



Approches de classifications pour l'analyse de fiabilité et la définition de stratégies de remplacement préventive des marquages routiers

Maxime Redondin, Laurent Bouillaut, Dimitri Daucher

► To cite this version:

Maxime Redondin, Laurent Bouillaut, Dimitri Daucher. Approches de classifications pour l'analyse de fiabilité et la définition de stratégies de remplacement préventive des marquages routiers. 22e Congrès de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement 2020, Oct 2020, LE HAVRE, France. 12p. <hal-02971652>

HAL Id: hal-02971652

<https://hal.science/hal-02971652v1>

Submitted on 19 Oct 2020

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.



HAL Authorization

Approches de classifications pour l'analyse de fiabilité et la définition de stratégies de remplacement préventive des marquages routiers

Clustering-based approach for reliability analysis and the definition of preventive replacement strategies for road markings

REDONDIN Maxime

Sensor for Autonomous Vehicle and
Infrastructure and its Maintenance
Institut VEDECOM
23 allée des marronniers, mobiLAB,
78000, Versailles
maxime.redondin@vedecom.fr

Laurent Bouillaut

COSYS-GRETTIA, IFSTTAR
Université Gustave Eiffel
77447, Marne-la-Vallée
laurent.bouillaut@ifsttar.fr

Dimitri Daucher

COSYS- PICSL, IFSTTAR
Université Gustave Eiffel
77447, Marne-la-Vallée
laurent.bouillaut@ifsttar.fr

Abstract— Cette communication introduit une approche originale de la maintenance des lignes de marquage. Une classification ascendante hiérarchique segmente la ligne en zones stratégiques et un algorithme EM estime un modèle de durée de vie des marquages. Deux stratégies sont discutées : systématique par rapport à l'âge et conditionnée par la dégradation courante.

This paper introduces an original maintenance decision-making for road marking. An ascending hierarchical classification segments the line into strategic zones and an EM algorithm estimates a lifetime model of markings. Two strategies are discussed: aged-based systematic and conditioned-based replacement policies.

Keywords— *marquage routier, classification ascendante hiérarchique, algorithme EM, remplacement conditionné, remplacement systématique*

Road marking, ascending hierarchical classification, EM algorithm, conditioned-based replacement, age-based replacement

I. LE MARQUAGE ROUTIER ET SON ENTRETIEN

A. Le rôle signalitique des marquages routiers

La qualité et la fiabilité de la signalisation horizontale routière jouent un rôle majeur dans la sécurité. Elle va s'accroître à la mise en circulation des véhicules autonomes qui vont l'analyser pour circuler dans l'environnement routier. Les capteurs standards de perception attendent des infrastructures routières que celles-ci soient "lisibles" et possèdent des caractéristiques quantifiées qui restent à expliciter en détail [1].



Fig. 1. Détection de ligne proposée par VEDECOM : (a) cas standard [3], (b) cas dégradé [2]

Quelques situations sont d'ores et déjà connues. Par exemple, l'institut VEDECOM propose une détection de ligne au moyen d'une caméra et une approche multi-agent [2]. En condition standard, elle permet de modéliser 95% la ligne (fig 1.a) [3]. En cas d'absence ou de marquages endommagés, un exemple montre que la ligne de rive droite n'est détectée qu'à hauteur de 85% et la ligne axiale n'est pas reconnue (fig 1.b). Dans une conduite autonome, l'arrêt du véhicule ou la reprise en main seront demandés. Ces travaux de thèse proposent des outils d'aide à la maintenance préventive des marquages routiers pour prévenir ces situations.

Les signes de dégradation sont connus de longue date mais sont à ce jour mal maîtrisés du point de vue de la prévision de leur apparition et des dynamiques de dégradation sous-jacentes [4]. En effet, la grande diversité des infrastructures routières, de leur fréquentation en termes de trafic, des conditions climatiques rencontrées mais aussi des produits de marquage utilisés pour les réaliser compliquent considérablement la tâche de modélisation. Un autre enjeu est la réduction progressive des budgets d'entretien [5][6].

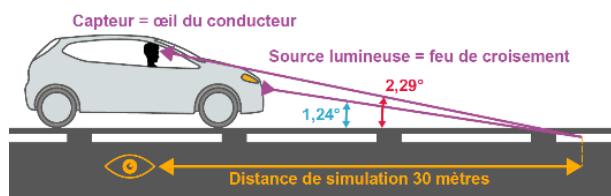


Fig. 2. Conditions de mesure du coefficient de rétro réflexion retenues par la norme NF EN 1436 [7]

Les capteurs de perception d'un véhicule permettront à terme de capter des informations sur l'infrastructure routière. Par exemple, la non-détection d'une ligne de marquage peut être un signe de dégradation avancé ou la différence de contraste entre le marquage et la chaussée [8] peuvent être un indicateur de fiabilité. Ces questions restent ouvertes à ce jour. La visibilité de nuit est le principal indicateur de fiabilité des marquages routiers qui est mesuré par le (coefficient de) rétro réflexion en millicandela par mètre carré et par lux ($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$) [7][9]. La figure 2 présente les conditions retenues par la norme NF EN 1436 [7] : les phares émettent une lumière à 30m sur le marquage qui renvoie une partie vers le conducteur. La rétro réflexion est le rapport entre la luminance de la surface du marquage routier et l'éclairement créé par les phares.

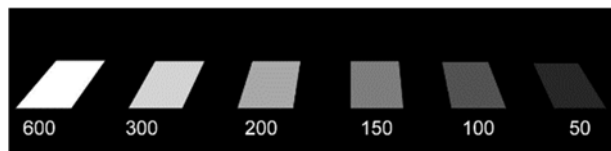


Fig. 3. Visibilité de nuit d'un marquage routier rétro réfléchissant blanc en fonction de son niveau de rétro réflexion ($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$) [10]

La figure 3 est le modèle de visibilité de nuit standard. Un marquage est rétro réfléchissant s'il admet un niveau de rétro réflexion à neuf d'au moins $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ et compense l'absence d'éclairage public. Une rétro réflexion d'au moins $200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ assure la vision d'un marquage blanc parfaitement visible. Ce niveau décroît avec l'usure du produit de marquage et est corrélé à la perte de visibilité. En dessous de $100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, le marquage risque d'être perçu comme un objet gris (dans le meilleur des cas).

B. Description et inspection des lignes de marquage

Cette communication se limite aux marquages à base de peinture à l'eau. Chaque produit suit sa propre chimie et technique de pose pour assurer un niveau de rétro réflexion optimal [4]. Une classification des produits de marquage, réalisé par l'auteur, montre cependant que la performance de rétro réflexion est liée à la chimie du produit [11].



Fig. 4. Compostion et pose d'un marquage rétro réfléchissant blanc à base de peinture à l'eau : (a) coupe, (b) une machine applicateur adapté [10].

La figure 4.a montre qu'un marquage est un mélange de peinture et de microbille en verre (assurant la rétro réflexion) posé sur la couche de roulement d'une chaussée [10]. La figure 4.b est un exemple de machine applicateur : la peinture

est directement posée sur la chaussée et les microbilles sont déposés immédiatement [10]. En France, la pose des lignes suit un dimensionnement précis.

La figure 5 est une synthèse du dimensionnement fixé par l'instruction interministérielle sur la sécurité routière [12]. Par exemple, la ligne T1 correspond à la ligne axiale dont l'objectif est de séparer les voies de circulation tout en autorisant les dépassements. Les marquages font 3m de long et sont espacés de 10m. La largeur est fixée en fonction de la zone géographique de la chaussée. La rétro réflexion de ces lignes est aujourd'hui dynamiquement évaluée par des rétro réflectomètres.

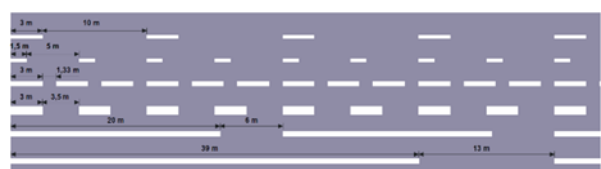


Fig. 5. Dimensionnement réglementaire des lignes longitudinales reconnues

La figure 6.a introduit le processus d'inspection standard des lignes. Un rétro réflectomètre est fixé sur le flanc d'un véhicule et envoie sa propre lumière à 30m sur la ligne et un récepteur capte la lumière renvoyée. Le rétro réflectomètre considéré dans cette communication est l'Ecodyn de Nextroad [13] dont la figure 6.b montre la version 3. La configuration standard permet une mesure tous les 40 cm mais émet une mesure moyennée et filtrée (des mesures trop faibles attribuées à la chaussée) sur 100 m. Une base de données est construite au cours de l'inspection et est éventuellement complétée a posteriori par une description de l'infrastructure routière (via Réseau Routier National [14] par exemple).

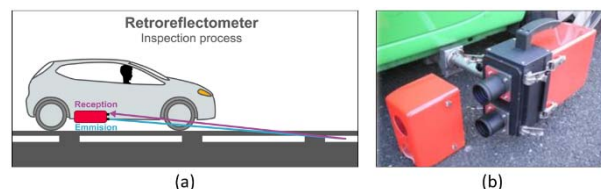


Fig. 6. Processus d'inspection d'une ligne de marquage : (a) inspection via un rétro réflectomètre, (b) un Ecodyn 3 [13].

