, p. 383–400.
- MARBAC, Matthieu, Christophe BIERNACKI et Vincent VANDEWALLE (2014), « Classification de données mixtes par un modèle de mélange de copules gaussiennes. », *in* : *46ème Journées de Statistique, Rennes, France*, 8p.
- MARSILI, F, J BÖDEFELD, P CROCE et F LANDI (2018), « Bayesian approaches to lifetime prediction », *in* : *Safety and Reliability—Safe Societies in a Changing World*, CRC Press, p. 707–715.
- MCLACHLAN, G.J. et T. KRISHNAN (2008), *The EM Algorithm and Extensions*, John Wiley et Sons.
- MENANT, Fabien (2014), « Estimation de l'uni longitudinal des infrastructures routières au moyen de véhicules traceurs », thèse de doct., Université Nantes Angers Le Mans.

- MIGLETZ, James, Jerry L. GRAHAM, Douglas W. HARWOOD et Karin M. BAUER (2001), « Service Life of Durable Pavement Markings. », *in* : *Transportation Research Record* 1749, p. 13–21.
- MORVAN, Alain (2018), *Des véhicules autonomes bientôt en test en Lorraine*, Le Républicain Lorrain (édition du 11 Septembre 2018).
- MULL, D.M. (2011), « Paint Pavement Marking Performance Prediction model that includes the impacts of snow removal operations », thèse de doct., Département of the Air Force, Air University, Air Force Institute of Technology.
- MUSICK, J.V. (1960), « Effect of Pavement Edge Marking on Two-Lane Rural State Highways in Ohio », *in* : *Highway Research Board Bulletin* 266, p. 1–7.
- NISHINO, Sakiko, Kimitake WAKAYAMA, Md Shoaib BHUIYAN, Haruki KAWANAKA et Oguri KOJI (2015), « Measurement and Management of the Lane Markings' Stripping Ratio from In-vehicle Camera Image », *in* : *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on*, IEEE, p. 1755–1760.
- OZELIM, Luana et Rod E TUROCHY (2014), « Modeling retroreflectivity performance of thermoplastic pavement markings in Alabama », *in* : *Journal of Transportation Engineering* 140.6, p. 05014001.
- PAGÈS, Jérôme (2004), « Analyse factorielle de données mixtes », *in* : *Revue de statistique appliquée* 52.4, p. 93–111.
- PARK, K.S. (1988a), « Optimal Continuous-Wear Limit Replacement under Periodic Inspections. », *in* : *IEEE Transactions on Reliability* 37(1), p. 97–102.
- (1988b), « Optimal Wear-Limit Replacement with Wear-Dependent Failures. », *in* : *IEEE Transactions on Reliability* 37(3), p. 293–294.
- PRADHAN, B., et Debasis KUNDU (2014), « Analysis of Interval-Censored Data with Weibull Lifetime Distribution », *in* : *Sankhya B : The Indian Journal of Statistics* 76(1), p. 120–139.
- RASDORF, William J, Joseph E HUMMER, Guanghua ZHANG, William SITZABEE et al. (2009), *Pavement marking performance analysis*, North Carolina Department of Transportation Raleigh, NC.
- RAUSAND, M. et A. HOYLAND (2004), *System Reliability Theory-Models, Statistical Methods, and Applications*, Wiley.
- REDONDIN, M. (2018), « Analyse factorielle pour la classification des produits de marquages routiers », *in* : *50emes Journée de Statistique, 2018, Palaiseau, France*, 6p.
- REDONDIN, M., L. BOUILLAUT, D. DAUCHER et N. FAUL (2017a), « Reconstruction of missing retroreflective data according to yearly inspection of markings », *in* : *Mathematical Methods in Reliability Conference 2017, Grenoble, France*, 8p.
- (2017b), « Temporal clustering of retroreflective marking », *in* : *European Safety and Reliability Conference, Portorz, Slovenia*, 7p.
- REDONDIN, M., L. BOUILLAUT, A. SAME, D. DAUCHER et N. FAUL (2018a), « Alternative Weibull analysis for road markings : an EM approach », *in* : *European Safety and Reliability Conference, Trondheim, Norway*, 7p.