C. Stratégie de remplacement préventif proposée

Dans ces travaux, une ligne de marquage est défaillante lorsque les marquages atteignent un seuil de rétro réflexion minimal donné, $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ par exemple. Elle est également constituée de marquages indépendants entre eux et non-réparable dont la défaillance n'est observable que par une campagne d'inspection. Son remplacement est la seule action logistiquement possible [4] [10].

La section II introduit la littérature spécialisée dans la fiabilité des marquages routiers qui est principalement constituée de modèles de dégradation basés sur une méthode de régression. Le niveau de rétro réflexion d'une ligne donnée à un instant souhaité et sont entraînés par des données de retour d'expérience. Le plan de maintenance qui en découle consiste à prédire l'instant où la ligne de marquages est insuffisamment rétro réfléchissante puis programmer une action de maintenance à cette échéance [15]. Plusieurs critiques sont connues dont absence de consensus sur le type de régression ou le choix des variables explicatives à considérer. La qualité des données de retour d'expérience est

généralement peu soulevée dans la bibliographie [16]. Par exemple, la censure (par le protocole d'inspection) des durées de vie des marquages et son impacte sur les modèles de durée de vie sont abordés dans cette communication.

Ces travaux sont dans la continuité de la rupture scientifique amorcé par [16] et proposent d'étudier la fiabilité et la maintenance des lignes de marquage par une approche stochastique. Une autre originalité consiste à étudier les données de retour d'expérience dans son ensemble et identifier par une méthode de clustering les marquages présentant le même processus [17]. La stratégie de maintenance proposée repose sur trois points. La section III introduit la classification ascendante hiérarchique pour l'identification des dynamiques de dégradations dans les données de retour d'expérience (interprété comme une zone de maintenance). La section IV présente un algorithme EM pour la modélisation d'un modèle de durée de vie des marquages optimisé à chaque zone [18][19]. La section V propose finalement la modélisation et la comparaison entre une stratégie de remplacement systématique par rapport à l'âge ou conditionné à la dégradation courante.

II. MODÈLES DE DÉGRADATION DES MARQUAGES DISPONIBLE

A. Modèles de dégradation des marquages routiers.

Le premier modèle de dégradation connu construit à partir de données de retour d'expérience est proposé par Lu [20]. La rétroreflexion des marquages RL est expliqué par son âge t et par un modèle exponentiel (1) dont le triplet (a, b, c) dépend du type de produit de marquage. Le coefficient de détermination (R^2) mesure la qualité de prédiction du modèle et est très volatile : 20% dans le cas d'enduit à chaud et 90% pour le méthacrylate à double ration de microbille.

$$\forall t \geq 0, \quad RL(t) = a + be^{ct} \quad (1)$$

Plusieurs modèles concurrents sont proposés depuis mais l'approche générale fait consensus : expliquer la rétroreflexion au moins par l'âge du marquage et prédire l'instant où le niveau rétroreflexion est faible puis planifier une action de remplacement à cette occasion. Par exemple, Scheuer et al [21] proposent un modèle linéaire par rapport à l'âge sur différentes infrastructures de l'Etat du Michigan et présente un R^2 inférieur à 50% et très volatile en fonction du produit de marquage. Bahar et al [22] introduisent un polynôme de degrés deux inversés sans mesurer la qualité de prédiction.

$$\forall t > 0, \quad \Delta RL(t) = -a - bt \quad (2)$$

Au lieu de prédire la rétroreflexion à l'âge t , Sarasua et al. [23] puis Thamizharasan et al. [24] prédisent, par le modèle linéaire (2), la perte de rétroreflexion entre la pose et l'âge t des marquages $\Delta RL(t)$. Le couple (a, b) dépend du produit de marquage. [24] présente un critère R^2 plus robuste mais sous réserve de renseigner le type de revêtement de chaussée.

$$\forall r > 0, \quad RL(r) = RL(0) \cdot e^{a \ln^2(r+1) + b \ln(r+1) + c} \quad (3)$$

Le trafic est la seconde variable explicative consensus. Hautière et al. [25] proposent un modèle exponentiel polynomial (3) en fonction du nombre de passage de roue r

subit par les marquages et du niveau de rétroreflexion à neuf. Le triplet (a, b, c) dépend du type de produit de marquage. Avec une erreur quadratique moyenne de 10%, le modèle est l'un des plus robustes de la littérature mais le nombre de passage de roue subi par un marquage est difficilement estimable sur route ouverte.

$$\forall cve > 1, \quad RL(cve) = a \ln(cve) + b \quad (4)$$

Le trafic est généralement traité comme un facteur de dégradation supplémentaire à l'âge. Indépendamment, Abboud et Bowman [26], Lindly et Wijesundera [27] et Lee et al. [28] introduisent l'*exposition cumulée au trafic*¹ (cve) définie comme le produit pondéré entre l'âge du marquage et le trafic journalier annuel moyen. Sans faire consensus, la pondération prend en compte le nombre de ligne de marquage. Chaque auteur prédit la rétroreflexion par un modèle logarithmique dont le couple (a, b) dépend du produit de marquage. A l'échelle des autoroutes sud-coréennes, Lee et al. [28] présentent le modèle le plus fiable en qualité de prédiction avec un critère R^2 moyen de 98%. Lindly et Wijesundera [27] ont réalisé une comparaison avec une alternative linéaire, polynomiale et exponentielle puis recommandent le modèle exponentiel sous l'hypothèse d'une chaussée sec et linéaire sinon.

$$RL(t) = 190 + 0.39RL(0) - 2.09t - 0.0011AADT + 20.7(x_1 - x_2) + 19(x_3 - x_4) \quad (5)$$

Plusieurs auteurs expliquent la rétroreflexion par les caractéristiques de l'infrastructure routière. Sitzabee et al. [15] prédisent la rétroreflexion de marquage thermoplastique (5) en fonction de l'âge t , du niveau à neuf $RL(0)$, du trafic journalier annuel moyen $AADT$, la ligne de marquage ($x_1 = 1$ 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 sinon ; $x_4 = 1$ si jaune et 0 sinon). Une adaptation pour les marquages à base de peinture est disponible [15] et les travaux de thèse de Mull [29] ajoutent la fréquence des chasse-neiges. Face à l'augmentation du nombre de variable pouvant décrire l'infrastructure, Karwa et Donnell [30] recommandent de prédire la rétroreflexion par un réseau de neurone.

Une étude comparée à l'échelle des autoroutes de l'Etat d'Alabama conduit Ozelim et Turochy à recommander uniquement les modèles de Sitzabee et al. ou Thamizharasan et al. Migletz et al. recommandent la construction d'un modèle linéaire ou exponentiel par rapport à l'âge tout en soulignant des problèmes de prédiction liés à la diversité des infrastructures routière. Kopf rejoint ces observations. Dans ce contexte, l'utilisation de modèles stochastiques de dégradation pour comprendre la rétroreflexion d'une ligne de marquage apparaît comme une alternative.

Une première analyse de Weibull des marquages est introduite par [16]. La durée de vie des marquages peut être distribuée par une loi de Weibull dont les paramètres sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. En revanche, le protocole actuel d'inspection par un rétroreflectomètre ne permet pas de connaître précisément la durée de vie d'un marquage : les durées de vie présentées dans les données de retour d'expériences sont censurées et la

¹ Traduction libre de « Cumulative Vehicle Exposure »

méthode d'estimation des paramètres de la loi de Weibull est optimisable. Cette communication propose des solutions pour réduire la censure en estimant la durée de vie des marquages et en optimisant les premiers modèles de durée de vie.

B. Recours à des techniques d'inspection alternatives

Avant l'arrivée des rétroreflectomètres, la fiabilité des marquages était évaluée par la quantité de Produit de Marquage Restant (PMR) correspondant à une évaluation subjective du pourcentage de produit restant sur chaque marquage. Dumont [31] a redéfini le PMR comme le pourcentage de pixel blanc restant et introduit un algorithme automatisant l'évaluation du PMR à partir d'une photo. Aucune étude visant à transposer cette technique à un protocole d'inspection dynamique n'est connue.

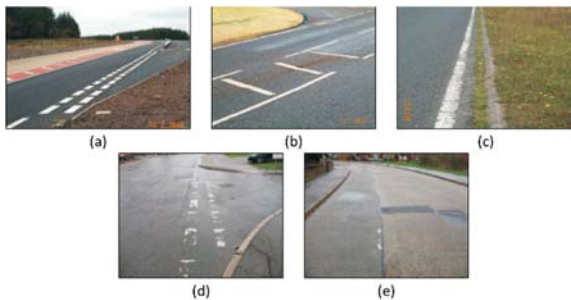


Fig. 7. Lignes dégradées de référence : (a) excellent, (b) bon, (c) moyen, (d) faible, (e) très faible

L'hypothèse d'une inspection réalisée par une caméra embarquée n'est pas nouvelle. Tremblay [32] corrèle empirique entre la perte de produit de marquage et la baisse de rétroreflexion. Costello et al. [33] suggèrent cinq niveaux de dégradation basés sur la disparition progressive de la ligne. La figure 7 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 modèle stochastique évalue la probabilité de transition d'un état à un autre est proposé. L'étude ne propose pas une corrélation avec le niveau de rétroreflexion.



Fig. 8. Deux exemples de détection de ligne de marquages : (a) par une caméra [34], (b) par un lidar [35]

Une inspection au moment de la détection de ligne est une dernière option envisageable. Outre les solutions proposées par l'institut VEDECOM, un état de l'art classique proposé par Hillel et al. montre une littérature bien plus vaste que celle de la fiabilité des marquages. Elle s'attache également à la seule détection de ligne à partir de deux capteurs : la caméra ou le lidar (Figure 8). Dans le premier cas, un algorithme de traitement d'image visant à détecter des lignes blanches sur un fond noir est développé [34]. Dans le second, le nuage de point produit par le lidar reconstruit les lignes [35]. Ces différentes solutions ne proposent pas une métrique permettant d'évaluer la fiabilité ou la dégradation des marquages.

C. Etude de cas : la Route Nationale 4 française

La fiabilité des marquages au travers de sa visibilité de nuit et son niveau de rétroreflexion reste à ce jour l'approche standard. Notamment en terme de quantité de donnée de retour d'expérience disponible.



Fig. 9. Présentation du tronçon sélectionné de la Route Nationale 4

La Route Nationale 4 (RN4) relie Paris et Strasbourg. L'infrastructure 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 9 présente le tronçon sélectionné en guise d'illustration de ces travaux de 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 rétroreflectomètre choisi est un Ecodyn 1 dont chaque mesure est localisée par un Point de Repère (PR). La direction vers Strasbourg est sélectionnée. L'infrastructure routière est riche : 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 [14][36]... mais ne sont pas directement renseignés dans les données de rétroreflectométrie

Le premier objectif consiste à analyser l'évolution de la rétroreflexion de chaque marquage et évaluer la présence d'un phénomène de dégradation éventuellement corrélé à l'infrastructure routière.

III. ANALYSE DE DONNÉES DE RÉTROREFLECTOMÉTRIE

Une ligne de marquage est divisée par un rétroreflectomètre en $n > 0$ PR. L'analyse de la rétroreflexion est en trois temps : le suivi, l'analyse ponctuelle de la dégradation, segmentation de la ligne.

A. Analyse du suivi de la rétroreflexion

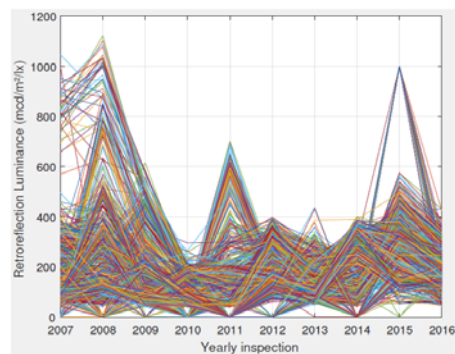


Fig. 10. Rétroreflexion de la ligne axiale de la RN4 entre 2007 et 2016

La figure 10 présente la rétroreflexion des marquages composant la ligne axiale entre 2007 et 2016. Chaque ligne correspond à un niveau de rétroreflexion moyen sur 100m localisée par un PR. Quelques observations sont réalisées à ce stade : une campagne de maintenance fut réalisée en mars 2008 (800-1100 mcd/m²/lx), un groupe de marquages est restauré en 2011 (600-700 mcd/m²/lx) et un remplacement

ponctuel est observé en 2015 (1000 mcd/m²/lx). Des groupes de marquages admettant une très faible rétro-réflexion (< 150 mcd/m²/lx) sont observés chaque année. L'analyse du suivi peut être analysé par inspection, en particulier le niveau de dégradation global de la ligne axiale.

La dégradation est ici définie par pallier afin d'évaluer les besoins d'une maintenance correctivement. Les auteurs proposent quatre seuils de référence : 400 mcd/m²/lx (correspondant au plus bas niveau à neuf empiriquement trouvé par l'auteur [11]), 200 mcd/m²/lx (recommandation de l'étude en accidentologie de Smadi et al. [37]), 150 mcd/m²/lx et 100 mcd/m²/lx (seuil de référence dans certain Etat américain [16]).

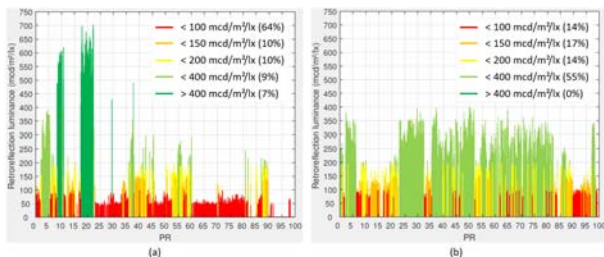


Fig. 11. Inspections de la ligne axiale de la RN4 : (a) Septembre 2011 et (b) Septembre 2012

La figure 11 montre les inspections successives de septembre 2011 et 2012. L'inspection de 2011 présente une très forte proportion de marquages dont la rétro-réflexion est inférieure à 150 mcd/m²/lx (74%) répartie sur plusieurs zones (PR 0-2, 12-17, 22-35, 42-52, 60-87 et 90-100). Une campagne de renouvellement fut réalisée en mai 2012. L'inspection de septembre présente 69% de marquage dont la rétro-réflexion est supérieure à 150 mcd/m²/lx, essentiellement concentré dans ces mêmes zones. La zone entre les PR 17 et 22 correspond au contournement de la ville de Sézanne. En 2011, la zone présente admet une rétro-réflexion supérieure à 400 mcd/m²/lx. Un an plus tard, la rétro-réflexion a fortement baissé montrant ainsi que la défaillance des marquages peut être rapide.

Cette première analyse montre qu'une inspection dresse le bilan du niveau de rétro-réflexion d'une ligne de marquage. Les zones fortement dégradées sont identifiées comme des opportunités de maintenance. L'exemple présenté par la figure 11 montre qu'une campagne de maintenance est observable sous la forme d'une importante augmentation de la rétro-réflexion et qu'une portion de ligne en très bon état peut se dégrader rapidement. Cette approche ne peut pas permettre la détection de portions de ligne présentant une évolution similaire de la rétro-réflexion dans le temps. Une approche basée sur une méthode de clustering est présentée pour répondre à cette problématique.

B. Identification de zone stratégique de maintenance

La ligne de marquage est supposée inspectée $T > 0$ fois. Soit \mathcal{J} le suivi de la rétro-réflexion des marquages (6). Le suivi du marquage $i \in [1, n]$ est un vecteur extrait du pavé \mathbb{N}^{*T} dont chaque composante $RL_j(i)$ est le niveau de rétro-réflexion de i observé à la campagne $1 \leq j \leq T$. L'ensemble \mathcal{J} est finalement une vision algébrique de la figure 10.

$$\mathcal{J} = \{(RL_1(i), \dots, RL_T(i)) / i = 1, \dots, n\} \quad (6)$$

La classification de \mathcal{J} est donnée par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). L'objectif est de produire

des suites de classes emboîtées d'hétérogénéités croissantes [38]. L'idée générale est la suivante :

1. Chaque vecteur de \mathcal{J} 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 vecteurs de \mathcal{J} .

L'étape 2 introduit une distance entre deux clusters. Plusieurs distances sont disponibles (minimale, maximale, médiane...) [38]. La distance de Ward d_w est choisie (7) : soient d la distance euclidienne ; X et Y deux clusters ; x et y leurs profils moyens ; n_x et n_y leurs effectifs. Cette distance minimise la perte d'inertie interclasse. Reste à établir un critère d'arrêt déterminant le nombre de clusters.

$$d_w(X, Y) = \frac{d(x, y)}{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}} \quad (7)$$

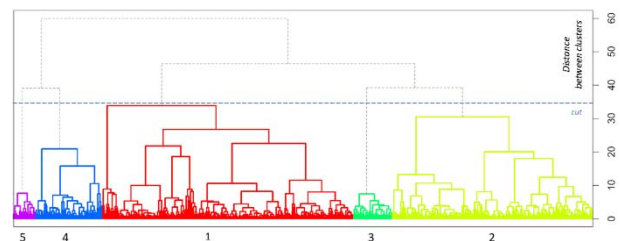


Fig. 12. Dendrogramme associé à la segmentation en cinq clusters du suivi de la ligne axiale de la RN4

La figure 12 introduit le processus de clustering du suivi de la ligne axiale de la RN4 à travers un arbre appelé dendrogramme. Chaque embranchement depuis la base représente un cluster dont la hauteur hiérarchique correspond à la distance de Ward entre les profils moyens de chaque cluster. Le critère classique d'arrêt est la "coupe du dendrogramme" qui stoppe le processus de clustering juste avant une importante augmentation de la hauteur hiérarchique [38]. Une coupe à 5 clusters est retenue.

Une projection cartographique des clusters accompagnée des profils moyens est proposée par la figure 13. le cluster 1 est réparti le long de la RN4 par morceaux moyens de 5.4 km, le cluster 2 est principalement localisé à l'Est de la RN4 et les derniers clusters se concentrent respectivement autour des contournement de Sézanne, Fère-Champenoise et Sommesous. La segmentation n'est pas parfaite : les rues de Vitry-le-François (symbolisées en noir) sont exclues en amont faute de données, les deux premiers clusters concentrent à eux seuls 78% de la ligne et les "frontières" entre deux clusters sont mal classées. Par exemple, Soudé et Maison-en-Champagne sont reliées par le cluster 1. Néanmoins, des sous-zones de moins d'un kilomètre correspondant à des agglomérations comme Coole sont classées dans le cluster 2. Les profils moyens complètent les observations réalisées. L'Est de la RN4 enregistre globalement la plus faible rétro-réflexion (143 mcd/m²/lx en moyenne), une forte augmentation est observée en 2011 à Sézanne (+511 mcd/m²/lx), Fère-Champenoise et Sommesous ont une

rétroreflexion équivalente à partir de 2010 (24 mcd/m²/lx de différence en moyenne).