- (2018b), « Un algorithme EM pour l'analyse de durée de vie des marquages routiers retro-reflechissants », in : *21e Congrès de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement (Reims - France)*, 7p.
- REVILLOUD, Marc (2016), « Architecture de perception adaptative pour la détection et le suivi multivoies », thèse de doct., Université Paris-Saclay.
- REVILLOUD, Marc, Dominique GRUYER et Evangeline POLLARD (2013), « An improved approach for robust road marking detection and tracking applied to multi-lane estimation », in : *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, IEEE, p. 783–790.
- REVILLOUD, Marc, Dominique GRUYER et Mohamed-Cherif RAHAL (2016a), « A lane marker estimation method for improving lane detection », in : *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on*, IEEE, p. 289–295.
- (2016b), « A new multi-agent approach for lane detection and tracking », in : *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 3147–3153.
- ROSS, Sheldon M (1984), « A model in which component failure rates depend on the working set », in : *Naval research logistics quarterly* 31.2, p. 297–300.
- SAPORTA, Gilbert (2006), *Probabilités, analyse des données et statistique*, Editions Technip.
- SARASUA, W. A., D. B. CLARKE et W. J. DAVIS (2003), « Evaluation of Interstate Pavement Marking Retroreflectivity. », in : *Report to South Carolina Department of Transportation, Report No. FHWA-SC-03-01 (2003)*.
- SATHYANARAYANAN, Sudhakar, Venky SHANKAR et Eric T. DONNELL (2008), « Pavement Marking Retroreflectivity Inspection Data : A Weibull Analysis. », in : *Journal of the Transportation Research Board*. 2055, p. 63–70.
- SCHUEER, Michael, Thomas MALECK et Dale LIGHTHIZER (1997), « Paint-line retroreflectivity over time », in : *Journal of the Transportation Research Board* 1585, p. 53–63.
- SEBER, GAF et CJ WILD (1989), *Nonlinear regression*, John Willey & Sons New York.
- SITZABEE, W.E., J.E. HUMMER et W. RASDORF (2009), « Pavement Marking Degredation Modeling and Analysis. », in : *Journal of infrastructure systems* 15(3), p. 190–199.
- SMADI, O., R.R. SOULEYRETTE, D.J. ORMAND et N. HAWKINS (2008), « Pavement Marking Retroreflectivity : Analysis of Safety Effectiveness », in : *Journal of the Transportation Research Board* 2056, p. 17–24.
- SMITH, WL et MR LEADBETTER (1963), « On the renewal function for the Weibull distribution », in : *Technometrics* 5.3, p. 393–396.
- THAMIZHARASAN, Akila, Wayne A SARASUA, David B CLARKE et William J DAVIS (2003), « 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*.

- THOMAS, LC (1986), « A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems », *in* : *Reliability Engineering* 16.4, p. 297–309.
- TIDJANI, A., M. REDONDIN, L. BOUILLAUT et D. DAUCHER (2018), *Impact de l'infrastructure routiere sur la signalisation horizontale (Rapport de stage de fin d'etude)*, Institut VEDECOM, IFSTTAR, Universite de Lorraine.
- TIJMS, Hendrik Cornelis et Frank Anthonie DUYN SCHOUTEN (1985), « A Markov decision algorithm for optimal inspections and revisions in a maintenance system with partial information », *in* : *European Journal of Operational Research* 21.2, p. 245–253.
- TIKU, ML et M SINGH (1981), « Testing the two parameter Weibull distribution », *in* : *Communications in Statistics-Theory and Methods* 10.9, p. 907–918.
- TREMBLAY, M. (2004), « Nouvelle approche de gestion de la signalisation horizontale au Quebec », *in* : *Congres annuel de l'Association des transports du Canada 2004, Quebec*, 14 p.
- (2008), « Etat des connaissances sur les peintures à base d'eau pour le marquage routier », *in* : *Congres annuel de l'Association quebecoise du transport et des routes*, 17 p.
- TUFFERY, S. (2011), *Data Mining and Statistics for Decision Making*, John Wiley et Sons.
- VECTRA (2017), *ECODYN mlpc - Signing visibility (en cours de migration vers <http://www.nextroad.com/>), <http://vectrafrance.com/materials-and-solutions/road-surface-testing/ecodyn-mlpcR-signing-visibility?L=6>*.
- VU, Hai Canh, Phuc DO, Anne BARROS et Christophe BÉRENGUER (2014), « Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies », *in* : *IMA Journal of Management Mathematics* 26.2, p. 145–170.
- WANG, W. (2000), « A Model to determine the Optimal Critical Level and the Monitoring Intervals in Condition-Based Maintenance. », *in* : *International Journal of Production Research* 38(6), p. 1425–1436.
- WILDEMAN, Ralph Edwin, Rommert DEKKER et ACJM SMIT (1997), « A dynamic policy for grouping maintenance activities », *in* : *European Journal of Operational Research* 99.3, p. 530–551.
- XIAO, Liang, Chuanxiang LI, Dawei ZHAO, Tongtong CHEN et Bin DAI (2016), « Road marking detection based on structured learning », *in* : *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2016 12th World Congress on, IEEE*, p. 2047–2051.
- YEH, Ruey Huei (1997), « State-age-dependent maintenance policies for deteriorating systems with Erlang sojourn time distributions », *in* : *Reliability Engineering & System Safety* 58.1, p. 55–60.
- ZOUCH, Mariem (2011), « Decision dans l'incertain : Application à la gestion de l'entretien routier », thèse de doct., Universite de Nantes, France.