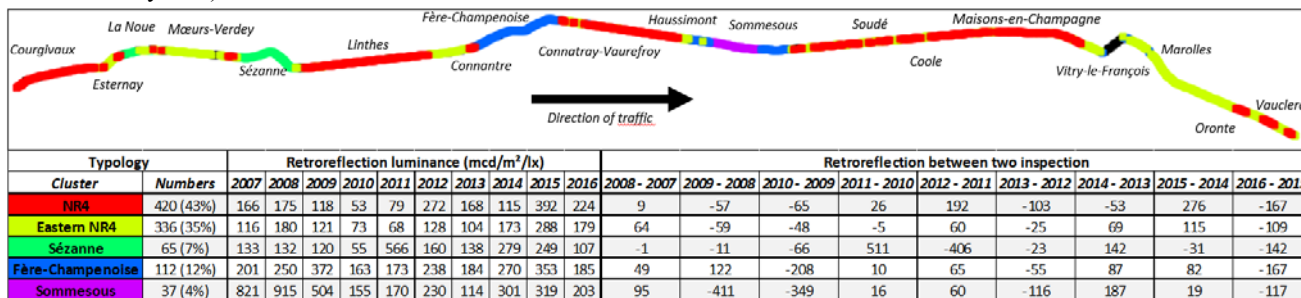


Fig. 13. Segmentation de la ligne axiale de la RN4

La figure 14 représente le suivi par cluster. Chaque cluster présente son propre suivi. Par exemple, Sommesous présente en moyenne la rétroreflexion la plus élevée tandis que le cluster 2 est régulièrement sous le seuil des 150 mcd/m²/lx en moyenne. Les clusters sont également caractérisés par des pics de rétroreflexion correspondant à des actions de maintenance. Par exemple, Sézanne présente une augmentation en 2011, Fère-Champenoise et Sommesous en présente une autre en 2008. Les cluster 1 et 2 présentent de nombreux pics ponctuels (respectivement en 2015 et 2008 par exemple). Ces observations correspondent à l'analyse des profils moyens.

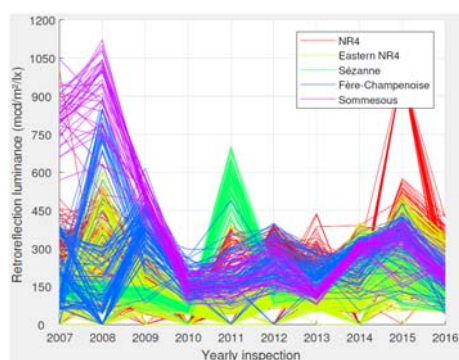


Fig. 14. Suivi de la ligne axiale de la RN4 segmentée en cinq clusters

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 coupe à 6 clusters isole un petit cluster réparti tout au long de la RN4. Il se caractérise par l'augmentation de 1000 mcd/m²/lx identifiée en 2015 visible sur la figure 10. La segmentation en cinq zones réalise un compromis entre les différentes observations.

C. Synthèse et conclusion

Le premier objectif dans l'analyse de fiabilité d'une ligne de marquage est de poser son rôle signalétique dans l'infrastructure routière et comprendre le niveau de rétroreflexion dans le temps en fonction des différentes caractéristiques de l'infrastructures. Ces travaux supposent que la ligne de marquage n'est observée qu'au travers des inspections réalisées par un rétroreflectomètre dynamique comme Ecodyn. Une analyse rapide par Google Maps ou Open Street View montre cependant que la ligne axiale de la RN4 entre Courgivaux et Vauclerc traverse une infrastructure riche : tronçons en 2×1 et 2×2 voies, des contournements urbains, des zones urbaines, un échangeur autoroutier [36]...

Une approche exploratoire des données de rétroreflectométrie est privilégiée. Par exemple, des seuils de dégradations sont préconisés afin d'apprécier la dégradation de la ligne sur chaque rapport d'inspection. L'inspection de septembre 2011 (fig 11) indique que 74% des marquages sont défaillants. L'analyse temporelle de la rétroreflexion de la ligne de marquage est réalisée par la CAH. Cette méthode de classification synthétise le processus de classification par un dendrogramme et discute le nombre de clusters optimal. Basé sur le suivi entre 2007 et 2016, la ligne axiale de la RN4 est découpée en 5 clusters. 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. La position géographique couplée à une évolution propre de la rétroreflexion permettent d'interpréter les clusters comme des zones (de maintenance) stratégiques.

La stratégie de maintenance proposée à ce stade consiste à établir un plan de maintenance préventif optimisé sur chaque zone stratégique. Pour établir une stratégie systématique par rapport à l'âge [39], une analyse de durées de vie des marquages doit être réalisées. Au regard de la littérature, la loi de Weibull est adaptée pour évaluer la fiabilité des marquages [16]. Classiquement, les paramètres de la loi sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (MV). Cependant, les durées de vie présentées dans les données de retour d'expérience sont censurées par le protocole d'inspection. 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.

IV. ANALYSE DE WEIBULL DES MARQUAGES ROUTIERS

Ce paragraphe introduit un algorithme WEM visant à modéliser la durée de vie d'une portion de ligne de marquage. Un marquage est défaillant dès l'instant où son niveau de rétroreflexion est inférieur à un seuil minimal L préalablement fixé (par exemple $L = 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)

A. Maximum de vraisemblance et algorithme EM

A notre connaissance, Sathyanarayanan et al. [16] sont les premiers à considérer la durée de vie des marquages routiers avec une approche fiabiliste. A partir des données de retour d'expérience, la méthode du MV est déployée pour estimer des lois de Weibull en guise de modèle de durée de vie.

Pour rappel, la méthode MV vise à estimer les paramètres θ d'une loi de probabilité X en fonction d'un échantillon de données indépendantes complètes (x_1, \dots, x_n) . Les estimateurs sont les valeurs maximisant la fonction de

vraisemblance $L(\theta, X) = \prod_{i=1}^n f(x)$ avec f la fonction de densité de la loi X . En général, θ est approché par la solution du système d'équations des dérivées partielles de $\ln L$ [40]. Dans le contexte d'une stratégie d'inspection discrète des marquages, les instants de défaillances exactes sont rarement observés et précise à l'inspection près. Cette information est (statistiquement) censurée. La méthode MV doit être complexifiée pour prendre en compte cette problématique mais ne réduit pas la censure des durées de vie observées [16].

Dans ce type de situation, Pradhan et al [41] recommandent le recours à un algorithme EM. L'idée fondamentale est de transformer des durées de vie imparfaites en données complétées et analysables par la méthode MV standard. Cette approche n'est pas nouvelle : un état de l'art classique est proposé par [42]. Sur la distribution de Weibull, Elmahdy [43] propose un algorithme pour la modélisation d'un mélange de Weibull et Balakrishnan & Mitra en proposent un pour la loi de Weibull à valeurs extrêmes censurées à gauche ou à droite [44].

L'objectif est de proposer en alternative des travaux de Sathyanarayanan et al. un algorithme EM permettant de compléter les durées de vie observées des marquage tout en établissant le modèle de Weibull le plus optimisé.

B. Analyse de Weibull par un algorithme WEM

L'algorithme WEM proposé dans cette communication est optimisé pour la définition (8) de fonction de densité d'une loi de Weibull $\mathcal{W}(\alpha; \beta)$ de paramètres d'échelle $\alpha > 0$ et de forme $\beta > 0$ [41]. La fonction de fiabilité $R(t)$ associée est donnée par et est la probabilité que l'instant de défaillance est supérieur à un instant $t > 0$ donné (9). La fonction de répartition est $F(t) = 1 - R(t)$.

$$\forall t > 0, \quad f(t) = \alpha \beta t^{\beta-1} e^{-\alpha t^\beta} \quad (8)$$

$$\forall t > 0, \quad R(t) = e^{-\alpha t^\beta} \quad (9)$$

Sur une ligne de marquages composée de $n > 0$ marquage, $W = (t_1, \dots, t_n)$ est leurs durées de vie supposées indépendamment et identiquement distribuées. Les marquages étant inspectés suivant un plan d'inspection, W présente en réalité le premier instant de défaillance observé de chaque marquage. Trois types de durées de vie censurées sont observées : à gauche si la défaillance est apparue avant la première inspection, par intervalle si la défaillance est apparue entre deux inspections, à droite si la défaillance n'est pas observée tout au long de son cycle de vie.

$$\forall i = 1, \dots, n : \delta_i = \begin{cases} 0 & \text{si } t_i \text{ est exacte} \\ 1 & \text{si } t_i \text{ est censuré à gauche} \\ 2 & \text{si } t_i \text{ est censuré par intervalle} \\ 3 & \text{si } t_i \text{ est censuré à droite} \end{cases} \quad (10)$$

Un indicateur de censure est associé à W pour identifier chaque censure (10). Si t_i est censuré par intervalle, alors son intervalle de censure associé est $[l_i, r_i]$ où $r_i = t_i$ et l_i est définie en fonction du plan d'inspection. W est subdivisé en fonction de l'indicateur de censure (11-14).

$$\mathcal{T} = \{t \in (t_1, \dots, t_n) / \delta_i = 0\} \quad (11)$$

$$\mathcal{X} = \{x \in (t_1, \dots, t_n) / \delta_i = 1\} \quad (12)$$

$$\mathcal{Y} = \{y \in (t_1, \dots, t_n) / \delta_i = 2\} \quad (13)$$

$$\mathcal{Z} = \{z \in (t_1, \dots, t_n) / \delta_i = 3\} \quad (14)$$

La méthode MV estime le couple (α, β) par le maximum de la fonction de vraisemblance $L(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n f(t_i)$. Afin de prendre en compte l'ensemble des censures, Sathyanarayanan et al. proposent de complexifier la fonction de vraisemblance (15) où 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. Les travaux ne précisent pas le recours à un méthode numérique comme Newton-Raphson pour optimiser l'estimation du couple (α, β) et ne proposent pas une estimation des durées de vie censurées.

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{t \in \mathcal{T}} f(t) \prod_{x \in \mathcal{X}} F(x) \prod_{y \in \mathcal{Y}} R(l_i) - R(r_i) \prod_{z \in \mathcal{Z}} R(z) \quad (15)$$

L'approche EM introduite par [41] dans un tout autre contexte répond à ces deux problématiques. L'algorithme EM est une méthode itérative en deux étapes. L'étape d'Espérance dite E propose d'analyser les données incomplètes comme manquantes et les prédire par une loi de probabilité initiale. L'étape de Maximisation dite M correspond à la méthode MV conditionnée par l'étape E et actualise l'estimation de la loi. Ce processus est itéré jusqu'à la convergence d'une seule loi de probabilité et des estimations des durée de vie imparfaites.

La loi de Weibull $\mathcal{W}(\alpha_0, \beta_0)$ initiant l'algorithme WEM est arbitraire [42]. Elle est ici donnée par le MV où la problématique des censures est totalement ignorée. Supposons que l'algorithme WEM entre dans la k -ème itération.

$$L_c(\alpha_k, \beta_k) = E[L(\alpha_k, \beta_k) / \mathcal{T}] \quad (16)$$

L'étape E construit la fonction de vraisemblance complétée (16) définie comme l'espérance de la fonction de vraisemblance conditionnée par les défaillances exactes. Cette espérance conditionnelle produit trois estimateurs adaptés à chaque censure (17-19) et estiment respectivement les données censurées à gauche, par intervalle et à droite.

$$\begin{aligned} \widehat{x}_k &= E[W / W < x] \\ &= \frac{\alpha_{k-1} \beta_{k-1} \int_0^x t^{\beta_{k-1}-1} e^{-\alpha_{k-1} t^{\beta_{k-1}}} dt}{1 - e^{-\alpha_{k-1} x^{\beta_{k-1}}}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \widehat{y}_k &= E[W / l < W < r] \\ &= \frac{\alpha_{k-1} \beta_{k-1} \int_l^r t^{\beta_{k-1}-1} e^{-\alpha_{k-1} t^{\beta_{k-1}}} dt}{e^{-\alpha_{k-1} l^{\beta_{k-1}}} - e^{-\alpha_{k-1} r^{\beta_{k-1}}}} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \widehat{z}_k &= E[W / W > z] \\ &= \frac{\alpha_{k-1} \beta_{k-1} \int_z^{+\infty} t^{\beta_{k-1}-1} e^{-\alpha_{k-1} t^{\beta_{k-1}}} dt}{e^{-\alpha_{k-1} z^{\beta_{k-1}}}} \end{aligned} \quad (19)$$

Les estimateurs étant eux-mêmes dépendants de la fonction gamma, ils sont bien définis et la fonction de vraisemblance complétée associée à une loi de Weibull censurée est définie par (20).

$$L_c(\alpha_k, \beta_k) = \prod_{t \in \mathcal{T}} f(t) \prod_{x \in \mathcal{X}} f(\widehat{x}_k) \prod_{y \in \mathcal{Y}} f(\widehat{y}_k) \prod_{z \in \mathcal{Z}} f(\widehat{z}_k) \quad (20)$$

L'étape M correspond à ce stade l'estimation du couple (α_k, β_k) par un algorithme MV basé sur l'échantillon \mathcal{S} (21). Des optimisations basées sur la méthode du point fixe ou sur Newton-Raphson montrent que le paramètre α_k est dépendant de β_k [18][19][36]. La convergence seule de β_k est suffisante. En pratique, le critère d'arrêt de l'algorithme WEM retenu est

$|\beta_k - \beta_{k-1}| < 10^{-4}$. L'approche basée sur la méthode de Newton-Raphson est recommandée car elle converge au même résultat que la méthode du point fixe en nombre d'itération moindre.

$$\mathcal{S} = \mathcal{T} \cup \{\hat{x}/x \in \mathcal{X}\} \cup \{\hat{y}/y \in \mathcal{Y}\} \cup \{\hat{z}/z \in \mathcal{Z}\} \\ = \{s_i/s_1 \leq \dots \leq s_n\} \quad (21)$$

En guise d'illustration, la figure 15 introduit le cycle des marquages (de la ligne axiale de la RN4) posés en mars 2008 et remplacés en mars 2012. Ce cycle se distingue par sa longueur (4 ans) et son effectif (92 points de mesures soit 9 km). Le seuil de rétro réflexion minimal L retenu est 150 mcd/m²/lx et les inspections ont lieu chaque septembre.

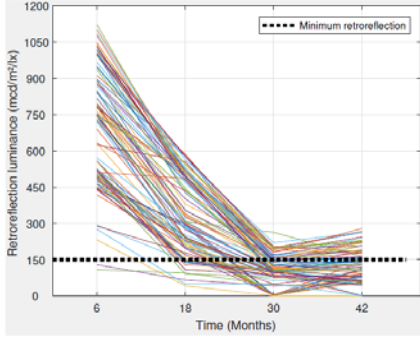


Fig. 15. Rétro réflexion observée des marquages posés en mars 2008 et remplacés en mars 2012 sur la ligne axiale de la RN4

Afin de lister l'ensemble des cas de censures, τ est le premier instant de défaillance observé de chaque marquage (22). Si $\tau \neq \emptyset$, alors le marquage i est censuré à droite et est identifié par $t_i = 42 + (23)$. L'indicateur de censure adapté δ_i est associé à chaque instant de défaillance observé (24). Cinq durées de vie censurées sont constatées : 2 à gauche à 6 mois (2%), 13 par l'intervalle 6-18 mois (13%), 54 par l'intervalle 18-30 mois (59%), 3 par l'intervalle 30-42 mois (3%) et 20 à droite à 42 mois (23%).

$$\tau = \{t_i \in \{6, 18, 30, 42\} / RL_t(i) \leq 150\} \quad (22)$$

$$t_i = \begin{cases} \min \tau & \text{si } \tau \neq \emptyset \\ 42 + & \text{sinon} \end{cases} \quad (23)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{si } t_i = 6 \\ 2 & \text{si } t_i = 18, 30, 42 \\ 3 & \text{si } t_i = 42 + \end{cases} \quad (24)$$

L'algorithme WEM est initiée par la loi de Weibull $\mathcal{W}(33.70, 4.30)$ et converge après 11 itérations vers la loi $\mathcal{W}(31.65, 2.20)$. Les cinq durées de vie estimées sont : 4.23 mois (censure à gauche à 6 mois), 13.15 mois (censure par l'intervalle 6-18 mois), 24.08 mois (censure par l'intervalle 18-30 mois), 35.38 mois (censure par l'intervalle 30-42 mois) et 49.13 mois (censure à droite à 42 mois). Au regard des dates de défaillance estimée, le remplacement de mars 2012 est justifié. Cependant, 75% des marquages sont insuffisamment rétro réfléchissant à 24 mois (soit mars 2010). Une action de remplacement systématique à cet horizon est une stratégie préventive naïve acceptable.

L'algorithme WEM introduit est robuste pour lister les différents cas de durée de vie censurée et apporter une estimation tout en modélisant un modèle de Weibull acceptable. Reste à vérifier l'adéquation de la loi de Weibull estimée aux données de retour d'expérience et l'impact des censures dans la modélisation.

C. Test de Kolmogorov-Smirnov et durées de vie censurées

Les tests d'adéquation entre le modèle de Weibull estimé par l'algorithme WEM et les données de retour d'expérience sont ici utilisés pour évaluer la robustesse du modèle. Une comparaison entre différent test d'adéquation a fait l'objet d'une précédente communication [18]. Les approches recommandées sont les tests du « papier Weibull », le test d'Evans, Johnson & Green ainsi que le test de Kolmogorov-Smirnov. Ce dernier est présenté ici.

$$G_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1_{\{\ln s_i \leq x\}} \quad (25)$$

$$G(x) = 1 - e^{-e^{-\beta(x + \ln \alpha)}} \quad (26)$$

$$KS = \sqrt{n} \sup\{|G_n(x) - G(x)| / x \in \mathbb{R}\} \quad (27)$$

Le test de Kolmogorov-Smirnov est basé sur la différence absolue entre la fonction de répartition empirique G_n calculable à partir de \mathcal{S} (25) et la fonction de répartition théorique G proposée par l'algorithme WEM (26). L'hypothèse nulle, distribution par la loi de Weibull estimée, est rejetée si la statistique (27) de Kolmogorov-Smirnov KS est proche de 1.

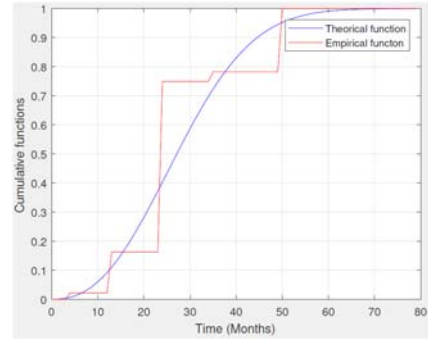


Fig. 16. Fonctions de répartition théorique et empirique.

La figure 16 compare les fonctions de répartition empirique et théorique associées à l'exemple du cycle mars 2008-2012. Les tests du papier Weibull et d'Evans, Johnson & Green ne rejettent pas l'hypothèse nulle [18]. Le test de Kolmogorov-Smirnov la rejettent ($KS = 0.74$) cependant. La raison du rejet est à l'écart de 0.33 entre les deux fonctions à horizon 24 mois. La fonction empirique réalise un important saut de 0.16 à 0.75 que la fonction théorique ne parvient pas à prendre en compte. Une limite de l'algorithme WEM est relevé à cette occasion : les 54 durées de vie censurées par l'intervalle 18-30 mois sont estimées à 24 mois. Ce qui est une estimation moyenne acceptable mais peu crédible au regard de la dynamique de dégradation présentée sur la figure 15. Un plan d'inspection semestrielle aurait pu nuancer le niveau de défaillance entre 18 et 30 mois.

D. Synthèse et conclusion

Le suivi d'une ligne de marquages montre que les inspections basées sur un rétro réflectomètre dynamique ont le défaut de censurer la durée de vie des marquages. Trois types de censures sont identifiés : à gauche, par intervalle et à droite. Sathyanarayanan et al. [16] montrent que la loi de Weibull est adaptée à l'analyse de la fiabilité des marquages mais complexifie la classique méthode MV sans pour autant préciser réduire la censure. Basé sur une première approche EM, cette communication propose un algorithme WEM réalisant des modèles de durée de vie des marquages routiers

distribués par une loi de Weibull paramétré au mieux en fonction du niveau de censure des marquages routiers tout en estimant la date de défaillance de ces derniers.

L'exemple du cycle 2008-2012 de la ligne axiale de la RN4 montre la robustesse de l'algorithme. La loi de Weibull estimée par l'algorithme \mathcal{WEM} est adaptée et les dates de défaillance estimée sont crédibles. 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. L'algorithme \mathcal{WEM} proposé est une alternative crédible à la méthode du maximum de vraisemblance d'une loi de Weibull multi-censurée.

À ce stade, une ligne de marquage d'une infrastructure routière donnée est segmentée en zones stratégiques. L'algorithme \mathcal{WEM} réalise des analyses de Weibull tout en proposant des dates de défaillance crédibles par rapport aux inspections. Tous les éléments sont réunis pour la conception d'un plan de maintenance préventif par rapport à l'âge [39].

V. MAINTENANCE D'UNE LIGNE DE MARQUAGES

La stratégie de maintenance d'une ligne de maintenance préconisée dans cette communication consiste à segmenter la ligne en zone d'intérêt présentant un mode de dégradation propre et déduire une stratégie de maintenance optimisée. Deux approches sont proposées : le remplacement par rapport à l'âge ou conditionné [39] à la dégradation courante [45].

A. Remplacement systématique par rapport à l'âge

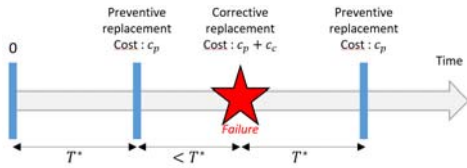


Fig. 17. Principe du remplacement systématique par rapport à l'âge

La figure 17 illustre la stratégie de remplacement préventive et systématique par rapport à l'âge [39]. Sur une ligne de $n > 0$ marquages de loi de durée de vie $\mathcal{W}(\alpha, \beta)$, l'âge est le temps écoulé depuis le dernier remplacement. La stratégie consiste à remplacer les marquages à l'âge T^* , pour un coût préventif c_p , qui minimise le risque de défaillance et le coût de maintenance par unité de temps sur un horizon infini. Si une défaillance apparaît entre deux échéances, alors un remplacement correctif est mené pour un coût additionnel $c_p + c_c$ et l'échéancier est remis à 0.

$$C(t) = \frac{c_p + c_c \times F(t)}{\int_0^t R(x) dx} = \frac{c_p + c_c \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}\right)}{\int_0^t e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} dx} \quad (27)$$

$$T^* = \left\{ T / C(T) = \min_{t>0} C(t) \right\} \quad (28)$$

$$C(\infty) = \lim_{t \rightarrow +\infty} C(t) = \frac{c_p + c_c}{\alpha \Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (29)$$

Le remplacement suppose un retour à l'état "aussi bon que neuf". La fonction de coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini dans le cas d'une durée de vie distribuée par une loi de Weibull est (27) avec F et R les fonctions de répartition et de fiabilité associées. Le pas de remplacement optimum T^* est le minimum de la fonction

$C(t)$ (28). Le coût asymptotique $C(\infty)$ à long terme (29) correspond également au coût par unité de temps d'un remplacement exclusivement correctif. L'économie relative réalisée par cette la stratégie préventive par rapport au tout correctif est donnée par $1 - \frac{C(T^*)}{C(\infty)}$ [39].

TABLE I. REMPLACEMENT SYSTÉMATIQUE PAR RAPPORT À L'ÂGE DE LA LIGNE AXIALE DE LA RN4

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 - 97 (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

La table 1 synthétise le remplacement de la ligne axiale de la RN4 segmentée par les cinq clusters identifiés à la section III.B. La dernière ligne correspond à la totalité de la ligne axiale. Le plan est basé sur différentes hypothèse : le seuil de rétroreflexion minimal est 150 mcd/m²/lx, le coût préventif total est de 10000 unités et est réparti équitablement en fonction de la taille des clusters, le coût correctif est le triple du budget préventif. Chaque cluster est associé à un modèle de durée de vie estimé par l'algorithme \mathcal{WEM} et finalement son pas de maintenance T^* et son coût économique. Par exemple, le cluster 1 constitue 43% de la ligne (420 points de mesure). Entre 2007 et 2016, 23 cycles de vie de longueurs très variables entre 1 et 7 ans sont identifiés. L'algorithme \mathcal{WEM} a identifié 1315 durées de vie (20% de censure à gauche, 33% à droite et 47% par intervalle) et propose (après dix itérations) la loi $\mathcal{W}(22.14; 1.82)$. Le temps moyen avant réparation (MTBR) est de 20 mois mais le remplacement systématique conseillé est de 14 mois. Le ratio entre le coût du remplacement préventif et du tout correctif est de 84%.

Sur la globalité de la RN4, le modèle prédit une économie par rapport au tout correctif est de l'ordre de 100%-87%=13%. Or, l'économie moyenne par cluster est de 19%. Segmenter la ligne en zone de maintenance est donc économiquement plus intéressant. En revanche, l'économie par cluster est inégale : le cluster 5 observe la plus intéressante (35%), le cluster 3 réalise la plus faible (4%) et le cluster 1 est dans la moyenne (17%). Par conséquent, l'entretien de la ligne par zone est économiquement et logistiquement plus intéressant.

B. Remplacement conditionné à la dégradation courante

Le remplacement systématique par rapport à l'âge est basé sur un comportement a priori des marquages décrits par une loi de Weibull. Le remplacement conditionné à la dégradation courante est quant à lui basé sur le suivi de la rétroreflexion des marquages et un modèle de dégradation.

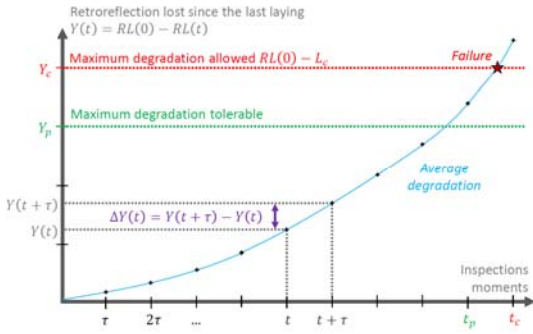


Fig. 18. Principe du remplacement conditionné à la dégradation courante

La figure 18 présente le remplacement conditionné par la dégradation courante. La ligne de marquage est inspectée périodiquement à un pas constant $\tau > 0$. Le processus Y (connu qu'au travers des inspections) indique la perte de rétro-réflexion (30) en fonction du niveau à neuf $RL(0)$. Pour un niveau de rétro-réflexion minimal L_c , la perte maximale Y_c est établie (31). Si une inspection montre que la dégradation atteint ce seuil, alors la ligne est insuffisamment rétro-réfléchissante et un remplacement correctif doit être organisé d'urgence. Le remplacement préventif est piloté par un seuil préventif Y_p : si une inspection établie que la dégradation moyenne est supérieure à ce seuil, alors la ligne est suffisamment rétro-réfléchissante mais un remplacement préventif de la ligne est mené avant la prochaine inspection.

$$Y(t) = RL(0) - RL(t) \quad (30)$$

$$Y_c = RL(0) - L_c \quad (31)$$

$$\Delta Y(t) = Y(t + \tau) - Y(t) = RL(t) - RL(t + \tau) \quad (32)$$

Les accroissements ΔY (32) sont modélisés par un processus gamma stationnaire dont les principales propriétés sont [46] :

1. $Y(0) = 0$,
2. $\{Y(t)\}_{t \geq 0}$ est un processus croissant dont les accroissements sont indépendants,
3. Les accroissements $\Delta Y(t)$ sont distribués par la loi gamma $\gamma(\alpha\tau; \beta)$ de paramètres d'échelle $\alpha\tau > 0$ et de forme $\beta > 0$.

Un tel processus supposant un processus $\{Y(t)\}_{t \geq 0}$ croissant [47], le niveau de rétro-réflexion de la ligne est inadapté car décroissant. D'où le choix de la perte cumulée de rétro-réflexion depuis la pose des marquages. Un processus gamma est choisi car les paramètres de la loi gamma sont estimés par la méthode MV entraînée par des variations exactes et observées (contournant le problème des durées de vie censurées). La stationnarité rend la dégradation indépendante de l'âge des marquages car chaque incrément est distribué par la même loi gamma [47]. Par commodité, le processus est noté ΔY .

$$C_{CB}(y) = \frac{c_p + c_i + c_c \cdot P(\Delta Y > Y_c - y)}{MTBR(y)} \approx \frac{c_p + c_i + c_c \cdot (1 - F_{\Delta Y}(Y_c - y))}{\left(\frac{y}{\alpha\beta\tau} + 1\right)\tau} \quad (33)$$

$$E[\Delta Y] = \alpha\beta\tau \quad (34)$$

$$MTBR(y) = \int_0^y 1 - F_{\Delta Y}(x) dx \approx \left(\frac{y}{\alpha\beta\tau} + 1\right)\tau \quad (35)$$

$$Y_p = \left\{ Y / C(Y) = \min_{0 < y < Y_c} C(y) \right\} \quad (36)$$

$$\frac{C_{CB}(Y_p)}{C_{CB}(Y_c)} = \frac{c_p + c_i + c_c \cdot (1 - F_{\Delta Y}(Y_c - y))}{c_p + c_i + c_c} \cdot \frac{Y_c + \alpha\beta\tau}{Y_p + \alpha\beta\tau} \quad (37)$$

Soit $y \in]0; Y_c[$ un seuil préventif arbitraire. La fonction coût de maintenance adaptée à la stratégie conditionnée à la dégradation courante est donné par (33) avec c_p le coût de remplacement préventif, c_c le coût de remplacement correctif, c_i le coût d'inspection. La fonction est dépendante de la vitesse de dégradation (34), défini comme l'espérance de ΔY , et du temps moyen avant le remplacement $MTBR$ (35). Le seuil préventif Y_p optimal est le minimum de la fonction coût. Le ratio entre le coût préventif $C_{CB}(Y_p)$ et correctif $C_{CB}(Y_c)$ est donné par (37). Par conséquent, l'économie relative est $1 - C_{CB}(Y_p)/C_{CB}(Y_c)$. D'un point de vue opérationnel, 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 $RL(t) = RL(0) - Y(t)$ et le seuil préventif opérationnel est $L_p = RL(0) - Y_p$.

TABLE II. REMPLACEMENT CONDITIONNÉ À LA DÉGRADATION COURANTE DE LA LIGNE AXIALE DE LA RN4

Typography			Replacement strategy		
Cluster - Number (Frequency)	Average Initial Retroreflective (mcd/m ² /lx)	Average Number of Inspections	γ distribution - Speed Deterioration (mcd/m ² /lx)	Cost by time unit $\frac{C_{CB}(Y_p)}{C_{CB}(Y_c)}$	Preventive Threshold (mcd/m ² /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 2 introduit le remplacement de la ligne axiale de la RN4 segmentée par les cinq clusters identifiés à la section III.B dont la dernière ligne est le cas hypothétique de la totalité de la ligne axiale. Le plan est basé sur les hypothèses suivante : seuil de rétro-réflexion minimal à 150 mcd/m²/lx, coût préventif c_p total de 10000 unités réparties équitablement en fonction de la taille des clusters, le coût et le coût correctif c_c est le triple du budget préventif et le coût d'inspection c_i est de 5 unités le point de mesure. Chaque cluster est associé à un niveau de rétro-réflexion initial, d'un nombre moyen d'inspection, un processus gamma estimé par la méthode MV associé à son espérance et finalement un seuil préventif de dégradation L_p et son coût économique.

Par exemple, sur les 23 cycles de vie observés sur le cluster 1 constitue, 17 présentent au moins deux inspections et sont retenus. Le méthode MV a identifié 2272 variations de rétro-réflexion entre deux inspections et propose la loi $\gamma(1.08; 87.47)$. La variation moyenne est de 94 mcd/m²/lx. Le remplacement conditionné conseille un seuil préventif de

346 mcd/m²/lx et le ratio entre le coût du remplacement préventif et du tout correctif est de 67%. Sur la globalité de la RN4, le modèle prédit une économie par rapport au tout correctif est de l'ordre de 100%-69%=31%. L'économie moyenne par cluster est moindre : 27%. En revanche, l'économie par cluster est inégale mais reste intéressante : le cluster 1 observe la plus intéressante (33%), le cluster 5 réalise la plus faible (21%). En revanche, les seuils préventif L_p sont très élevés et similaires à des niveaux de rétro-réflexion à neuf.

C. Comparaison des stratégies de remplacement

Les deux stratégies présentées sont acceptables en théorie. Cette section les compare sur deux points : leurs applications sur un cycle passé, le bénéfice des stratégies.

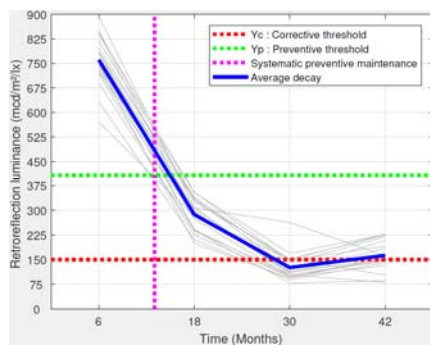


Fig. 19. Remplacement préventif par rapport à l'âge et conditionnée à la dégradation courante : Cycle 2008 - 2012 du cluster 4

La figure 19 présente le cycle des marquages posé en mars 2008 et remplacé en mars 2012 sur le cluster 4 de la ligne axiale de la RN4. La stratégie systématique recommanderait un remplacement à 13 mois (Table 1) mais correspondrait ici à une action de surmaintenance. La stratégie conditionnée propose un seuil préventif de 408 mcd/m²/lx (Table 2). Il est atteint en moyenne vers 16 mois mais est constaté à l'inspection de 18 mois. Un renouvellement des marquages doit être mené avant la prochaine inspection à 30 mois. Cette stratégie est adéquate car les premières défaillances sont observées à 30 mois. Le remplacement conditionné est ici plus intéressant.

Les tables 1 et 2 montrent sur l'économie relative par rapport à une stratégie corrective par cluster prédites par les remplacements systématique et conditionné sont respectivement de 19% et 27% en moyenne. L'économie relative prédite par le remplacement conditionné est également plus intéressante sur chaque cluster. A l'échelle du cluster 2 (l'est de la RN4), le remplacement systématique prédit une économie de 4% tandis que celle est de 30% pour le remplacement conditionné. Sur l'exemple de la ligne axiale segmentée en cinq clusters, le remplacement conditionné optimisé sur chaque cluster est finalement plus intéressant.

VI. CONCLUSION

L'objectif principal est le développement d'outils d'aide à la maintenance des marquages routiers motivée en partie par l'arrivée des véhicules autonomes. La technologie courante oriente ces travaux vers l'exploitation de données de rétro-réflexométrie qui sont à la base de la littérature scientifique. Cette dernière met en évidence de nombreux modèles de dégradation basés sur des méthodes de régression dont le consensus est d'expliquer la rétro-réflexion par l'âge du marquage. Plusieurs interrogations sur cette approche ainsi

qu'une première analyse de Weibull ont encouragé l'étude de la fiabilité des marquages par une approche stochastique

Sur une ligne de marquage donnée, le suivi de la rétro-réflexion par point de repère réalisée est segmenté par une CAH. Les clusters sont interprétés comme différentes zones géographiques définies par son historique de maintenance et sa dynamique de dégradation. Le premier modèle de maintenance envisagé fut le remplacement systématique par rapport à l'âge qui est une suite logique des travaux introduits par [1]. Cette approche est basée sur une loi de durée de vie des marquages dont l'estimation est compliquée par la censure (par le protocole d'inspection) des durées de vie observées. Un algorithme WEM est afin d'estimer les durées de vie censurées ainsi que les paramètres de la loi de Weibull comme modèle de durée de vie. Le remplacement systématique propose un pas de remplacement préventif mais risque de rentrer en conflit avec la gestion courante d'une infrastructure (un remplacement hivernal reste délicat à entreprendre). Le remplacement conditionné par la dégradation courante a l'avantage de s'adapter au plan d'inspection courant et consiste à définir un seuil de dégradation préventif engageant une campagne de maintenance à réaliser avant la prochaine inspection. La loi de dégradation associée est un processus gamma évaluée par la méthode MV entraînée par les variations entre deux inspections qui sont indépendantes de la censure des durées de vie. Les seuils préventifs ont cependant le défaut d'être équivalents à un niveau de rétro-réflexion attendu pour un marquage neuf ou faiblement dégradé dû à la faible fréquence d'inspection et la relative courte durée de vie des marquages.

La stratégie conditionnée par la dégradation courante et par zone semble constituer la solution la plus stable. Ses principaux atouts sont le contournement de la problématique des durées de vie multicensurées et l'adéquation avec les pratiques d'inspection actuelles. Son principal défaut est la définition du seuil de dégradation préventif équivalent à un marquage neuf.

Le plan de maintenance devait initialement être adapté au capteur standard d'un véhicule autonome. Pour se faire, il manque un premier exemple de ligne de marquage régulièrement inspectée par ce type de véhicule. De nombreux défis scientifiques restent à lever comme le choix d'une mesure de dégradation des marquages et son niveau de dégradation maximal adaptée aux capteurs du véhicule autonome. Il est prématuré d'affirmer que ces travaux pourront s'appliquer tels quels à de telles données issues de ces capteurs. Toutefois, la genericité de la démarche scientifique et les différents algorithmes proposés militent dans ce sens.

REMERCIEMENT

L'institut VEDECOM et l'université Gustave Eiffel remercient le CEREMA et la DIR Est pour avoir transmis l'ensemble des données d'inspection de la RN4

REFERENCES

- [1] J. Erlich, "Quelle infrastructure pour le véhicule autonome?," Routes/Roads 2017 – N°373 – www.piarc.org, 2017.
- [2] M. Revilloud, D. Gruyer, and M.-C. Rahal, "A lane marker estimation method for improving lane detection," in Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on, 2016, pp. 289–295.
- [3] M. Revilloud, D. Gruyer, and M.-C. Rahal, "A new multi-agent approach for lane detection and tracking," in Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on,

2016, pp. 3147–3153.

- [4] L. Goubert, G. Michaux, and C. Toussaint, Code de bonne pratique pour l'exécution des marquages routiers. 2007.
- [5] M. Zouch, "Decision dans l'incertain : Application à la gestion de l'entretien routier," Université de Nantes, France, 2011.
- [6] F. Menant, "Estimation de l'uni longitudinal des infrastructures routières au moyen de véhicules traceurs," Université Nantes Angers Le Mans, 2014.
- [7] AFNOR, "NF EN 1436 (January 2018) - Maintenance - Maintenance terminology," AFNOR Editions, 2018.
- [8] M. Revilloud, "Architecture de perception adaptative pour la détection et le suivi multivoies," Université Paris-Saclay, 2016.
- [9] European Commission, "COST 331: requirements for horizontal road marking: final report of the action," vol. 1. Office for official publications of the European communities, 1999.
- [10] F. Féré, Guide pratique de la signalisation horizontale. SIGNATURE GROUP, 2016.
- [11] M. Redondin, "Analyse factorielle pour la classification des produits de marquages routiers," in 50èmes Journée de Statistique, 2018, Palaiseau, France, 2018, p. 6p.
- [12] IISR, "Instruction interministérielle sur la signalisation routière, 7ème partie : Marquages sur chaussée." 2011.
- [13] VECTRA, "ECODYN mlpc - Signing visibility (en cours de migration vers <http://www.nextroad.com/>)," 2017.
- [14] "Réseau routier national." [Online]. Available: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/louverture-des-donnees-du-reseau-routier-national>.
- [15] W. E. Sitzabee, J. E. Hummer, and W. Rasdorf, "Pavement Marking Degredation Modeling and Analysis," J. Infrastruct. Syst., vol. 15(3), pp. 190–199, 2009.
- [16] S. Sathyanarayanan, V. Shankar, and E. T. Donnell, "Pavement Marking Retroreflectivity Inspection Data : A Weibull Analysis," J. Transp. Res. Board., vol. 2055, pp. 63–70, 2008.
- [17] M. Redondin, N. Faul, L. Bouillaut, and D. Daucher, "Temporal clustering of retroreflective marking," in Safety and Reliability - Theory and Applications - Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017, 2017, doi: 10.1201/9781315210469-55.
- [18] M. Redondin, L. Bouillaut, A. Same, D. Daucher, and N. Faul, "Un algorithme EM pour l'analyse de durée de vie des marquages routiers retro-reflechissants," in 21e Congrès de Ma^{tr}rise des Risques et Sûreté de Fonctionnement (Reims - France, 2018, p. 7p.
- [19] M. Redondin, N. Faul, L. Bouillaut, A. Samé, and D. Daucher, "Alternative weibull analysis for road markings: An EM approach," in Safety and Reliability - Safe Societies in a Changing World - Proceedings of the 28th International European Safety and Reliability Conference, ESREL 2018, 2018.
- [20] J. J. Lu, "Performance of Traffic Markings in cold regions," Transp. Res. Center, Univ. Alaska Fairbanks, Rep. No. INE/TRC 95.03, 1995.
- [21] M. Scheuer, T. Maleck, and D. Lighthizer, "Paint-line retroreflectivity over time," J. Transp. Res. Board, vol. 1585, pp. 53–63, 1997.
- [22] G. Bahar, M. Masliah, T. Erwin, and E. Tan, "Pavement Marking Materials and Markers: Real-World Relationship Between Retroreflectivity and Safety Over Time," NCHRP Rep. 17-28, Transp. Res. Board, Washington, D.C., 2006.
- [23] W. A. Sarasua, D. B. Clarke, and W. J. Davis, "Evaluation of Interstate Pavement Marking Retroreflectivity," Rep. to South Carolina Dep. Transp. Rep. No. FHWA-SC-03-01, 2003.
- [24] A. Thamizharasan, W. A. Sarasua, D. B. Clarke, and W. J. Davis, "A methodology for estimating the lifecycle of interstate highway pavement marking retroreflectivity," in 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2003.
- [25] N. Hautière, V. Ledoux, J.-P. Tarel, V. Boucher, and P. Charbonnier, "Observation, modélisation et prédiction de la dégradation temporelle des marquages routiers," Proj. DIVAS - Dialogue Infrastruct. Véhicules pour Améliorer la Sécurité routière, pp. 195–212, 2008.
- [26] N. Abboud and B. Bowman, "Cost-and longevity-based scheduling of paint and thermoplastic striping," Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board, no. 1794, pp. 55–62, 2002.
- [27] J. K. Lindly and R. K. Wijesundera, "Evaluation of Profiled Pavement Markings," Dep. Civ. Environ. Eng. Univ. Alabama, UTCA Rep. Number 01465, 2003.
- [28] H.-S. Lee, H.-U. Oh, and J.-H. Jang, "Development of the decay curve of pavement marking retroreflectivity based on a field survey," REAAA J., vol. 16(1), pp. 42–51, 2010.
- [29] D. M. Mull, "Paint Pavement Marking Performance Prediction model that includes the impacts of snow removal operations," Département de l'Air Force, Air University, Air Force Institute of Technology, 2011.
- [30] V. Karwa and E. Donnell, "Predicting Pavement Marking Retroreflectivity Using Artificial Neural Networks: Exploratory Analysis," J. Transp. Eng., vol. 137(2), pp. 91–103, 2011.
- [31] E. Dumont, Evaluation du degré d'usure des marquages routiers par traitement d'images. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Convention DSCR-LCPC, 2001.
- [32] M. Tremblay, "Nouvelle approche de gestion de la signalisation horizontale au Québec," Congr. Annu. l'Association des Transp. du Canada 2004, Québec, p. 14 p, 2004.
- [33] S. B. Costello, W. F. Moss, C. J. Read, and S. Grayer, "Life-cycle planning methodology for ancillary highway assets," in Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2011, vol. 164, no. 4, pp. 251–257.
- [34] L. Xiao, C. Li, D. Zhao, T. Chen, and B. Dai, "Road marking detection based on structured learning," in Intelligent Control and Automation (WCICA), 2016 12th World Congress on, 2016, pp. 2047–2051.
- [35] P. Kumar, C. P. McElhinney, P. Lewis, and T. McCarthy, "Automated road markings extraction from mobile laser scanning data," Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., vol. 32, pp. 125–137, 2014.
- [36] A. Tidjani, M. Redondin, L. Bouillaut, and D. Daucher, Impact de l'infrastructure routière sur la signalisation horizontale (Rapport de stage de fin d'étude). Institut VEDECOM, IFSTTAR, Université de Lorraine, 2018.
- [37] O. Smadi, R. R. Souleyrette, D. J. Ormand, and N. Hawkins, "Pavement Marking Retroreflectivity: Analysis of Safety Effectiveness," J. Transp. Res. Board, vol. 2056, pp. 17–24, 2008.
- [38] S. Tuffery, Data Mining and Statistics for Decision Making. John Wiley and Sons, 2011.
- [39] H. Arnljot and M. Rausand, System reliability theory: models and statistical methods, vol. 420. John Wiley & Sons, 2009.
- [40] G. Saporta, Probabilités, analyse des données et statistique. Editions Technip, 2006.
- [41] B. Pradhan and D. Kundu, "Analysis of Interval-Censored Data with Weibull Lifetime Distribution," Sankhya B Indian J. Stat., vol. 76(1), pp. 120–139, 2014.
- [42] G. J. McLachlan and T. Krishnan, The EM Algorithm and Extensions. John Wiley and Sons, 2008.
- [43] E. E. Elmahdy, "A new approach for Weibull modeling for reliability life data analysis," Appl. Math. Comput., vol. 250, pp. 708–720, 2015.
- [44] N. Balakrishnan and D. Mitra, "Left truncated and right censored Weibull data and likelihood inference with an illustration," Commun. Stat. data Anal., vol. 56, pp. 4011–4025, 2012.
- [45] B. Castanier, A. Grall, and C. Berenguer, "Maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle," Actes des Journées Dr. d'Automatique, 21-23 Sept. 1999, Nancy, Fr., vol. 99, pp. 309–312.
- [46] J. M. Van Noortwijk, "A Survey of the Application of Gamma Processes in Maintenance," Reliab. Eng. Syst. Safety., vol. 94(1), pp. 2–21, 2009.
- [47] A. Grall, L. Dieulle, C. Bérenguer, and M. Roussignol, "Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system," IEEE Trans. Reliab., vol. 51, no. 2, pp. 141–150, 2002.